



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E  
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS**

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO  
DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN SUSTENTABLE DE  
BIOTURBOSINA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO PETROLERO**

**P R E S E N T A :  
LILIA ARTEAGA ESPINOZA**

**ASESOR DE TESIS:  
DR. ROGELIO SOTELO BOYÁS**



**FEBRERO, 2018**

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional



Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas  
Departamento de Evaluación y Seguimiento Académico

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos".

"60 Aniversario del CECyT 14 "Luis Enrique Erro".

"60 Aniversario del Patronato de Obras e Instalaciones".

"50 Aniversario de la COFAA-IPN".

"30 Aniversario de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología".

T-039-17

Ciudad de México, a 8 de diciembre del 2017.

A la C. Pasante:  
**LILIA ARTEAGA ESPINOZA**  
**PRESENTE**

Boleta:  
**2009330018**

Carrera:  
**IQP**


Generación:  
**2009-2013**

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

**"Desarrollo de una metodología para el diseño del proceso de la producción sustentable de bioturbosina"**

encontramos que el citado Trabajo escrito de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para autorizar el Examen Profesional y **PROCEDER A SU IMPRESIÓN** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.


Atentamente  
**JURADO**

  
Ing. Estelio Rafael Baltazar Cadena  
**Presidente**

  
Ing. Héctor Francisco Martínez Frías  
**Secretario**

  
Ing. Enrique Arce Medina  
**1er. Vocal**

  
Ing. Miguel Ángel Rangel Jiménez  
**2º Vocal**

  
Ing. Rogelio Sotelo Boyás  
**3er. Vocal**



T-039-17

Ciudad de México, 26 de abril del 2017.

A la C. Pasante:  
**LILIA ARTEAGA ESPINOZA**

Boleta:  
**2009330018**

Carrera:  
**IQP**

Generación:  
**2009-2013**

Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza que el C. **Ing. Rogelio Sotelo Boyás**, sea asesor en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

**"Desarrollo de una metodología para el diseño del proceso de la producción sustentable de bioturbosina".**

- Resumen.
- Introducción.
- I.- Generalidades.
- II.- Herramientas para la construcción de una metodología de diseño sustentable de productos.
- III.- Desarrollo de una metodología para el diseño sustentable de bioturbosina.
- IV.- Definición del proyecto de diseño del proceso productivo sustentable de bioturbosina.
- Conclusiones.
- Referencias.

Se concede un plazo máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el Jurado asignado.

M. en C. Miguel Hesiquio Garduño  
Presidente de la Academia de  
Conocimientos Científicos.

Ing. Rogelio Sotelo Boyás  
Director de Tesis  
Ced. Prof. 2967918

Ing. César Rodríguez Guerrero  
Jefe del Departamento de Evaluación  
y Seguimiento Académico.

Ing. Víctor Manuel Feregrino Hernández  
Subdirector Académico

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Al Instituto Politécnico Nacional, y “Proyectos SIP 20150086 y 20160458”.

# ÍNDICE

---

RESUMEN .....	vii
INTRODUCCIÓN .....	viii
CAPÍTULO I · GENERALIDADES.....	1
1.1 ¿Qué es la turbosina? .....	1
1.1.1 Funcionamiento general del motor de aviación.....	1
1.2 Propiedades de desempeño .....	3
1.3 Especificaciones de la turbosina.....	4
1.4 Producción de turbosina.....	5
1.4.1 Proceso convencional.....	5
1.4.2 Procesos alternativos.....	8
1.4.3 Producción de bioturbosina.....	17
1.5 Demanda de turbosina .....	19
1.6 Panorama de la producción de bioturbosina .....	20
1.7 Normatividad de sostenibilidad de biocombustibles .....	21
CAPÍTULO II · HERRAMIENTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE DISEÑO SUSTENTABLE DE PRODUCTOS .....	25
2.1 Sistema de Producción Toyota .....	26
2.2 Seis Sigma .....	30
2.2.1 Proceso de negocio Seis Sigma.....	31
2.3 Diseño para Lean Seis Sigma (DFLSS).....	31
2.4 Diseño clásico de procesos químicos.....	34
2.5 Ingeniería verde .....	37
2.6 Sinergia entre gestión Lean - Green. ....	40
2.7 Importancia del DFLSS en desarrollo de negocios Lean-Green.....	41
CAPÍTULO III · DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO SUSTENTABLE DE BIOTURBOSINA.....	43
3.1 Valor del negocio. ....	43
3.2 Definir .....	46
3.2.1 Objetivo y alcance del proyecto .....	46
3.3 Evaluar y seleccionar .....	51
3.3.1 Estudio de los requerimientos del negocio, el consumidor y el ambiente. ....	52
3.3.2 Desarrollo del concepto de diseño .....	61

3.4	Diseñar .....	71
3.4.1	Diseño detallado del proceso químico .....	73
3.4.2	Diseño del proceso de producción .....	85
3.5	Ejecutar .....	90
3.5.1	Proceso de operación, control y ajuste .....	90
3.5.2	Producción .....	93
3.6	Gestionar .....	98
3.6.1	Validación de resultados.....	99
3.6.2	Mejora continua .....	99
CAPÍTULO IV ·DEFINICIÓN DEL PROYECTO DE DISEÑO DEL PROCESO PRODUCTIVO SUSTENTABLE DE BIOTURBOSINA .....		
		101
4.1	Definir el proyecto .....	101
4.1.1	Evaluación de la oportunidad de negocio .....	101
4.1.2	Elementos del alcance .....	106
4.1.3	Desarrollo del plan del proyecto .....	110
4.1.4	Carta del proyecto .....	112
4.2	Evaluar el mercado y seleccionar el concepto de diseño.....	112
4.3	Diseñar el proceso de refinación para producir bioturbosina.....	116
4.4	Ejecutar el proceso productivo.....	117
4.5	Gestionar la mejora continua .....	117
4.6	Robustez de la metodología de Diseño para la Sustentabilidad. ....	118
CONCLUSIONES .....		120
REFERENCIAS.....		122
ANEXO 1. Especificaciones de la turbosina (Jet Fuel A1) en México, de norma NOM-EM-005-CRE-2015.....		129
ANEXO 2. Pasos para desarrollar un análisis AMEF .....		133
ANEXO 3. Heurísticas para la síntesis del proceso químico .....		136
ANEXO 4. Relación de permisos de importación de turbosina vigentes al 20 de diciembre de 2017 .....		140
ANEXO 5. Mapas de ruta tecnológicas de CEMIE-Bio .....		142

## INDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Motor turbofan comercial, adaptado de ref. [4].	2
Figura 2. Sección primaria de refinación de petróleo, modificado de [9].	6
Figura 3. Proceso típico de hidrotreatmento de destilados intermedios aplicado a turbosina, modificado de [14].	8
Figura 4. Simplificación del proceso F-T, adaptado de [15].	9
Figura 5. Proceso CTL, modificado de [18].	10
Figura 6. Proceso GTL, modificado de [20].	11
Figura 7. Opciones actuales para la producción de bioturbosina [22, 23].	12
Figura 8. Diagrama general de mecanismos de reacción para el hidrotreatmento de triglicéridos sobre cuatro tipos de catalizador [25].	15
Figura 9. Representación esquemática del proceso de dos etapas para la obtención de nafta verde, bioturbosina y diesel verde [24].	16
Figura 10. Co-alimentación de gasóleos de vacío y aceites vegetales a un hidrotreatmentador [22].	17
Figura 11. Mayoría de rutas para la producción de bioturbosina [27].	18
Figura 12. Comercio exterior de Turbosina, 2014-2029 [31].	20
Figura 13. Línea del tiempo del desarrollo de combustibles alternativos en la aviación, modificado de [32, 33].	21
Figura 14. Esquema de la secuencia de certificación para biocombustibles [35].	24
Figura 15. Casa del Sistema de Producción de Toyota [46].	28
Figura 16. <i>Etapas de la metodología DMAIC, modificado de [50].</i>	32
Figura 17. Etapas de la metodología DFLSS, de [52].	33
Figura 18. Restricciones de diseño, de [53].	34
Figura 19. Estructura de un proyecto de ingeniería química, de [53].	36
Figura 20. Superposición de Lean y Green [69].	41
Figura 21. Las tres dimensiones de la sustentabilidad, de [77].	42
Figura 22. Creación del valor del negocio, modificado de [52].	44
Figura 23. Pasos para el DPS.	45
Figura 24. Entradas y salidas de DEFINIR.	46
Figura 25. Plan Multi-Generacional del proyecto (MGPP) [87].	48
Figura 26. Mapa SIPOC [88].	48
Figura 27. Construcción de la matriz de evaluación de riesgos, construido de [85, 86] [87].	51
Figura 28. Entradas y salidas de EVALUAR Y SELECCIONAR.	52
Figura 29. Secuencia del estudio y análisis de la voz del cliente, modificado de [86].	52
Figura 30. Segmentación del mercado [87].	53
Figura 31. Ciclo de vida útil del producto.	54
Figura 32. Modelo de entradas y salidas del ciclo de vida del producto [89].	55
Figura 33. Fases del Despliegue Funcional de la Calidad (QFD) [48].	56
Figura 34. Diagrama de afinidad.	57
Figura 35. Traslación del diagrama de afinidad al diagrama de árbol [87].	57
Figura 36. Modelo de Kano.	58
Figura 37. Pasos para la clasificación de CTQ en modelo Kano, construido de [87].	58
Figura 38. Relación de peso de los requerimientos CTQ.	59
Figura 39. Matriz de pesos relativos de los requerimientos CTQ.	59
Figura 40. Matriz de traducción de los requerimientos del cliente, modificado de [52].	60
Figura 41. QFD-1 Planeación de los CTQ, modificado de [48, 86].	61
Figura 42. Proceso de diseño [52].	62
Figura 43. QFD-2 Análisis funcional del producto, modificado de [48, 86].	63

Figura 44. Pasos para el desarrollo del concepto y diseño preliminar [91].....	64
Figura 45. Desarrollo del material [92].....	65
Figura 46. Problema para la síntesis del proceso [91, 93].....	66
Figura 47. Diseño de conceptos a partir de las funciones del negocio [86]. .....	67
Figura 48. Síntesis para el diseño del proceso [91]. .....	67
Figura 49. Árbol de síntesis del proceso [91].....	69
Figura 50. Mapa de evaluación de impacto, modificado de [89]. .....	69
Figura 51. Fases de un Análisis Ciclo de Vida (ACV), ISO 1440 .....	70
Figura 52. Matriz Pugh.....	70
Figura 53. Entradas y salidas de DISEÑAR .....	71
Figura 54. Despliegue del diseño de los procesos del negocio.....	72
Figura 55. Síntesis detallada para el diseño del proceso [91]. .....	73
Figura 56. DFB de la producción supercrítica de biodiesel, [95]. .....	74
Figura 57. DFP de la producción de biodiesel [96]. .....	75
Figura 58. DT&I de la producción supercrítica de biodiesel, [95].....	76
Figura 59. Selección y configuración de reactores, construido de [93].....	78
Figura 60. Métodos de separación de mezclas, construido de [93]. .....	79
Figura 61. Un problema simple de recuperación de calor con una corriente caliente y una corriente fría [93]. .....	80
Figura 62. QFD-3 Planeación de los parámetros de diseño, modificado de [48, 86] .....	82
Figura 63. Diagrama-P [48] .....	82
Figura 64. Análisis AMEF para la validación del diseño [91].....	84
Figura 65. Diseño detallado de los equipos [53]. .....	85
Figura 66. Ocho elementos críticos del concepto del producto [86]. .....	86
Figura 67. Desarrollo a nivel tareas, modificado de [86].....	88
Figura 68. Diseño del proceso de validación del diseño [86]. .....	89
Figura 69 Entradas y salidas de EJECUTAR .....	90
Figura 70. Modelo del proceso [48]. .....	91
Figura 71. Desarrollo de experimentos, construido de [48, 52]......	92
Figura 72. Desarrollo del estudio de capacidad del proceso, construido de [42]. .....	93
Figura 73. Despliegue de políticas en la organización, modificado de [46].....	94
Figura 74. Cuadro integral de mando, construido de [38, 77, 99].....	96
Figura 75. Sistema de documentación de procedimientos [38].....	98
Figura 76. Entradas y salidas de GESTIONAR.....	98
Figura 77. Proceso práctico para la resolución de problemas del sistema Toyota [46]. .....	100
Figura 78. Definición del problema. .....	102
Figura 79. Gráfico de proyección de demanda de bioturbosina en México, SENER a partir de ASA. ....	103
Figura 80. Plan multigeneracional para la producción de bioturbosina.....	108
Figura 81. Ciclo de vida de la bioturbosina, de [33]. .....	109
Figura 82. SIPOC del negocio .....	110
Figura 83 Gantt del proyecto.....	111
Figura 84. Esquema funcional del equipo de proyecto .....	111
Figura 85. Proyección de recursos humanos.....	112
Figura 86. Carta del proyecto .....	113
Figura 87. Demanda de turbosina por región estadística 2015-2029 [113] .....	114
Figura 88. Superficies óptimas para el cultivo de piñón en México en hectáreas [122]. .....	116



## INDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Especificaciones de las propiedades de turbinas [7, 8].	4
Tabla 2. Composición típica de varios aceites vegetales [24].	14
Tabla 3. Resumen de tecnologías para producción de bioturbosina [28, 29].	19
Tabla 4. Certificaciones para la sustentabilidad de biocombustibles [29, 34-38].	22
Tabla 5. Síntesis para el sistema de control [91].	83
Tabla 6. Entregables críticos del diseño de la producción [86, 91].	87
Tabla 7. Acuerdos de abastecimiento de bioturbosina internacionales 2015 [1].	103
Tabla 8. Procesos de producción de bioturbosina, modificado de [105-110].	104
Tabla 9. Definición del Proyecto.	106
Tabla 10. Definición de los alcances del proyecto.	107
Tabla 11. Metodologías de Diseño para la Sustentabilidad, construido del presente trabajo y [89, 124].	119

## RESUMEN

---

La producción de bioturbosina es un tema de gran importancia en México ante la creciente demanda de combustible de avión que se proyecta en los próximos años y la incorporación de nuevas regulaciones ambientales como alternativa ante de los cambios climáticos provocados por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el uso de turbosina refinada del petróleo. Las organizaciones que se encuentran dentro de la cadena de suministro del combustible de avión tienen como reto la incorporación de la bioturbosina como una alternativa para satisfacer estas nuevas necesidades.

Las incertidumbres respecto a la producción y consumo sustentable de biocombustibles en los años venideros ofrecen oportunidades para la incorporación de nuevos métodos de diseño de negocios dentro de la industria química. Es por esto por lo que en el presente trabajo se propone y desarrolla una metodología de diseño para la sustentabilidad (DPS) de *procesos de negocio* dirigida a compañías chicas y medianas de la industria química.

El DPS se diseñó para extender el *valor* de un negocio al incluir los requerimientos ambientales para la creación de actividades económicas sustentables. La metodología se dividió en cinco pasos del proyecto para la creación de *procesos de negocio*, y estos son: *Definir, Evaluar y Seleccionar, Diseñar, Ejecutar, y Gestionar*.

El paso de *definir* es el planteamiento de la oportunidad del negocio, la formación de un equipo de proyecto y el análisis de riesgos del nuevo negocio. El segundo paso, *Evaluar y Seleccionar*, es la recopilación de las necesidades del mercado y las necesidades ambientales mediante el mapeo del ciclo de vida del producto, la evaluación de las necesidades recopiladas y la transformación de las necesidades en funciones del negocio, y la selección del concepto del diseño del proceso químico. El paso de *Diseñar* consiste en el diseño del proceso químico, el diseño detallado de equipos, el diseño del sistema de control del proceso químico y el diseño para la producción. El cuarto paso, *Ejecutar*, consta de la simulación de la producción, la construcción de una filosofía laboral hacia la sustentabilidad y el despliegue de políticas dentro de la organización para construir el sistema de calidad. El quinto paso, *Gestionar*, contempla el control y seguimiento de la producción, así como la ejecución constante de la resolución de problemas para promover la mejora continua.

Como caso de estudio se analizó la producción de bioturbosina en México como una oportunidad de negocio sustentable que requiere usar la metodología DPS aquí desarrollada. Los resultados obtenidos en el primer paso del DPS demostraron que la producción de bioturbosina en México prevalece como una oportunidad de negocio ante la creciente demanda del combustible de avión y los nuevos requerimientos ambientales para toda la cadena de suministro. Se evaluaron las opciones de integración del proceso de refinación de aceites sintéticos en la cadena de suministro de bioturbosina y se especificaron los alcances del negocio en un plan multigeneracional.

El método DPS, comparado con otras metodologías de diseño para la sustentabilidad, resultó ser más robusto al considerar todas las etapas de vida necesarias para un proyecto de negocio sustentable y su aplicación puede extenderse a negocios que no son exclusivos de la industria química. Aunado a esto, se considera que la flexibilidad del DPS permitirá incluir las nuevas herramientas de diseño para la ingeniería verde que surjan en el futuro.

## INTRODUCCIÓN

---

La industria de aviación es de las de más rápido crecimiento en el sector del transporte y se prevé que crezca en torno al 5% anual [1]. En materia de combustibles, históricamente este crecimiento se ha abastecido por turbosina derivada de la refinación del petróleo. Sin embargo, el sector de la aviación es actualmente responsable de alrededor del 2.5% de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Gas de Efecto Invernadero, GEI) relacionadas con el uso de energía [2, 3]. Con esto, la industria de la aviación está en un cambio forzado para cumplir los requerimientos de las legislaciones ambientales y abastecer la creciente demanda.

Ante la oportunidad que presenta la integración de la bioenergía en el sector de transporte, también existen inquietudes en torno a su sustentabilidad. La sustentabilidad se define como la integración de los aspectos económicos, ambientales y sociales; por lo tanto, el desarrollo sustentable hace referencia a la capacidad que haya desarrollado el sistema humano para satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer los recursos y oportunidades para el crecimiento y desarrollo de las generaciones futuras [4, 5].

Organizaciones internacionales como la Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles (RSB); la Directiva Europea de Energías Renovables (RED); la Agencia de Protección Ambiental de EUA (EPA); la Organización Internacional de Normalización (ISO); entre otros, crearon estándares para la evaluación de la sustentabilidad de la cadena de valor en la producción y consumo de biocombustibles. Para todo esto, aún existe la incertidumbre dentro de la industria sobre qué herramientas de diseño podrán emplearse para asegurar el diseño de la producción de bioturbosina y que ésta sea competitiva contra el precio actual de turbosina.

Las compañías interesadas en incursionar dentro de la cadena de suministro requieren diseñar *procesos de negocio* que cumplan las nuevas funciones que demanda el mercado de aviación. Los *procesos de negocio* son actualmente las operaciones de *valor* agregado a un mercado, es decir, son aquellas tareas ejecutadas de manera lógica para producir, distribuir y comercializar un producto o servicio.

Actualmente el diseño clásico de procesos químicos desarrolla la síntesis de procesos químicos a partir del asentamiento de un problema o una necesidad de mercado en una carta de proyecto. Con la información proporcionada por el grupo de comercialización, el equipo de diseño desarrolla un concepto de diseño y la síntesis del proceso usando diferentes métodos, como ejemplo está el método de la cebolla. Este diseño consta de varios niveles de complejidad hasta llegar al diseño detallado de equipos y servicios, implicando constantes iteraciones al surgir nuevas consideraciones de diseño. Cabe mencionar que la industria química ha alcanzado mejoras en el desempeño de los productos químicos, ha ahorrado tiempos del proceso productivo y ha minimizando el impacto al medio ambiente. Sin embargo, la rapidez del desarrollo de estos avances ha dejado mucho que desear por la ausencia de un método sistemático que permita mejoras confiables y que asegure el diseño de los procesos de negocios de la industria química hacia la sustentabilidad.

En 2003, Paul Anastas y Julie Zimmerman publicaron doce principios para la Ingeniería Verde (IV) conducidos hacia el diseño, comercialización y uso de procesos y productos; haciendo énfasis en la

aplicación de estos principios a la etapa de diseño. Estos principios están dirigidos al área técnica e inspirados en dos conceptos: (1) Inherencia y (2) Análisis de ciclo de vida (ACV).

Por otro lado, la industria de manufactura ha desarrollado herramientas para la mejora continua de los procesos productivos, como son: el ciclo Deming; Kaizen y el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar); herramientas que evolucionaron hasta crear metodologías de diseño de procesos de negocio orientados a satisfacer los requerimientos del mercado.

Las metodologías de diseño de nuevos *procesos de negocio*, DFSS (por sus siglas en inglés, Design for Six Sigma) y DFLSS (por sus siglas en inglés, Design for Lean Six Sigma), ofrecen a las empresas pasos sistemáticos para la inclusión de nuevos productos al mercado de forma efectiva y focalizan el diseño del *proceso de negocio* dentro del marco de trabajo de las principales corrientes económicas neoclásicas. Esto significa que las metodologías DFSS y DFLSS se usan para diseñar productos y servicios, asegurando los beneficios económicos por medio de la satisfacción de la demanda del mercado y ausentando el punto de vista ecológico.

En este trabajo se propone que la integración de metodologías clásicas de diseño de procesos químicos, ingeniería verde y DFLSS permite crear una metodología de *Diseño para la Sustentabilidad (DPS)* en negocios que desean tener una economía circular.

Por lo tanto, para crear una metodología DPS que ofrezca a directores ejecutivos un panorama global de la vida de un proyecto de diseño de *procesos de negocio sustentables*, las tareas son:

- Proponer el concepto del *valor* para creación de los *procesos de negocio* dentro de las tres perspectivas de la sustentabilidad: social, económica y ambiental.
- Integrar las metodologías de diseño de procesos químicos, los doce principios de IV y el DFLSS para crear los pasos sistemáticos del DPS.
- Analizar el proyecto para la producción de bioturbosina en México usando el primer paso del DFS.
- Comparar el DPS contra otras metodologías de diseño para la sustentabilidad.

Los alcances esperados en la aplicación del DPS son contribuir en la disminución de la contaminación ambiental, prevenir efectos nocivos para la salud del ser humano, fomentar la creación de empleos de alta moral y calidad operativa, reducir los gastos directos e indirectos del negocio, generar mayores alternativas de mercado de valor agregado a la sociedad. Permitir a las compañías diseñar los *procesos del negocio* internos para asegurar elevados márgenes de utilidad en las dos modalidades de producto/ servicio: especialidad y *commodity* (termino en inglés).

## CAPÍTULO I · GENERALIDADES

---

Las problemáticas ambientales originadas por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) impulsan y dan la oportunidad de desarrollar tecnologías alternativas sustentables. Una opción es el uso de combustibles de aviación renovables, cuya tecnología se encuentra en una etapa incipiente. Sin embargo, todos los aspectos de mejora de tecnología, desarrollo de materias primas, iniciativas políticas, eficiencia de plantas productivas, el compromiso social y ambiental están mejorando rápidamente.

En este capítulo se presenta el panorama global de la turbosina y su proyección comercial.

### 1.1 ¿Qué es la turbosina?

Es el combustible requerido para motores de aviación que debe estar normalmente compuesto por una mezcla compleja de hidrocarburos en cadenas distribuidas en el intervalo de C<sub>9</sub>-C<sub>16</sub>, correspondiente al intervalo de ebullición de ca. 110 a 300°C, con al menos un 85% vol. de C<sub>10</sub> a C<sub>14</sub> (ca. 174 a 254°C) [6]. Esta mezcla constituye el primer corte de una columna de destilación atmosférica en una refinería, denominado turbosina y en algunas plantas como nafta pesada.

La turbosina contiene parafinas, naftenos, aromáticos y trazas de olefinas, siendo deseable un mayor contenido de isoparafinas. De acuerdo a esta proporción de hidrocarburos y del valor de otras propiedades de la mezcla líquida, serán su funcionalidad a las condiciones de vuelo y su desempeño en el motor, lo que definirá finalmente su calidad.

Para comprender la importancia de las especificaciones de la calidad de la turbosina es necesario comprender la función de ésta dentro del motor de aviación.

#### 1.1.1 Funcionamiento general del motor de aviación

El avión equipado con motor a turbina de combustión interna basa su principio de funcionamiento en la tercera ley de Newton: "para toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria". La turbina jet es un mecanismo de reacción que ejerce presión (fuerza), en una dirección y se mueve en la contraria.

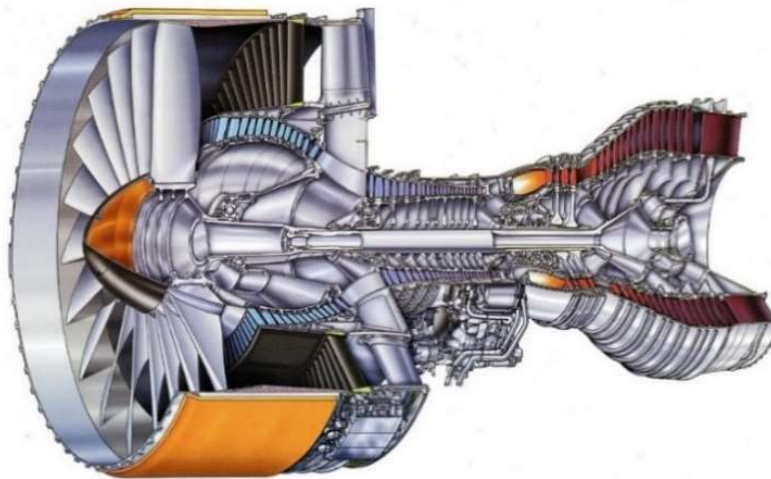
Durante el vuelo, el aire se agolpa en la boca del motor, ver figura 1, a una velocidad de 800 km/h. Una vez en la entrada, el aire es succionado por un compresor, formado por varias hileras de aspas. Estas aspas empujan el aire hacia el interior del motor, comprimiéndolo y aumentando su temperatura.

Una vez comprimido, el aire caliente llega a la cámara de combustión, en cuyo interior se inyecta combustible (turbosina) que, al haber superado su temperatura de inflamación (ca 38°C a NPT), entra en combustión con el oxígeno del aire. Para que la turbosina comience a arder no basta que esté gasificada, ni que sus vapores tengan una temperatura igual o superior a la de su temperatura de ignición, se requiere además que esté mezclada en una proporción adecuada con el oxígeno del aire.

El calor generado por la combustión aumenta la presión dentro de la cámara de combustión, de modo que los gases producidos tienden a expandirse saliendo por la parte trasera de la cámara de combustión. A medida que sale de la cámara de combustión, el gas pierde presión, pero gana velocidad, de modo que, al salir por la parte posterior del turboreactor, la velocidad del aire es mucho mayor que la que tenía al llegar al motor.

En su camino de salida el gas pasa a través de una serie de turbinas, cuyas aspas giran impulsadas por la corriente de aire caliente que escapa del motor. El giro de la turbina de salida es transmitido a través de un eje a los compresores situados en la parte delantera del motor.

Visto el proceso de modo global, el motor hace que el aire salga de su interior a una velocidad muy superior a la que tenía cuando entró. Para que el aire gane velocidad, el motor ha tenido que ejercer una fuerza sobre dicho aire, empujándolo hacia atrás. Pero, según el principio de acción y reacción, siempre que se aplica una fuerza sobre un cuerpo, dicho cuerpo responde con una fuerza igual, pero de sentido opuesto. En resumen, el turboreactor empuja el aire hacia atrás y el aire, como respuesta, empuja al motor hacia delante, para impulsar el movimiento del avión.



**Figura 1. Motor turbofan comercial, adaptado de ref. [4].**

Prácticamente todos los motores de turbina de aviones modernos son los motores *Turbofan* (planta motriz turbo-ventilante). En estos, los gases generados por la turbina son empleados mayoritariamente en accionar un ventilador (fan) situado en la parte frontal del sistema que produce la mayor parte del empuje, dejando para el chorro de gases de escape solo una parte del trabajo (aproximadamente el 30%). Estos motores comenzaron a usar el sistema de flujo axial, que mantiene la corriente de aire comprimido presionada hacia el eje de la turbina, por lo que el aire sale propulsado con mayor velocidad y con menos tendencia a dispersarse de la corriente de salida. Esto incrementa notablemente la eficiencia.

Otro gran avance del Turbofan fue la introducción del sistema de doble flujo en el cual, el ventilador frontal es mucho más grande ya que permite que una corriente de aire circule a alta velocidad por las paredes internas del motor, sin ser comprimido o calentado por los componentes internos. Esto permite que este aire se mantenga frío y avance a una velocidad relativamente igual al aire caliente del interior, haciendo que cuando los dos flujos se encuentren en la tobera de escape, formen un

torrente que amplifica la magnitud del flujo de salida y a la vez lo convierte en un flujo más estrecho, aumentando la velocidad total del aire de salida.

## 1.2 Propiedades de desempeño

En el estudio de las necesidades y requerimientos de diseño de una aeronave, el combustible a usar juega un papel muy importante. La correcta funcionalidad de este ahora depende de cumplir una serie de propiedades, que deberán ser especificadas y controladas. Aquí se describen las propiedades de la turbosina a fin de detallar su importancia para su óptima funcionalidad [7]:

**Contenido de energía.** Es la cantidad de calor liberada al quemarse una cantidad específica de combustible, también llamado **calor de combustión**. La cantidad de calor liberado depende de si el agua formada durante la combustión permanece en la fase de vapor (calor neto de combustión) o se condensa a la fase líquida cediendo su calor de vaporización en el proceso (calor bruto).

El contenido de energía es diferente para cada componente individual de la turbosina debido a la diferencia de componentes existentes en la turbosina, ya que cada uno tendrá diferente peso molecular.

**Características de la combustión.** La combustión en motores de avión se lleva de forma continua, que a diferencia de una combustión intermitente (de pistón), genera tempranamente pequeñas partículas carbonosas. Estas partículas a medida que pasan a través de la llama y se consumen por completo bajo condiciones adecuadas. Si estas partículas carbonosas no son completamente consumidas por la llama pueden ser nocivas a las palas y turbinas de estatores, causando erosiones. Además de poder generar taponamientos en el flujo del carburante.

Combustibles con alto contenido de compuestos aromáticos y naftenos forman con mayor frecuencia las partículas carbonosas indeseadas. Desde conocer los peligros generados a la formación de estas partículas carbonosas, el contenido de estos compuestos es controlado a fin de evitar los riesgos.

**Estabilidad.** Es la propiedad que posee el combustible de permanecer sin cambios, siendo dos factores ruidos los perjudiciales a la estabilidad del combustible: tiempo (estabilidad de almacenamiento) y elevadas temperaturas en el motor (estabilidad térmica).

**Lubricidad.** Lubricidad es la capacidad de reducir la fricción entre superficies sólidas en movimiento. Para los motores de aviación es importante que el combustible contenga un grado de lubricidad para lubricar algunas partes en movimiento en bombas y controles.

**Fluidez.** Es definido por la capacidad del combustible a fluir, como propiedades físicas que evalúan esta propiedad son: la viscosidad y punto de congelamiento.

La viscosidad del fluido juega un papel importante en el proceso de combustión dentro del motor de una turbina. La turbosina es inyectada a elevadas presiones a través de unas boquillas produciendo una dispersión fina de gotas de combustible que se evaporan formando una mezcla con el aire. La dispersión fina y el tamaño de las gotas de combustible están influenciados por la viscosidad. Por consecuencia la viscosidad afecta directamente la presión de inyección.

El punto de congelamiento es definido como la temperatura a la que la turbosina comienza a solidificarse, esto lo convierte en un criterio para el rendimiento de bombeo (habilidad para mover

el combustible de un tanque contenedor al motor). La industria usa la temperatura de congelamiento como un indicador de la temperatura mínima de bombeo.

**Volatilidad.** Es la tendencia del combustible a vaporizarse. Esta propiedad puede caracterizarse con dos medidas: Presión de vapor y la curva de destilación.

**Corrosión.** Los componentes corrosivos en la turbosina son ácidos orgánicos y mercaptanos. La presencia de estos es un factor de riesgo en las etapas que implican el uso de estos combustibles, desde su almacenamiento hasta su combustión.

### 1.3 Especificaciones de la turbosina

Las especificaciones de un producto son los atributos por los que los productores y usuarios identifican y controlan las propiedades necesarias para la satisfacción y confiabilidad del desempeño de la turbosina. La Asociación Internacional de transporte Aéreo (IATA, por sus siglas en inglés International Air Transport Association) publicó en 2012 material guía para las especificaciones de combustibles de turbinas de avión, conteniendo especificaciones para cuatro tipos de turbosinas: tres tipos de turbosinas (Jet A, Jet A-1 y TS-1); y un corte Jet B, ver tabla 1 [7].

**Tabla 1. Especificaciones de las propiedades de turbosinas [7, 8].**

Propiedad	Jet A	Jet A-1	TS-1	Jet B
Especificación	ASTM D 1655	DEF STAN 91-91	GOST 10227	CGSB-3.22
Acidez, mg KOH/g	0.10	0.015	0.7 (mg KOH/100 ml)	0.10
Aromáticos, % volumen, máx.	25	25.0	22 (%masa)	25
Azufre, % masa	0.30	0.3	0.25	0.40
Azufre, Mercaptanos, %masa	0.003	0.003	0.005	0.003
Destilación, °C				
Punto de ebullición inicial	-	Reportar	150	Reportar
10% Destilado, máx.	205	205	165	min 125; máx
50% Destilado, máx.	Reportar	Reportar	195	190
90 % Destilado, máx.	Reportar	Reportar	230	Reportar
Temperatura Final	300	300	150	270
Presión de Vapor, kPa, máx.	-	-	-	21
Temperatura de inflamabilidad, °C, mín.	38	38	28	-
Densidad, 15°C, Kg/m <sup>3</sup>	775-840	775-840	Mín. 774@20°C	750-801
Temperatura de congelamiento, °C, máx.	-40	-47.0	-50	-51
Viscosidad, -20°C, mm <sup>2</sup> /seg, máx.	8	8.0	8.0 @ -40°C	-
Calor Neto de Combustión, MJ/kg, mín.	42.8	42.8	42.9	42.8
Punto de humo, mm, mín.	18	19.0	25	20
Naftalenos, %volumen, máximo	3.0	3.0	-	3.0
Corrosión de cobre, 2 hrs @ 100°C, rango máx.	No.1	No.1	Pasa (3 hrs @ 100 °C)	No.1
Estabilidad Térmica				
-Caída de presión del filtro, mmHg, máx.	25	25	-	25
-Depósitos en tubo precalentador, máx.	<3	<3	-	<3
-Prueba de estática 4 hr @150°C, mg/100 ml, máx.	-	-	18	-
Contenido de gomas, mg/100 ml, máx.	7	7	5	-



La norma **ASTM D1655-Standard Specification for Aviation Turbine Fuels**, desarrollada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés American Society for Testing and Materials), solo es aplicable a turbinas provenientes del crudo de petróleo, describe dos tipos de turbosina: Jet A y Jet A-1, siendo estas las más comerciales en la aviación de EUA y en México. Esta misma norma cubre a su vez el corte de combustible Jet B que es previo al D 1655.

El Reino Unido mantiene la especificación DEF STAN 91-91 para la turbosina Jet A-1, la cual es mayormente usada para la aviación civil fuera de EUA y la Comunidad de Estados Independientes (CEI). Teniendo mínimas diferencias con respecto a la ASTM D1655.

La especificación rusa (GOST-10227) cubre un combustible de turbosina ligera, TS-1, que es usada en la CEI y partes del este de Europa.

Canadá emplea la especificación CGSB-3.22, que aplica dos tipos de combustible de aviación, el grado JET B es el normalmente usado en operaciones de aviación civil [7, 9].

Adicional a las especificaciones expuestas en la tabla 1.1, existen algunas especificaciones de elevada consideración en el mercado de aviación civil como son: DCSEA 134/A (Francia); NTC (Colombia); GB6537-94 (China); QAV-1 (Brasil); JFSC Issue 16 (Japón) y COVENIN-1023 (Venezuela) [9, 10].

La norma mexicana NOM-EM-005-CRE-2015 contiene las especificaciones de turbosina en México aplicable al grado Jet A-1. Las especificaciones se muestran en el anexo 1, así como los métodos de prueba para la evaluación de cada propiedad de desempeño, referidos a los estándares de prueba ASTM [6].

## **1.4 Producción de turbosina**

La variabilidad de los procesos para la producción de combustible depende principalmente de la materia prima a emplear. Se exponen aquí diferentes procesos existentes para la producción de combustible de aviación:

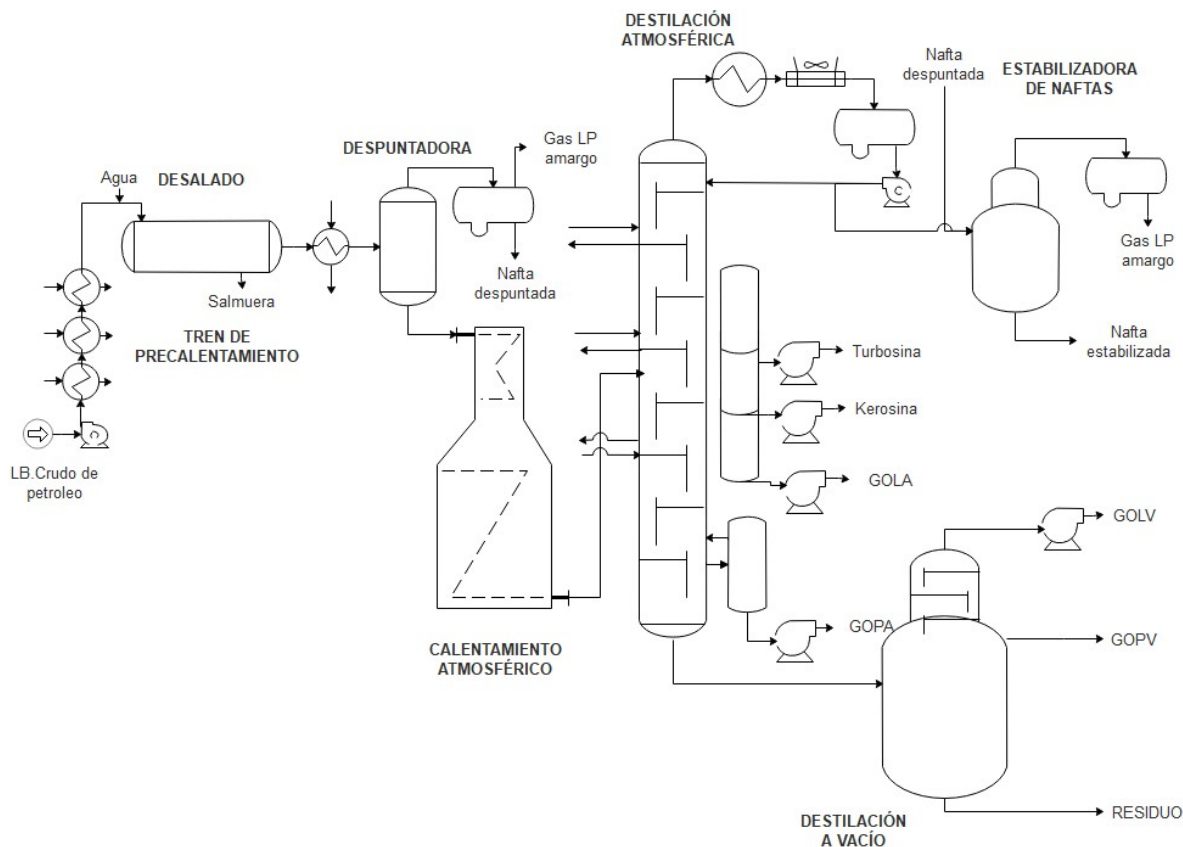
### **1.4.1 Proceso convencional.**

El proceso actual para la producción de turbosina emplea como base el petróleo. La producción de la turbosina dentro del proceso de refinación consta mayormente de dos etapas: la sección primaria de destilación y la sección de hidrot ratamiento de destilados intermedios.

#### **i. Sección Primaria de destilación.**

En este primer proceso de la refinación del petróleo se hace la separación de componentes del crudo en fracciones según sus puntos de ebullición y consta de las siguientes etapas: desalado, tren de precalentamiento, despunte de crudo, calentamiento atmosférico, destilación atmosférica, estabilizadora de nafta y destilación a vacío [11], ver figura 2.

*Tren de precalentamiento.* Se obtiene el crudo de los tanques de almacenamiento para ser transportado al proceso de desalado pasando por un tren de precalentamiento. Se bombea el crudo desde una temperatura de 20°C y eleva su temperatura a 130-140°C por precalentamiento con los reflujos calientes de la columna de destilación primaria y vapor de agua.



**Figura 2. Sección primaria de refinación de petróleo, modificado de [9].**

**Despunte de crudo.** La despuntadora es donde se efectúa la primera separación de hidrocarburos ligeros (metano, etano y gas LP mayormente), y ácido sulfhídrico de la operación. Esto permite reducir la presión de vapor de la nafta primaria, reducir la presión manométrica en equipos y tuberías del proceso, prevenir la corrosión y evitar la desactivación de catalizadores en posteriores procesos por envenenamiento con azufre. Esta etapa es considerada necesaria cuando el contenido de hidrocarburos ligeros en el crudo es elevado, esto es porque la presencia de estos compuestos ligeros generaría una elevada presión en la corriente de hidrocarburos a destilar implicando riesgos de operación. La temperatura de esta columna se controla con el reflujo de nafta primaria obtenida del domo de la columna atmosférica.

**Desalado.** Se realiza una mezcla con agua del 4 al 6% en volumen de crudo para fines de extracción de sales, en lo que en conjunto se denomina salmuera, conteniendo cloruro de sodio, magnesio, calcio y hierro, en presencia de un campo eléctrico y agregando un desemulsificante químico para reducir la tensión superficial y romper la emulsión.

**Calentamiento atmosférico.** El crudo, después de ser despuntado prosigue su trayecto por intercambiadores de calor que anteceden al horno, para elevar su temperatura, a 243°C aproximadamente. Posteriormente ingresa al horno de fuego directo donde alcanza una temperatura máxima de 375°C, logrando su vaporización en los ductos.

*Destilación atmosférica.* La mezcla líquido vapor proveniente del horno a fuego directo entra a la torre atmosférica, a la que también se alimenta vapor de agua sobrecalentado que ayuda a disminuir la presión parcial de los hidrocarburos y mantiene la presión y temperatura en la zona de vaporización de la torre.

Del plato de alimentación hacia abajo se denomina zona de agotamiento y del plato de alimentación hacia arriba es la zona de rectificación. La transferencia de masa, y por tanto el enriquecimiento correspondiente, entre las fases líquidas y vapor se promueve por la alimentación de reflujos fríos líquido en la zona de rectificación, por el vapor alimentado en la zona de agotamiento y por los platos o empaques de la columna. En la columna de destilación atmosférica el crudo se fracciona en los diferentes productos: nafta ligera, turbosina, querosina, gasóleo ligero atmosférico (GOLA), gasóleo pesado atmosférico (GOPA) y residuo atmosférico. Las corrientes laterales de la columna intercambian calor con el crudo en el tren de precalentamiento y regresan a la torre de destilación primaria para generar un efecto de rectificación sobre los vapores de hidrocarburos. La nafta primaria se obtiene por el domo, y el primer corte lateral es nafta pesada o turbosina, la cual pasa a un proceso de hidrot ratamiento.

*Estabilizadora de nafta.* La nafta obtenida de la destilación atmosférica y la nafta despuntada ingresan a la estabilizadora de naftas. La unidad de ligeros consta de una columna de destilación que separa por la cabeza hidrocarburos C1-C4 (gases) y por el fondo C5+ (nafta) que se manda a almacenamiento como nafta estabilizada.

*Destilación al vacío.* Esta etapa es una destilación a presión reducida que promueve la separación de los compuestos pesados del crudo sin generar un craqueo térmico. En este proceso se obtiene gasóleo ligero de vacío (GOLV), gasóleo pesados de vacío (GOLV) y residuos de vacío. Los primeros dos pasan al proceso de hidrot ratamiento de gasóleo y el residuo de vacío pasa al proceso HDR, o bien, al proceso de viscoreducción [11, 12].

## **ii. Hidrot ratamiento de destilados intermedios.**

El proceso de hidrot ratamiento es el proceso de refinación catalítica en el que se ocupa un catalizador selectivo, comúnmente  $\text{CoMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) para eliminar los compuestos de azufre, nitrógeno y oxígeno, así como la saturación de compuestos olefínicos contenidos en la turbosina. Esto se logra modificando la estructura de estos compuestos heteroatómicos, y haciéndolos más sencillo de separar.

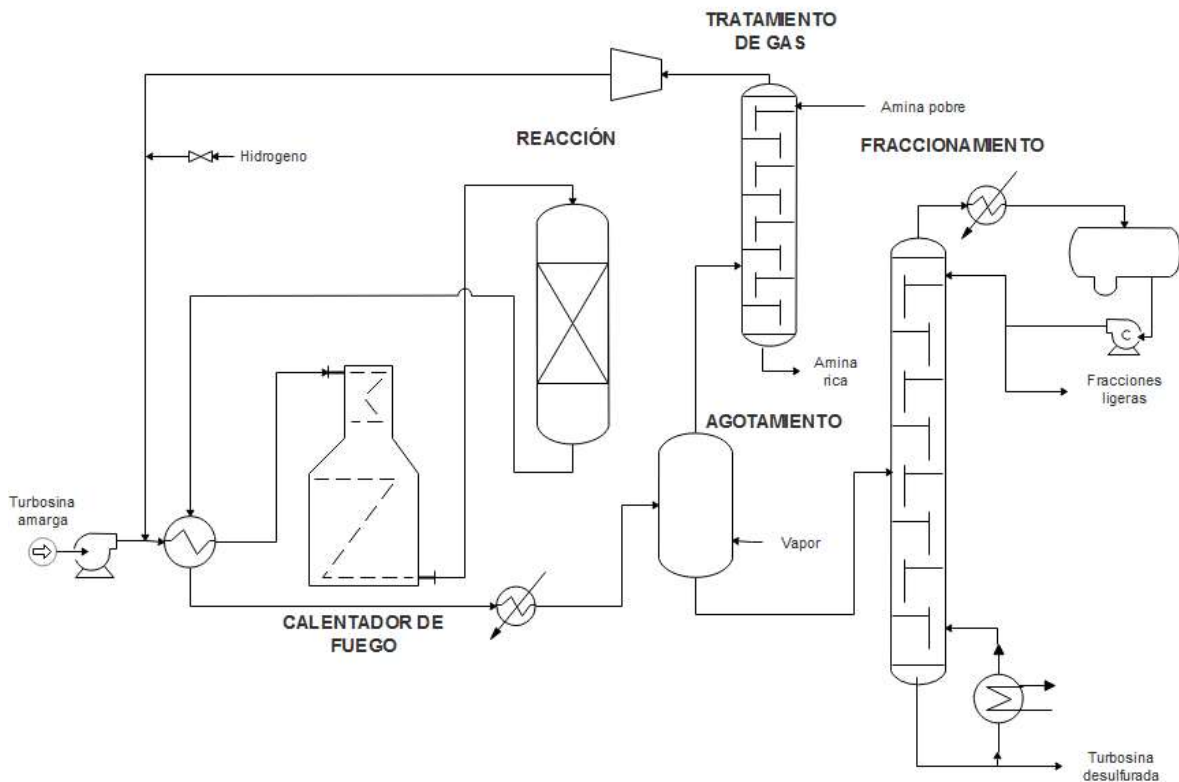
Todo esto se lleva a cabo en tres secciones, ver figura 3, que son: Reacción, agotamiento y fraccionamiento.

*Reacción.* La carga de destilado intermedio proveniente de la destilación primaria de la del crudo se mezcla con una corriente de  $\text{H}_2$ , proveniente de la planta reformadora de naftas, y pasa a través de un tren de precalentamiento donde se aprovecha el calor del efluente del reactor. Posteriormente continua su calentamiento al pasar por un calentador de fuego directo hasta alcanzar la temperatura de reacción. La mezcla caliente entra por la parte superior del reactor fluyendo hacia abajo, y pasando por la cama fija de catalizador. En esta sección del reactor se efectúan las reacciones de hidrot ratamiento.

El efluente del reactor se enfría, cediendo calor a la carga del tren de precalentamiento y pasa al separador de alta presión donde el hidrogeno sin reaccionar se separa por el domo y el producto por el fondo. El hidrógeno se recircula a la carga y el líquido (producto) se envía a la sección de agotamiento [13].

*Agotamiento.* En el proceso se emplea vapor de alta presión para efectuar a contracorriente el arrastre de compuestos ligeros, producto de las reacciones de hidrotratamiento, estos gases se envían a la planta tratadora de gas. El fondo del agotador es producto que se envía a la torre de fraccionamiento.

*Fraccionamiento.* El fondo del agotador se calienta antes de entrar a la torre de fraccionamiento donde la fase líquida se rectifica (enriquece) separándola de las fracciones ligeras generadas por el hidrocraqueo que se presenta en el reactor de hidrotratamiento. El producto líquido se envía a la planta de oxidación de mercaptanos, donde con base en un catalizador de ftalocianina de cobalto, se reduce la concentración de azufre, y finalmente puede etiquetarse y almacenarse como turbosina [14].



**Figura 3. Proceso típico de hidrotratamiento de destilados intermedios aplicado a turbosina, modificado de [14]**

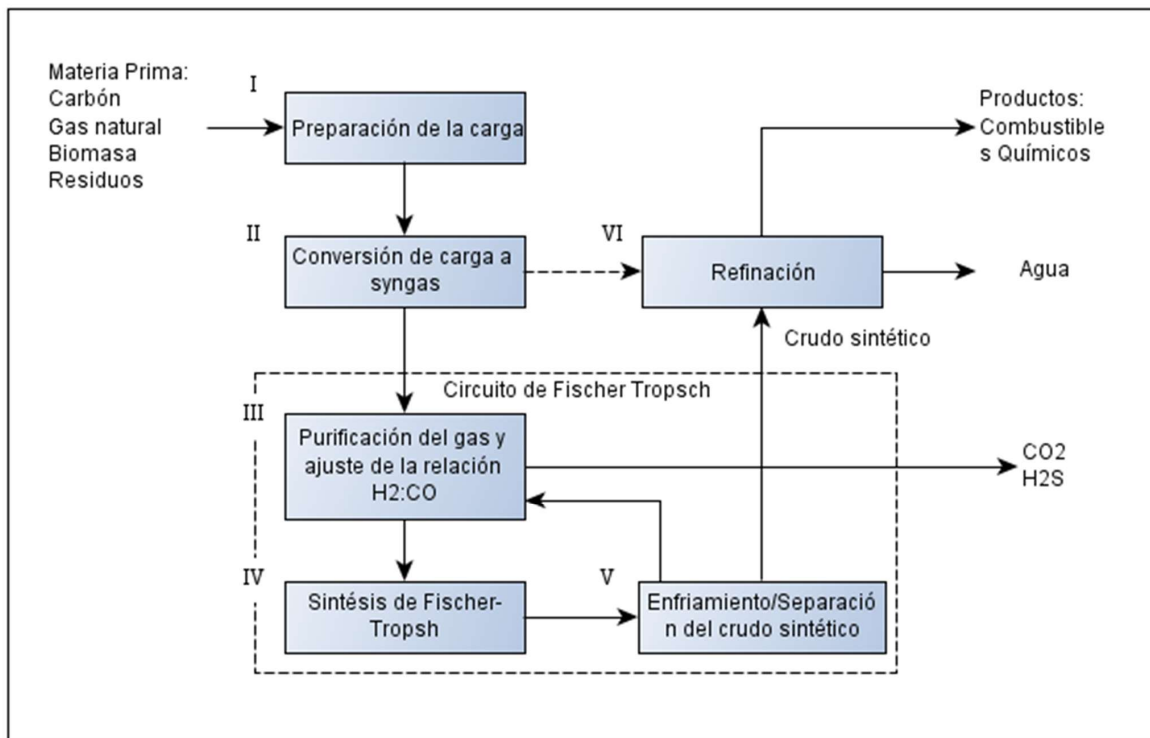
### 1.4.2 Procesos alternativos

Además de la manufactura tradicional del petróleo, un porcentaje relativamente pequeño de los combustibles es obtenido de materias primas alternativas, como los obtenidos de arenas

petrolíferas, gas de lutitas y biomasa. Abriendo paso a rutas de procesamiento no convencionales [15].

### i. Proceso sintético de Fischer-Tropsch (F-T)

Identificado como la llave tecnológica para la conversión de gas sintético (syngas) a combustibles y otros compuestos, en el proceso de Fischer Tropsch (F-T), los gases: monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>) reaccionan para producir mayormente un abanico de compuestos parafínicos (gases, destilados intermedios y ceras). Los compuestos parafínicos formados pueden ser hidrodesintegrados o refinados para obtener gasolina, turbosina y diesel [15].



**Figura 4. Simplificación del proceso F-T, adaptado de [15].**

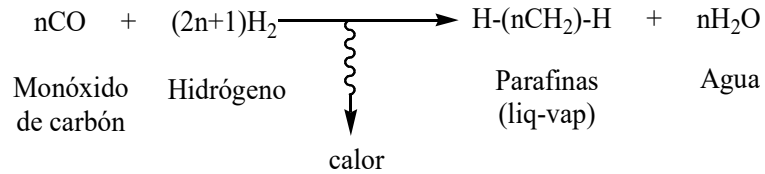
Una vista general del proceso sintético de F-T es descrito en la figura 4, que consta de 6 etapas principales:

- I. Es la preparación de la materia prima por el método requerido por el tipo de materia: carbón, gas natural, biomasa o desechos.
- II. Es la producción de gas de síntesis que es una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. El gas de síntesis se puede obtener de la gasificación de: carbón, proceso carbón a líquido (CTL, por sus siglas en inglés Coal to Liquid); gas natural, proceso gas a líquido (GTL,

por sus siglas en inglés Gas to Liquid) y biomasa, proceso biomasa a líquido (BTL, por sus siglas en inglés Biomass to Liquid).

III. Consiste en remover los componentes indeseables del gas de síntesis tal como el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S.

IV. En esta etapa ocurren las reacciones de Fischer-Tropsch (F-T) que obedecen la siguiente fórmula genérica:



V. Consiste en la separación del gas sintético que no reaccionó del aceite sintético (syncrude), para su retorno al proceso de síntesis de F-T.

VI. El aceite sintético producido pasa a la etapa de separación de componentes siguiendo el proceso clásico de refinación [15-17]

### 1. Proceso CTL (Coal to Liquids)

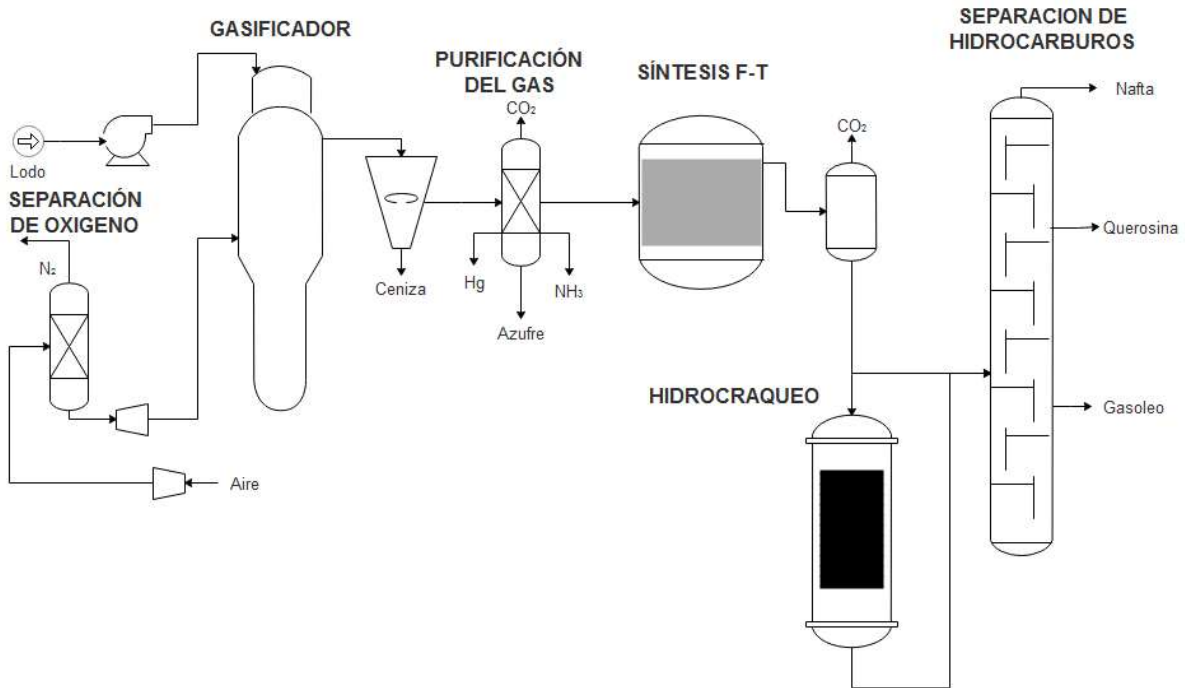


Figura 5. Proceso CTL, modificado de [18].

La producción de combustibles líquidos a partir de carbón mediante el proceso indirecto CTL obedece al diagrama de proceso que se observa en la figura 5.

Primeramente, se pulveriza el carbón en polvo fino y se mezcla con agua para formar un lodo. El lodo se alimenta a un gasificador que reacciona con oxígeno a temperaturas aproximadas a 1500°C. Lo que ocurre es una oxidación parcial del carbón obteniendo un gas de síntesis contaminado (syngas) compuesto de:  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O_{vap}$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $COS$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $HCN$  y escoria.

Los contaminantes deben ser removidos en la etapa de purificación. En esta etapa la escoria se elimina mediante el uso de ciclones y filtros cerámicos separándose del syngas que se recalienta y pasará a través de un reactor de hidrólisis de  $COS$  y  $HCN$  para formar  $H_2S$ . Seguido se enfriará para eliminar el agua y  $NH_3$ . El  $H_2S$  se elimina por enfriamiento y por arrastre de vapor para ser llevado a la planta del proceso Claus para su recuperación como azufre elemental.

El syngas limpio se envía al reactor de F-T para producir el crudo sintético (syncrude), el syngas que no reacciona se recircula para maximizar la producción. De dicho reactor salen dos corrientes: una líquida que es enviada al proceso de separación y otra gaseosa donde es removido el  $CO_2$ .

Al igual que una refinería de petróleo, el efluente líquido es enviado a separación mediante destilación en diferentes compuestos: naftas, destilados intermedios y ceras. Dentro de los destilados intermedios se obtiene la turbosina que podrá ser empleada como combustible de aeronaves [15, 18, 19].

## 2. Proceso GTL (Gas to Liquids)

El concepto del proceso GTL es convertir químicamente el gas a hidrocarburos de cadena más larga que permitan su transporte como combustibles líquidos: destilados intermedios y lubricantes.

El gas natural puede ser transformado en productos líquidos por licuefacción indirecta. En este se distinguen tres etapas fundamentales: producción del syngas, reacción de F-T y refinación del crudo sintético.

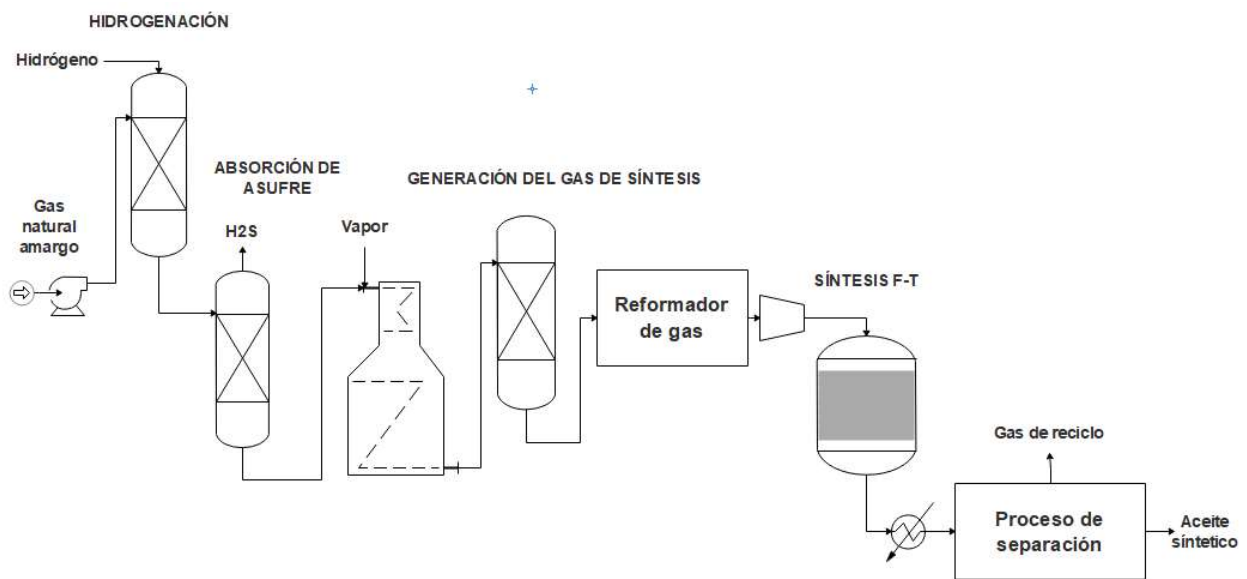


Figura 6. Proceso GTL, modificado de [20]

La figura 6 muestra el diagrama del proceso GTL, donde inicialmente se alimenta el gas natural junto con una corriente de H<sub>2</sub> a un reactor empacado de un catalizador bifuncional (NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ó CoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) donde se desulfura el gas natural, ya que el azufre es un contaminante del catalizador usado para la reformación. El azufre es separado posteriormente del gas sintético como H<sub>2</sub>S.

El gas natural limpio pasa a la etapa de reformación para producir CO y H<sub>2</sub> que es el syngas. Las principales tecnologías empleadas para la producción del gas sintético a partir del gas natural son: oxidación parcial (POX), reformación catalítica de metano con vapor (SMR), reformación de dos pasos, reformación auto-térmica (ATR) y reformación por intercambio de calor.

El syngas producido pasa a la etapa de síntesis por F-T, esta puede ser de dos tipos: a baja temperatura y temperatura elevada. La primera emplea Fe o Co como catalizador en cama catalítica fija o dos reactores en configuración con lechos en suspensión. El reactor opera a 220-240°C y 2.0-2.5 MPa a una conversión de 60% con recirculación o en arreglo de reactores en serie, limitado por la desactivación del catalizador. En la segunda la síntesis de F-T a temperatura elevada emplea un catalizador de Fe en reactores de lecho fluidizado teniendo una operación típica de alrededor de 320°C y 2.5 MPa con conversiones superiores al 85%.

El producto obtenido de la síntesis de F-T es el aceite sintético que puede ser procesado como la refinación clásica del petróleo, el destilado que oscila entre C<sub>9</sub>-C<sub>16</sub> se usa como combustible de aviación [15, 20].

### 3. Proceso BTL (Biomass to Liquids)

La biomasa puede ser definida como el conjunto de material orgánico renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de ésta [21]. Los recursos de la biomasa cubren materia orgánica de origen vegetal o animal, mayormente está integrada por una mezcla de hemicelulosa, celulosa y lignina (componentes estructurales) acompañada con otras sustancias. Comprende residuos forestales y agrícolas, subproductos orgánicos, cosechas energéticas, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, lodos de sistemas de tratamiento de efluentes líquidos.

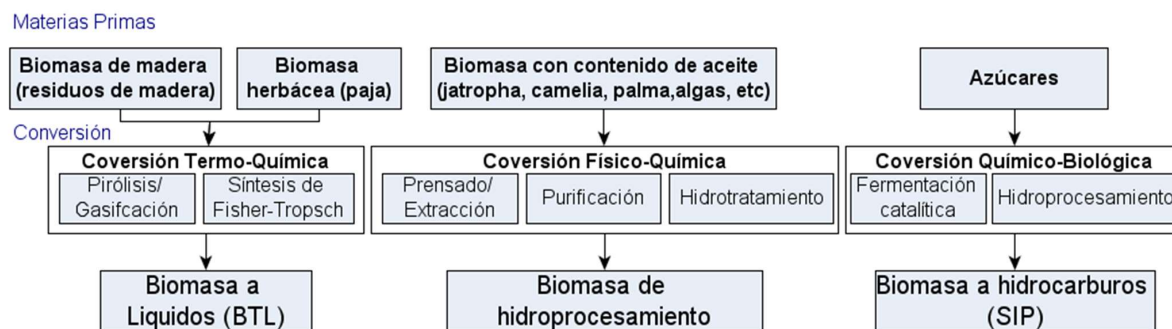


Figura 7. Opciones actuales para la producción de bioturbosina [22, 23]



La biomasa puede ser convertida a bioturbosina por conversión biológica, física y térmica, ver figura 7. Estos procesos comprenden pirolisis, gasificación, digestión anaeróbica, destilación, fermentación etc. La pirolisis y gasificación anteceden a la síntesis de F-T que se coloca como una de las mejores alternativas para la producción de bioturbosina.

Pirolisis es la descomposición térmica directa de los componentes orgánicos en ausencia de oxígeno. Como entrada al reactor de pirolisis cualquier alimentación seca y granulada puede ser aceptable. Los productos del proceso de pirolisis son mayormente volátiles y en menor contenido compuestos líquidos, carbón y cenizas. Las condiciones del proceso de pirolisis que favorecen la producción de compuestos líquidos dependen de la temperatura, tiempo de residencia, y otros parámetros de reacción.

La gasificación es el proceso termo-químico que forma gas de síntesis de los productos reaccionados en el proceso de pirolisis con un agente oxidante comúnmente oxígeno o aire. Si el gas de síntesis se produce con oxígeno y vapor de agua se disminuye la cantidad de nitrógeno en el gas resultante mejorando su poder calorífico. Después de su purificación se puede transformar en combustible líquido mediante procesos catalítico como el método Fischer- Tropsch.

La integración de la biomasa al proceso Fischer-Tropsch tiene como problema la purificación del gas de síntesis. Por eso, el medio de obtención del gas de síntesis es muy importante para reducir al máximo la etapa de purificación.

Cabe mencionar que la etapa más crítica durante la síntesis Fischer-Tropsch es la limpieza del biogás que se obtiene a partir de la biomasa. Debido a las partículas sólidas y alquitranes que poseen los gases procedentes de la gasificación, hay que llevar a cabo la limpieza de los mismos eliminándolo por separado, antes de entrar en el proceso Fischer-Tropsch. Existen actualmente tres procesos para eliminar las impurezas del gas de síntesis.

Un sistema de limpieza por vía húmeda usa depuradores donde se recogen partículas sólidas y gases solubles como el amonio y el ácido clorhídrico. Un sistema alternativo es el de los filtros cerámicos y consiste en pasar el gas caliente (450-550°C) a través de poros del material filtrante, que retiene casi en su totalidad las partículas que lleva el gas. Otro sistema es el del craqueo térmico del gas mediante el aumento del tiempo de estancia del gas en el gasificador, por combustión parcial del gas o por contacto directo del gas con una superficie caliente. Este sistema emplea dolomita o catalizadores metálicos a temperaturas entre 800-900°C. Supone la eliminación del 99% de los alquitranes, por lo que se prevé un mayor desarrollo de este sistema a mediano plazo.

Como se ha visto antes, las etapas del proceso F-T no cambian a pesar de que la biomasa sea la materia prima del gas de síntesis. Los catalizadores, los reactores y las condiciones de temperatura (200-250°C) y presión (25-60 bar) son iguales para que se haga la polimerización. Los productos obtenidos son hidrocarburos ligeros (C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>), LPG (C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub>), nafta (C<sub>5</sub>-C<sub>11</sub>), diesel (C<sub>9</sub>-C<sub>20</sub>) y ceras (>C<sub>20</sub>). El amplio rango de productos finales depende de las condiciones del proceso y de los catalizadores [15, 17].

## **ii. Proceso de Hidrotratamiento**

El hidroprocesamiento de aceites vegetales y/o grasas animales es una de las alternativas más estudiadas en la conversión de biomasa a combustibles alternativos.

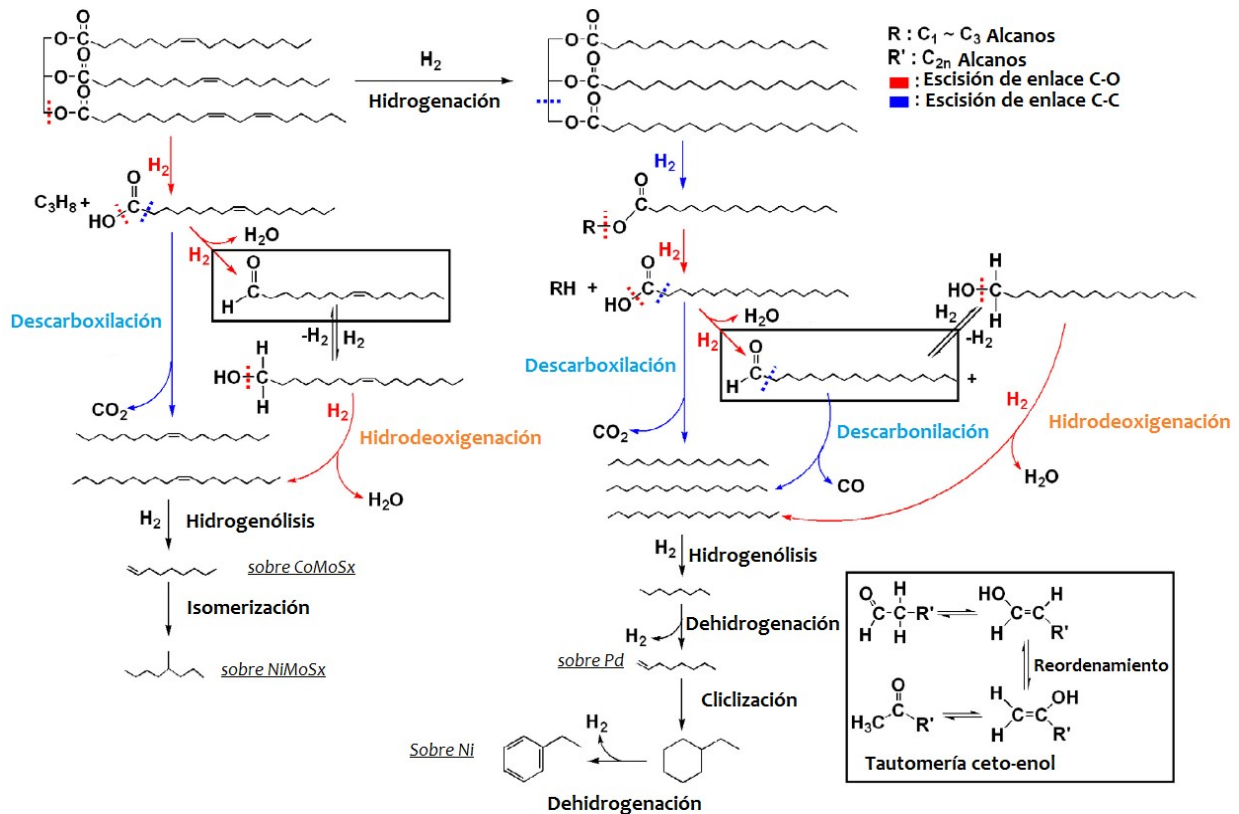
**Tabla 2. Composición típica de varios aceites vegetales [24]**

Fuente	Estructura	Peso molecular		Composición típica, %peso				
		Ácido graso	Triglicérido	Jatropha	Palma	Canola	Soja	Girasol
Cáprico	C10:0	172.3	554.8	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0
Láurico	C12:0	200.3	639.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mirístico	C14:0	228.4	723.2	0.0	2.5	0.1	0.0	0.0
Palmítico	C16:0	256.4	807.3	15.9	40.8	5.1	11.5	6.5
Palmitoleico	C16:1	254.4	801.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.2
Estearico	C18:0	284.5	891.5	6.9	3.6	2.1	4.0	5.8
Oleico	C18:1	282.5	885.4	41.1	45.2	57.9	24.5	27.0
Linoleico	C18:2	280.4	879.4	34.7	7.9	24.7	53.0	60.0
Linolénico	C18:3	278.4	873.3	0.3	0.0	7.9	7.0	0.2
Araquídico	C20:0	312.5	975.6	0.0	0.0	0.2	0.0	0.3
Eicosenoico	C20:1	310.5	696.6	0.2	0.0	1.0	0.0	0.0
Behénico	C22:0	340.6	1059.8	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
Erúcico	C22:1	338.6	1053.8	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
<b>PM Estimado:</b>				869.7	847.0	876.9	871.9	876.7

La materia prima proviene de recursos que no compiten con los destinados al sector alimenticio. Estos aceites vegetales son una mezcla de triglicéridos de cadenas de carbón largas de C<sub>10</sub>-C<sub>22</sub>. Los aceites vegetales tienen una composición que se describe comúnmente por su contenido de ácidos grasos como se muestra en la tabla 2 para aceites de palma, canola, jatropha, soja y girasol.

**Química del hidrotreamiento de aceites vegetales.** Para comenzar a desarrollar el diseño del proceso de hidrotreamiento de triglicéridos es esencial formular primeramente el modelo cinético que puede liderar el diseño del reactor y subsecuentemente su simulación y optimización. La figura 8 muestra el esquema de reacción general del hidrotreamiento de triglicéridos propuesta por Seok Ki Kim, en cuatro tipos de catalizador [25]. Los mecanismos de reacción ocurren en una serie de pasos consecutivos. La eliminación del oxígeno de los triglicéridos ocurre a través de diferentes reacciones como descarbonilación, descarboxilación e hidroxigenación. Los productos del hidrotreamiento de estos aceites serán parafinas lineales que requieren hidroisomerizarse para mejorar las propiedades de enfriamiento de los combustibles verdes. Esta reacción de hidroisomerización toma lugar sobre un catalizador bifuncional [24].

En los últimos años se han realizado intensas investigaciones referentes a la desoxigenación catalítica de hidrocarburos de triglicéridos usando diferentes catalizadores, muchos de estos se concentraron en el desarrollo de Co-Mo y Ni-Mo soportados en Y-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [24], sin embargo, todavía queda mucho que mejorar en las propiedades del catalizador para su optimización. Las consideraciones de mejora son las siguientes: alta actividad del catalizador hacia la desoxigenación, minimizar la formación de coque, resistencia al agua, capacidad de regeneración en un paso simple, alta tolerancia al envenenamiento por químicos y alta estabilidad en procesos comerciales.



**Figura 8. Diagrama general de mecanismos de reacción para el hidroprocesamiento de triglicéridos sobre cuatro tipos de catalizador [25].**

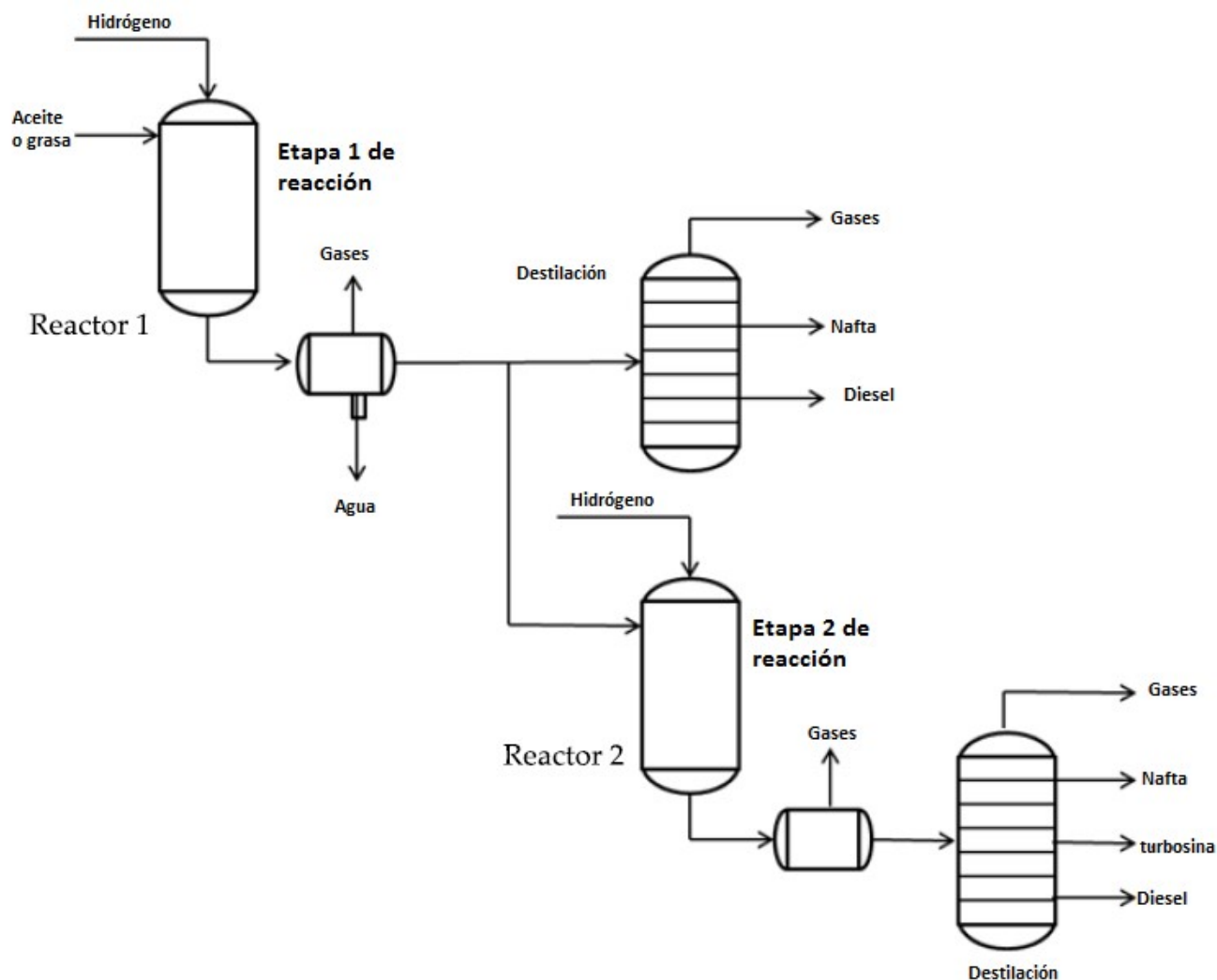
La hidroconversión de triglicéridos puede realizarse en tres rutas de procesamiento. La primera consiste en el hidroprocesamiento únicamente de los triglicéridos, la segunda en la adición de los triglicéridos a la alimentación del gasóleo de vacío para el proceso normal de refinación y la tercera es a partir del hidroprocesamiento de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés Fatty Acid Methyl Esters) [24, 26], aquí se explicarán las primeras dos:

### 1. Hidroprocesamiento de triglicéridos únicamente

El hidroproceso de triglicéridos que prosigue de la extracción del aceite de semillas consta de dos etapas: Primer paso de hidrotratamiento catalítico para producir parafinas y el segundo paso de isomerización y desintegración de las especies obtenidas, en la figura 9 se muestra el esquema del proceso en dos etapas.

En la primera etapa los triglicéridos y ácidos grasos son desoxygenados directamente a parafinas por reacciones de descarboxilación, descarboxilación e hidrodeoxigenación. Diferentes mecanismos han propuesto el orden de las reacciones que incluyen la producción de aldehídos, esterres, cetonas y alcoholes como intermediarios en esta etapa, figura 10 [25]. De la primera etapa se obtienen parafinas de cadenas de carbón de  $C_{15}$ - $C_{18}$ . Para producir combustible en el rango cadenas de carbón convencionales de la turbosina (mayormente  $C_8$ - $C_{15}$ ), se requiere de una segunda etapa de

hidroproceso enfocada en el craqueo e isomerización que ofrezca un elevado rendimiento de isoalcanos en el intervalo de ebullición de la turbosina [15].



*Figura 9. Representación esquemática del proceso de dos etapas para la obtención de nafta verde, bioturbosina y diesel verde [24].*

## 2. Hidroprocesamiento simultaneo de triglicéridos y gasóleo de petróleo.

Los aceites vegetales pueden ser mezclados directamente en el gasóleo de vacío para ser hidroprocesado en el tratamiento convencional de hidrotratamiento usado en las refinerías, esto con el objeto de reducir los costos de operación en la integración de esta nueva tecnología de producto. En la figura 10 se muestra la incorporación aceites vegetales en una proporción del 5% al 20% peso en el gasóleo de vacío (GOV) en el reactor típico de hidroprocesamiento en una refinería.

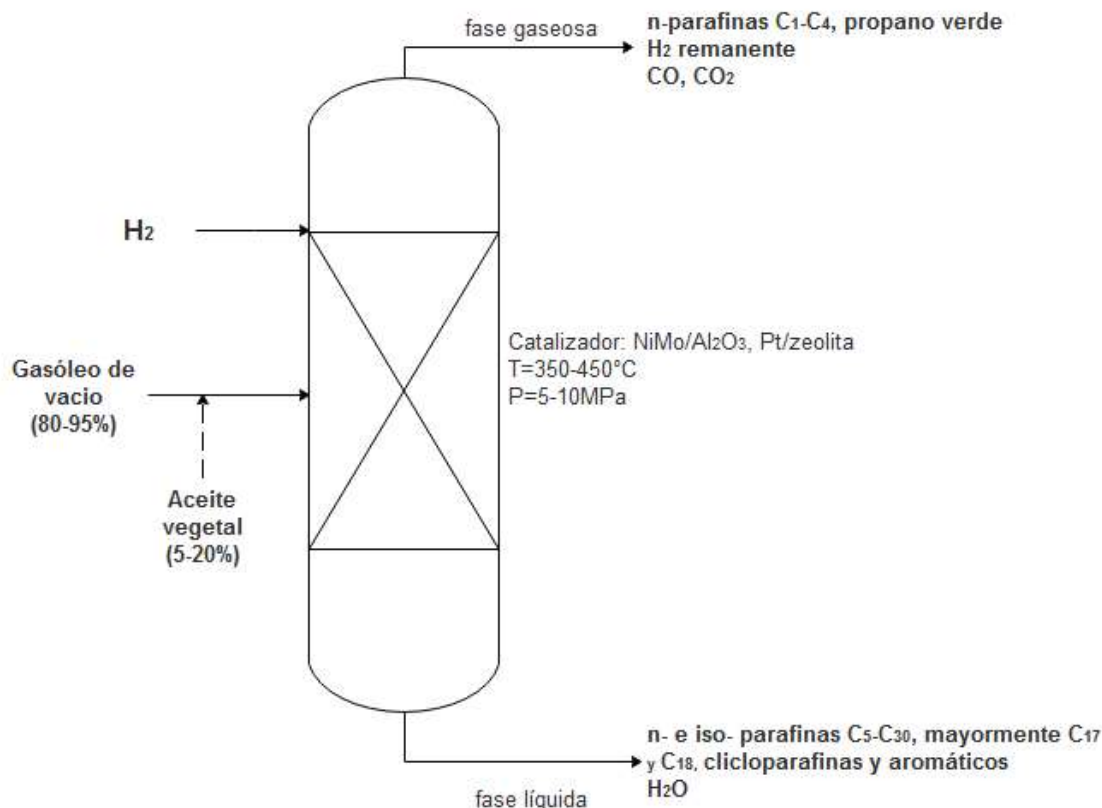


Figura 10. Co-alimentación de gasóleos de vacío y aceites vegetales a un hidrotratador [22]

### 1.4.3 Producción de bioturbosina

El uso de recursos renovables para desarrollar una nueva generación de biocombustibles, es una alternativa que se acerca más a la realidad. La tecnología de los biocombustibles está en camino de posicionarse como la alternativa a la solución en el cumplimiento de las nuevas legislaciones ambientales, reduciendo la dependencia a los combustibles de origen fósil; mejorando la seguridad energética, y contribuyendo al mismo tiempo a la reducción de gases de efecto invernadero, al reducir la huella de carbón.

Sin embargo, las rutas actuales para la transformación de los combustibles de origen renovable mostradas en la figura 11 [27], están en su mayoría en etapa de desarrollo con dificultades en el cumplimiento de las especificaciones estándar que permiten garantizar la calidad de los diferentes tipos de biocombustibles de aviación.

Los primeros biocombustibles comerciales fueron el etanol para su uso en la gasolina y el biodiesel (FAME) para su uso en mezcla con el diésel de origen fósil. Y ambos tuvieron restricciones y complicaciones de uso.

Los biocombustibles de segunda generación se elaboran a partir de materias primas no destinadas a la alimentación, cultivables en terrenos no agrícolas o marginales y que además no compiten con recursos hídricos que puedan destinarse a alimento humano.

Los combustibles verdes ofrecen una serie de nuevas alternativas en el uso de diferentes tipos de materias primas, que han permitido avances en el desarrollo de su producción. Dando apertura a nuevas especificaciones de combustibles de aviación, como lo es la **ASTM-D7566. Especificación estándar de combustibles para turbinas de aviación que contienen hidrocarburos sintetizados**, que certifica mezclas de combustible fósil con hidrocarburos sintéticos producidos de materiales alternativos.

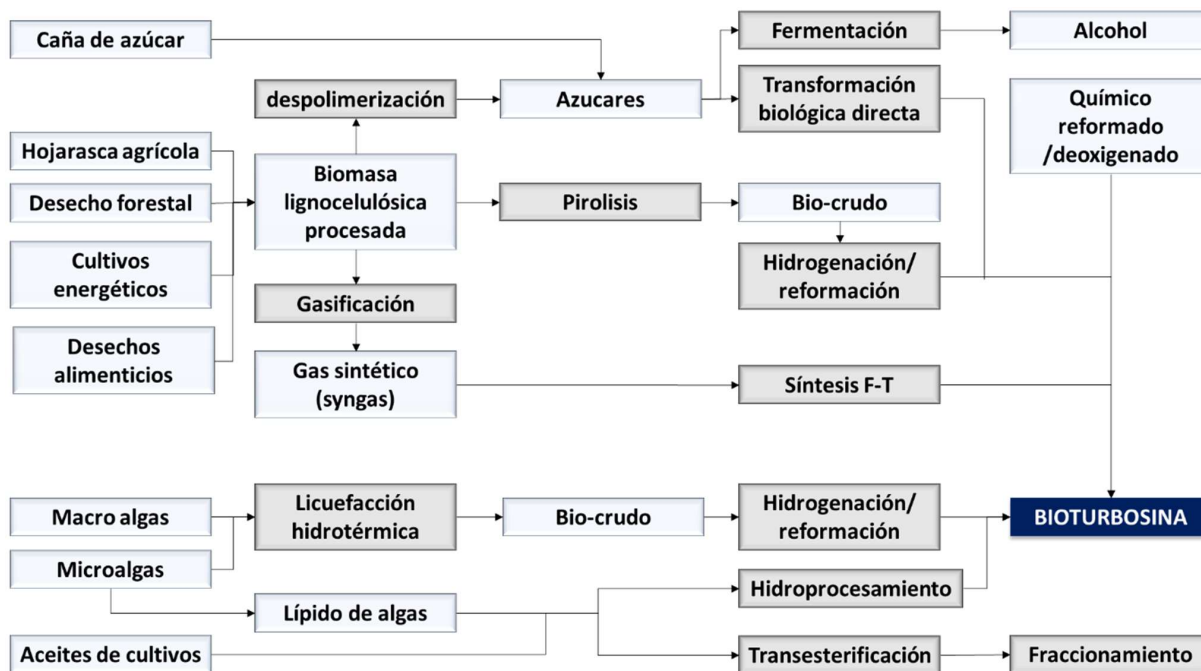


Figura 11. Mayoría de rutas para la producción de bioturbosina [27].

Las tecnologías aprobadas por la ASTM para la producción de bioturbosina son: FT-SPK (en inglés Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene); HEFA (en inglés Hydrotreated Esters of Fatty Acids), SIP (en inglés Synthesized Iso-Paraffins), FT-SPK/A (en inglés Fischer-Tropsch Synthetic Kerosene with Aromatics) y JTJ (en inglés Alcohol To Jet), ver tabla 3.

La primera tecnología lanzada para la producción comercial de bioturbosina fue la HEFA, que se usa como mezcla con turbosina tradicional al 50%, esto por el bajo contenido de aromáticos en el producto. Honeywell UOP ha licenciado dos procesos HEFA: Green Diesel y Green Jet dirigidas al mercado de diésel y turbosina respectivamente. Neste Oil comercializa el diésel renovable usando la tecnología HEFA y se encuentra en planes de comercializar bioturbosina.

Sin embargo, no fue la HEFA la primera ruta alternativa aprobada por la ASTM. La primera tecnología alternativa aprobada por la ASTM para la producción de turbosina fue la FT-SPK. La síntesis FT puede usar carbón, gas natural o biomasa como materia prima, siendo Sasol la primera firma en comercializar la turbosina alternativa a partir de la síntesis FT del carbón.

**Tabla 3. Resumen de tecnologías para producción de bioturbosina [28, 29].**

Tecnología	Desarrollador de tecnología	Materia Prima	Contenido de aromáticos	Status ASTM
<b>FT-SPK</b>	Sasol, Shell, Syntroleum	Carbón, gas natural, biomasa	Bajo	Aprobado en 2009
<b>HEFA</b>	Honeywell UOP, Neste Oil, Dynamic Fuel, EERC	Aceite vegetal, grasas animales, aceites reciclados	Bajo	Aprobado en 2011
<b>SIP</b>	Amyris, Total	Azúcar	Bajo	Aprobado en 2014
<b>ATJ</b>	Gevo, Cobalt, Honeywell UOP, Lanzarech	Almidón, azúcar, biomasa celulósica.	Bajo	Aprobado en 2016
<b>HDO-SK</b>	Virent	Almidón, azúcar, biomasa celulósica.	Bajo	Reporte de investigación presentado para su revisión OEM en mayo 2015.
<b>HDO-SAK</b>	Virent	Almidón, azúcar, biomasa celulósica.	Elevado	Revisión del reporte de investigación por el manufacturero inicial a finales del 2015.
<b>HDCJ</b>	Honeywell UOP, Licella, KiOR	Biomasa celulósica.	Elevado	En espera de actualización de resultados de pruebas adicionales en el reporte de investigación.
<b>CH</b>	Chevron Lummus Global, Applied Research Associates, Blue Sun Energy	Aceite vegetal, grasas animales, aceites reciclados	Bajo	Revisión del reporte de investigación por el manufacturero inicial a finales del 2015.

La tecnología SIP fue aprobada en 2014, y solo es aprobada en mezclas con una composición al 10%. Y la más reciente tecnología aprobada fue la ATJ en 2016, que usa alcoholes como materia prima (mayormente etanol y butanol) para convertirlos en turbosina.

### 1.5 Demanda de turbosina

La IATA dio a conocer su pronóstico de crecimiento de pasajeros, con una proyección en la que se espera que el número de pasajeros llegará a 7 mil millones para el 2034 con un crecimiento del 3,8% promedio anual en la demanda (2014 año de referencia). Esto es más del doble de los 3,3 millones de personas que volaron en 2014 [30].

En consecuencia, la demanda de combustible de aviación incrementará en los años venideros. La Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés Energy Information Administration) prevé un crecimiento en la demanda de turbosina en el sector comercial del 27% para el 2040 en comparación con los consumos hechos en 2014 [28].

En México, se prevé que la demanda de turbosina crezca 4.3% promedio anual entre 2014 y 2029, asociada a la recuperación de la actividad económica y su impacto en el tráfico de pasajeros y de carga, así como de la ejecución de proyectos. Lo anterior traerá como consecuencia recurrir a importaciones para satisfacer la demanda interna, las cuales serán de 53.9 mbd, lo que representa que aumento de 42.1 mbd en relación a 2014 [31], ver figura 12.

**COMERCIO EXTERIOR DE TURBOSINA, 2014-2029**  
(Miles de barriles diarios)



*Figura 12. Comercio exterior de Turbosina, 2014-2029 [31].*

**1.6 Panorama de la producción de bioturbosina**

Como se muestra en la figura 13 en 2009, la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO, por sus siglas en inglés International Civil Aviation Organization) organizó la Conferencia sobre la Aviación y Combustibles Alternativos, durante la cual los Estados miembros de la OACI respaldaron el uso de combustibles alternativos sostenibles para la aviación como un medio importante en el proyecto de reducir las emisiones del sector de aviación. En este punto de inflexión, el uso de combustibles alternativos se convirtió en un tema global, conduciendo a la inclusión de las recomendaciones de la Resolución sobre la aviación y el cambio climático, la Resolución A37-19, aprobada por la Asamblea de la OACI 37, para que los Estados consideren las políticas y medidas para apoyar y acelerar, en su caso, el desarrollo y el despliegue de tales combustibles como parte del conjunto de las medidas para reducir el impacto ambiental de las emisiones de aviación.

La aprobación de los procesos FT-SPK y HEFA provocó el despegue del uso de combustibles alternativos en los primeros vuelos comerciales, y hasta la fecha se han registrado más de 2,000 vuelos efectuados por más de 20 diferentes compañías aéreas.

Para finales de noviembre de 2015, 22 nuevas iniciativas y proyectos de múltiples partes interesadas se habían sumado. Estas iniciativas tienen una amplia gama de propósitos, incluyendo la creación de redes y coordinación de los actores nacionales para el desarrollo de combustibles alternativos, cooperación internacional, investigación y desarrollo, evaluación del potencial de producción o la puesta en marcha de la integración de las cadenas de valor para la producción [32].

En México desde el 2009, Aeropuertos y Servicios Auxiliares, impulsó el desarrollo de los combustibles alternativos de aviación y coordinó los esfuerzos con otras instancias.



Durante 2010 y 2011 ASA llevó a cabo la iniciativa Plan de Vuelo hacia los Biocombustibles Sustentables de Aviación en México (PdV), cuyo objetivo primordial fue integrar los talentos y actividades de los sectores participantes. El resultado más importante fue la integración de la cadena de suministro y, la identificación de los cuellos de botella más importantes, como la insuficiente producción de materia prima, la falta de infraestructura de biorefinación y la ausencia de una legislación adecuada.



**Figura 13. Línea del tiempo del desarrollo de combustibles alternativos en la aviación, modificado de [32, 33].**

A finales de 2013, realizaron el primer ejercicio regional: Plan de Vuelo Hidalgo (PdVH), ejercicio que analizó las características del Estado con la finalidad de detallar un plan estratégico de producción de bioturboquina que logrará abastecer en un futuro la zona centro del país al ser la de mayor demanda.

A principios de 2014, inició el Plan de Vuelo Morelos (PdVM) con el fin de establecer las bases y mecanismos de coordinación para el fortalecimiento de la innovación, desarrollo científico y tecnológico, así como el diseño y aplicación de una estrategia integral para la producción de biocombustibles de aviación en Morelos [33].

### **1.7 Normatividad de sostenibilidad de biocombustibles**

Los mercados internacionales de bioenergía no han creado una marca para la producción sustentable de alimentos, biomasa o biocombustibles, provocando que los consumidores no tengan la posibilidad de elegir entre productos sustentables y no sustentables [34]. Como respuesta a estas inquietudes, diversos países de la Unión Europea, Reino Unido y los Estados Unidos han establecido criterios para la producción, comercio y uso, lanzándose así iniciativas de diferenciación mediante certificaciones. En términos de biocombustibles, la certificación es un instrumento que ayuda a diferenciar a los productos sustentables de los no sustentables.

Para la Certificación de empresas en función del objeto, se pueden distinguir los sistemas de Gestión de calidad (SGC): estructura organizativa, responsabilidades, procedimientos, procesos y recursos necesarios para llevarla a cabo. También existe el Sistema de Gestión medioambientales (SGMA), que emite un organismo independiente, un documento que atestigua que el sistema de gestión medioambiental de una empresa es conforme con una determinada norma. Las más empleadas son: la ISO 14001 y la EMAS.

Por otra parte, se encuentra la Certificación de productos, que consiste en la verificación por parte de una entidad independiente, de que sus propiedades y características están de acuerdo con determinadas normas y especificaciones técnicas. Dentro de éstas se pueden nombrar: marcas de conformidad; certificados de producto ecológico; denominaciones de origen; marcas de garantía; certificados de proyectos de I&D [35].

A continuación, se expone la descripción de las certificaciones, en la tabla 4:

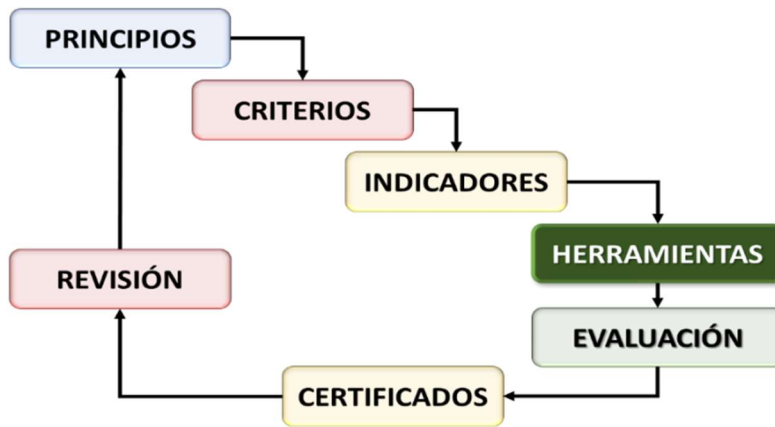
**Tabla 4. Certificaciones para la sustentabilidad de biocombustibles [29, 34-38].**

CERTIFICADO	DESCRIPCIÓN
Certificado RSB (por sus siglas en inglés, Roundtable on Sustainable Biofuels)	Se aplica a la producción, elaboración, transformación, comercialización y uso de biomasa y biocombustibles, y lo pueden solicitar los productores y procesadores de materias primas y biocombustibles, así como los mezcladores de biocombustibles. La obtención de la certificación implica el cumplimiento de los siguientes principios: Legalidad; Planificación, monitoreo y mejora continua; Emisiones GEI; Derechos humanos y laborales, desarrollo rural y social; Seguridad alimentaria local; Suelos, agua, aire; Uso de tecnología, insumos y gestión de residuos.
Registro RFS (por sus siglas en inglés, Renewable Fuel Standard).	Programa desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos para cumplir con el Acta de Limpieza Ambiental y el Acta de Seguridad e Independencia Energética (EISA).
La certificación ISCC (por sus siglas en inglés, International Sustainability Carbon Certification)	Sistema que permite diferenciar entre productos sustentables y no sustentables, incluyendo información sobre emisiones de GEI en las distintas etapas de la cadena de valor. El ISCC establece los criterios de certificación relevantes que deben ser cumplidos y pueden ser clasificados en tres categorías: 1) Requisitos de sustentabilidad en la producción de biomasa; 2) Requisitos relativos al ahorro de emisiones de GEI y 3) Requisitos relativos al balance de masa.
El certificado RED (Directiva de Energía Renovable de la Unión Europea)	Aplicado a toda la cadena de suministro; establece los requisitos operativos vinculantes para todos los agentes económicos que participen en la cadena de suministro, la cual está constituida por un tipo de operador económico, el proveedor de biocarburante intermediario, que actúa mediante operaciones de gestión física o comercial para transferirlo a lo largo de la cadena de suministro, de acuerdo con un sistema de balance de masas e incluyendo emisiones de GEI.

Norma UNE-EN ISO 14001. Sistemas de gestión ambiental-Requisitos con orientación para su uso.	La norma sistematiza de manera sencilla los aspectos ambientales que se generan en cada una de las actividades desarrolladas, además proporciona la posibilidad de reducir costes de la gestión de residuos, eliminar barreras a la exportación, reducir el riesgo sanciones. Certifica la planta de producción, y especifica los requisitos para un sistema de gestión ambiental, para que una organización desarrolle e implemente una política y objetivos que tengan en cuenta los requisitos legales y requisitos que la organización suscriba.
El estándar ASTM D7566-Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons	Los estándares de combustibles ASTM son los mínimos valores aceptados en el combustible para proveer una adecuada satisfacción y/o protección al usuario final.
EMAS (Sistema Comunitario de Gestión y Auditoría Medioambientales).	Ayuda a gestionar y mejorar, de manera continua su labor ambiental. “Además de incluir y exigir el cumplimiento de la norma ISO 14001, EMAS contiene otros requisitos adicionales. Proporciona un suministro periódico de información, a través de una Declaración Ambiental y promueve la mejora en todos los sectores”.
Certificado GGL (por sus siglas en inglés, Green Gold Label)	Sistema de certificación para la biomasa sustentable, que abarca la producción, el procesamiento, transportación y la transformación final en energía. Sus principios: Manejo del sistema de la agricultura es de largo plazo, basada sobre la planificación de recursos de la tierra; enfocada hacia la rehabilitación y conservación y es apoyada en el abastecimiento de comida; Manejo de la agricultura orientado hacia la producción de plantas nutritivas; las materias primas no deben ser obtenidas de tierras con tierras destinadas a otros objetivos.
Esquema SGC (Sistemas de Gestión de Calidad)	Ofrece servicios de pruebas y ensayos para toda la cadena de suministro. Lo cual incluye pruebas de productos de biomasa en bruto, pruebas y optimización del proceso, y expedición de certificaciones de comercio.
Esquema SGC (Sistemas de Gestión de Calidad) [39].	Que establece especificaciones y requisitos para la certificación de sustentabilidad ambiental en la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal. Engloba más de 1650 oficinas en 143 países. En México existen oficinas y laboratorios en las ciudades de México, Coatzacoalcos, Manzanillo, Altamira, Tijuana, Lázaro Cárdenas, Torreón, Villa Hermosa, Durango.

Lo anterior muestra la importancia del desarrollo sustentable de combustibles alternativos para la aviación que cumplan con todos los requerimientos de las regulaciones pertinentes y al mismo tiempo ofrezcan la rentabilidad del negocio productivo y de distribución de bioturbosina. Como lo muestra la figura 14, propuesta por Yéssica Santos, las herramientas para puesta en marcha de la producción e incorporación de bioturbosina deberán ser bien seleccionadas.

En los posteriores capítulos se desarrollará un método sistemático que incluya las herramientas necesarias para la puesta en marcha del diseño sustentable para la producción de un combustible de aviación.



*Figura 14. Esquema de la secuencia de certificación para biocombustibles [35].*

## CAPÍTULO II · HERRAMIENTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE DISEÑO SUSTENTABLE DE PRODUCTOS

---

La necesidad de ofrecer productos y servicios competitivos ha permitido que la industria evolucione a través del tiempo, conllevando la adaptación de los sistemas de calidad hacia la satisfacción los requerimientos del cliente.

La necesidad de tener procesos de calidad impulsó a la industria a trasladar procesos manuales lentos a procesos que no involucraran grandes esfuerzos humanos que incrementen la velocidad de la producción, ejemplo de esto fue la desmotadora de algodón inventada por Eli Whitney en 1793 [40], que mecanizó la separación de la fibra de algodón de las vainas y de sus semillas.

En 1924 el Dr. Walter Shewhart incorporó el primer diagrama de control esquemático incluyendo todos los principios y consideraciones de lo que hoy conocemos como Control Estadístico de Procesos. Shewhart conoció e influyó en W. Edwards Deming quien continuó defendiendo los métodos de Shewhart. La combinación del ciclo de Shewhart (PDSA, por sus siglas en inglés Plan-Do-Study-Act) y el ciclo de mejora generan un pensamiento gerencial con análisis estadístico; la que consiste en la constante evaluación de los procedimientos y la política administrativa para promover la *mejora continua*. A este ciclo también se le conoce como el ciclo de Deming (PDCA, por sus siglas en inglés Plan-Do-Check-Act) [41]. Más tarde Joseph Juran añade el concepto de *valor humano* como parte de la *mejora continua* en su teoría de la gestión de la calidad, impulsando la educación y la formación de directivos.

Después de la segunda guerra mundial Toyoda se enfrentó una crisis en la empresa debido a las bajas ventas y la baja rentabilidad de estas. Movidos por la necesidad los japoneses se centraron en adaptar los métodos de producción en masa a sus propios estándares. Esto se convirtió en la base de la producción eficiente de Toyota que se promovió como un sistema de *mejora continua* y posteriormente evolucionó para crear el Sistema de Producción Toyota (TPS), también conocido como Sistema de Producción Lean.

Entre los 1970s y 1980s los norteamericanos perdían mercado frente a los productos japoneses debido a la superioridad en calidad de estos últimos, para contrarrestar esto Philip Crosby propone el uso de herramientas basadas en el principio “Hacerlo correctamente la primera vez” que incluye tres bases: (1) la definición de calidad está de acuerdo a las necesidades del cliente; (2) un manejo estándar equivale a cero errores; (3) la medida de la calidad es el precio de la inconformidad.

Para los 1980s, ante los buenos resultados obtenidos con el uso de las metodologías japonesas Lean, surge la administración total de la calidad (TQM, por sus siglas en inglés Total Quality Management) como la suma de las herramientas usadas en el TPS.

En 1987, con base en las buenas prácticas aprendidas en la industria y con el objetivo de promover estándares para productos y servicios que facilitaran el comercio global, se creó la ISO 9000 por parte de la Organización Internacional para la Normalización (ISO, por sus siglas en inglés).

En los 1990s Motorola conjuntó varias estrategias aprendidas en una técnica para la mejora sistemática de procesos y productos enfocados a la satisfacción del cliente, a la que llamó Seis Sigma (en inglés, Six Sigma) [42].

Este capítulo tiene por objeto exponer algunas de estas herramientas que se desarrollaron en la historia de la industria, a fin de que sirvan como base para el desarrollo de una metodología que asegure el diseño sostenible de la producción de bioturbinas.

## 2.1 Sistema de Producción Toyota

Toyota Production System (TPS), también llamado Sistema de Producción Lean (esbelta), es el sistema de producción y gestión que surgió en la empresa Toyota fundada por Sakichi Toyoda, su hijo Kiichiro y el ingeniero Taiichi Ohno, entre 1946 y 1975 [43]. De manera genérica, TPS se conoce como manufactura esbelta o lean manufacturing. En este trabajo se mantiene el término lean por considerarlo de uso común en nuestro país.

En los años 80s y 90s, este sistema fue popularizado en EUA y muchas organizaciones decidieron transformar su sistema de producción, lo que los llevó a ser mucho más eficientes. Actualmente es un sistema seguido por muchas empresas y conocido en todo el mundo [44].

Aplicando el TPS se puede empezar a examinar el proceso de fabricación desde la perspectiva del cliente. La primera pregunta en el TPS es siempre ¿Qué se quiere de este proceso?, esta pregunta sirve como base para determinar qué busca el cliente”, o “todo aquello por lo que el cliente está dispuesto a pagar”. Esto se denomina “*valor*”, y es aplicable tanto para el cliente interno del proceso de producción, como para el cliente externo.

Si se conoce la visión del cliente, a través de una encuesta por ejemplo, se pueden separar las operaciones con valor agregado de aquellas que no aportan *valor*.

Las operaciones sin valor agregado son lo que conocemos como desperdicio (*muda* en japonés), y se clasifican en siete tipos:

1. **Transportes innecesarios.** Ocurre cuando se tienen movimientos con largos recorridos del producto en el proceso, los cuales crean ineficiencias de transporte.
2. **Inventario.** Es el exceso de producto, y material en proceso que generan tiempos de paro, retraso, daños, costos de transporte y almacenamiento. Además, el exceso de inventario puede ocultar problemas de producciones desniveladas, retrasos en entregas por proveedores, defectos, paros de equipo, requerimientos largos para la preparación de máquinas.
3. **Movimientos.** Es el conjunto de actividades y/o prácticas inútiles que realiza un operador durante el proceso laboral.
4. **Espera.** Es el tiempo sin actividad del operador causada por espera de otro proceso que antecede a él. Es en este punto donde se puede apreciar la necesidad del balanceo de líneas

productivas, esto significa coordinar las etapas de operación para obtener el flujo continuo del proceso.

5. **Sobre-proceso.** Ocurre al realizar pasos innecesarios para procesar el producto. El uso de herramientas o equipos que están en malas condiciones o que no son los adecuados, generan defectos que deben ser reprocesados. También se genera este desperdicio al generar productos de una calidad elevada a la deseada por el cliente.
6. **Sobreproducción.** Es generar producto que no se han solicitado, sobre-utilizando recursos, generando sobre inventarios, transportes innecesarios y desechos.
7. **Defectos.** Resulta de la producción de piezas/ producto no conforme a la especificación o que requieren retoques que generan sobre-procesos y tiempo.

Por lo tanto, el corazón del TPS es la eliminación de los siete desperdicios que no añaden *valor al proceso del negocio*. Por ello, en un proyecto de mejora Lean, la mayor parte del avance es cuando se eliminan un gran número de actividades sin *valor agregado*.

El sistema TPS se basa en las siguientes ideas [45]:

1. Justo a tiempo. Ningún componente de un producto debe fabricarse antes de que sea necesario. Se debe evitar la acumulación de inventarios innecesarios que producen pérdidas.
2. *Jidoka* (término japonés). La automatización con un toque humano que combina la colocación de las máquinas en el orden en que se usan y la capacitación de los asociados para manejar cualquiera de ellas permite que la producción fluya en forma continua. detección de los problemas para detener la producción y evitar los productos defectuosos.
3. *Kaizen*. La idea de que todo es susceptible de perfeccionamiento. Al estar en manos de los asociados, el mejoramiento continuo se convierte en una fuerza motriz que impulsa la calidad en Toyota.

Desde la creación del TPS, Toyota se dedicó a aplicarlo y mejorarlo de manera práctica en sus plantas, sin documentar la teoría y al ir madurando, a través de varias décadas, extendió su enseñanza hacia sus proveedores. Para ello Fujio Cho, desarrolló un diagrama que explica el TPS usando la figura de una casa, ver figura 15.

La casa TPS, representa una estructural donde todos los elementos son críticos y se refuerzan unos a otros. La casa será sólida solo si el techo, los pilares y los cimientos son fuertes. El TPS, por lo tanto, no puede verse como un kit de herramientas, sino como un sistema de producción sofisticado en el que todas las partes contribuyen al todo. Todo el conjunto, desde sus raíces se centra en el apoyo y motivación de la gente para mejorar continuamente los procesos en los que trabajan.

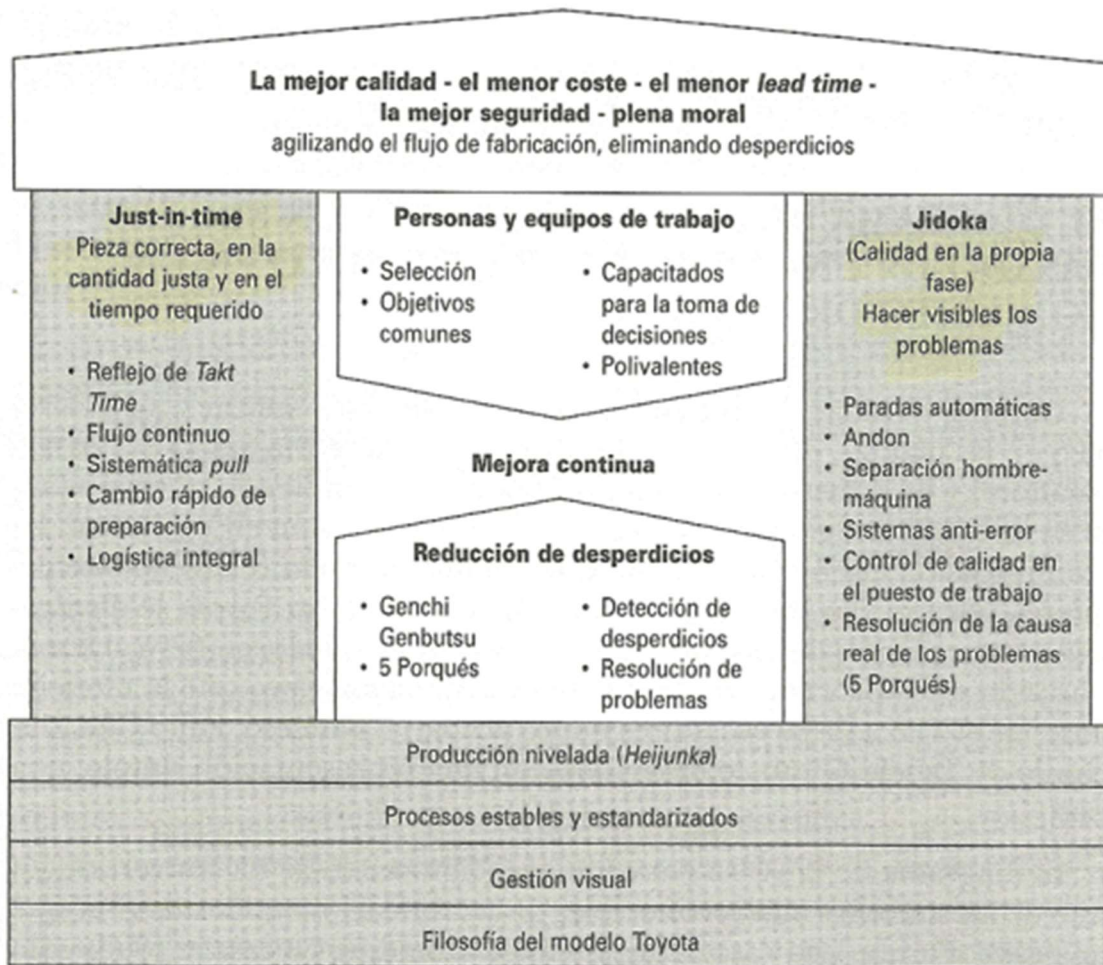
Para asegurar el éxito del TPS, se establecieron catorce principios [46] en los que se combinan el compromiso de la dirección de una empresa, capacitación del personal adecuada y una cultura que haga que la mejora continua sea un hábito en todas las áreas, desde el taller hasta la dirección. Los principios están organizados en cuatro bases: (1) Filosofía a largo plazo; (2) Usar los procesos correctos para producir los resultados correctos; (3) Añadir valor a la organización mediante el desarrollo de su personal y de sus socios, y (4) Promover la resolución continua de los problemas fundamentales para impulsar el aprendizaje organizacional:

**BASE I. FILOSOFÍA A LARGO PLAZO**

**Principio 1.** Es la filosofía de trabajo que sobrepasa objetivos financieros a corto plazo.

**BASE II. USAR LOS PROCESOS CORRECTOS PARA PRODUCIR LOS RESULTADOS CORRECTOS**

**Principio 2.** Crear procesos continuos para hacer que los problemas sean visibles. Consiste en crear un proceso de flujo continuo tanto en la fabricación como en los servicios, es así como salen a la luz los siete tipos de desperdicios que no agregan valor al producto final (muda).



**Figura 15. Casa del Sistema de Producción de Toyota [46].**

**Principio 3.** Utilizar sistemas de jalón (pull) para evitar producir en exceso. Se basa en adaptar el ritmo de producción a la demanda del cliente entregando al cliente lo que desea, en el tiempo que lo requiere y en la cantidad deseada. El tiempo que se tarda en completar un producto con el fin de satisfacer la demanda de los clientes se conoce como Takt-Time (en alemán reloj de tiempo). Sin embargo, la demanda del cliente puede variar y por consecuencia generar desperdicios que harían complicado controlar los inventarios. Para el control efectivo de inventarios se creó el



sistema de información conocido como Kanban (señal) que permite gestionar y asegurar el flujo y producción en la cadena de suministro usando *contenedores vacíos* con niveles específicos con el mínimo o máximo número de piezas necesarias, mejorando así la eficiencia de la fabricación y logrando la producción justo a tiempo.

**Principio 4.** Nivelar la carga de trabajo (Heijunka, en japonés). Esto se refiere a nivelar la producción por volumen o mezcla de productos tomando en cuenta la demanda real en un intervalo de tiempo y programando su producción en grupos (lotes); evitando los cambios bruscos en el proceso de producción. A esto se le conoce como planeación de la producción.

**Principio 5.** Crear una cultura operativa para detener el proceso de producción cuando se requiere resolver problemas que afectan la calidad. Esto mediante la generación de métodos que ayuden a detectar defectos y detener automáticamente el proceso productivo.

En este principio se aplica el *Jidoka*, que se conoce también como ‘autonomatización’, y consiste en dotar de inteligencia humana a las máquinas automáticas y para detenerse cuando surja un problema; detectando la calidad en cada paso del proceso, haciendo más eficiente la inspección, y abriendo el paso al análisis y solución de problemas para su solución.

**Principio 6.** Crear tareas estandarizadas como base para la *mejora continua* y la autonomía del empleado. Sin que estos estándares sean rígidos, ya que pueden convertir los trabajos en algo rutinario y degradante. El trabajo estandarizado es la base para darles autonomía a los trabajadores y permitirles innovar en su puesto de trabajo, porque son ellos los que mejor conocen los pormenores de las operaciones. Esto motiva la comunicación; innovación; flexibilidad; moral elevada y enfoque las tareas hacia el cliente por parte de los trabajadores, generando un ambiente “*facilitador*”.

**Principio 7.** Utilizar el control visual de modo que no se oculten los problemas. El control visual es cualquier dispositivo de comunicación que permita observar el estatus del proceso con un solo vistazo. El objetivo de usar una gestión visual es administrar los pequeños módulos de operación, eliminando los sobreesfuerzos.

**Principio 8.** Utilizar solo tecnología fiable y absolutamente probada que dé servicio al personal y a los procesos. Esto significa que cada mejora tecnológica debe usarse con el fin de apoyar al proceso de trabajo real, y su implementación debe ser rápida a fin de no distraer a la gente en sus labores actuales.

### **FASE III. AÑADIR VALOR A LA ORGANIZACIÓN MEDIANTE EL DESARROLLO DE SU PERSONAL Y DE SUS SOCIOS.**

**Principio 9.** Hacer crecer a líderes que comprendan perfectamente el trabajo, vivan la filosofía y la enseñen a otros. Consiste en desarrollar a los líderes que gestionen los cambios a la mejora continua en diversas partes de la empresa (ventas, desarrollo de producto, fabricación y diseño). Estos líderes han de demostrar la habilidad ir y *observar por si mismos* (Genchi Genbutsu en japonés), es decir, ser capaces de observar la situación real con detalle y profundidad, y comprender cómo se hacen las cosas a nivel productivo dentro de la empresa.

**Principio 10.** Desarrollar personas y equipos excepcionales que sigan la filosofía de su empresa. Se trata de crear actividades que motiven interiormente a los empleados para que estos sientan el compromiso de mejorar día con día sus operaciones.

**Principio 11.** Respetar la red extendida de socios y proveedores, presentándoles retos y ayudándolos a mejorar. Esto consiste en transmitir la filosofía a los proveedores, desarrollando en ellos servicios de excelencia y confianza.

#### **FASE IV. PROMOVER LA RESOLUCIÓN CONTINUA DE LOS PROBLEMAS FUNDAMENTALES PARA IMPULSAR EL APRENDIZAJE ORGANIZACIONAL.**

**Principio 12.** Ir a *verlo por sí mismo* para comprender a fondo la situación. Consiste en observar los problemas en el lugar del hecho analizando la problemática personalmente o por personal de confianza, ayuda a implementar sistemas de organización y mejorar efectivamente. Usar datos no deja de ser importante para su análisis y punto de partida de la mejora.

**Principio 13.** Tomar decisiones por consenso lentamente, considerando concienzudamente todas las opciones; implementándolas rápidamente. Consiste en tomar decisiones con los siguientes cinco pasos: (1) Averiguar lo que realmente está pasando (Genchi Genbutsu); (2) Averiguar las causas raíz; (3) Considerar una gama de soluciones alternativas y explicar la solución elegida; (4) Crear un consenso dentro del equipo y (5) Usar medios de comunicación eficaces para ejecutar los pasos anteriores.

**Principio 14.** Convertirse en una organización que aprende mediante la reflexión constante (Hansei en japonés) y la mejora continua (Kaizen en japonés). Esto es crear flujo y reducir los inventarios para que los problemas (Muda) salgan a la vista. Analizar los problemas (5 ¿por qué?), implantando contramedidas y estándares. Repetir este ciclo constantemente en busca de la excelencia, hace que la organización se convierta en una “organización que aprende”.

Ser una empresa Lean no significa imitar las herramientas usadas por Toyota en un proceso de fabricación en particular. Significa desarrollar principios que sean apropiados para su organización y practicarlos continuamente para lograr un alto rendimiento que continúe añadiendo valor a los clientes y a la sociedad [46]. En términos simples, el TPS es una innovación "dura" que permite que la empresa siga mejorando la forma en la que fabrica [47].

## **2.2 Seis Sigma**

Seis Sigma es una metodología enfocada a la mejora de procesos, la cual se basa en realizar análisis estadísticos del sistema de fabricación con el fin de solucionar la causa raíz de algún problema. Con esto se busca reducir la variación de los procesos y aumentar el rendimiento, es decir, mejorar el porcentaje de producto y/o servicios sin defectos, así como mejorar los beneficios, la moral de los empleados y la calidad del producto, y finalmente alcanzar la excelencia operacional. En pocas palabras,  $6\sigma$  se enfoca en reducir la variación y/o defectos de lo que se fabrica.

El nombre Six Sigma deriva de sigma ( $\sigma$ ) que es la letra griega con la que se denota en estadística a la desviación estándar, que es una medida de la dispersión de datos con respecto a la media. La metodología  $6\sigma$  se basa en la curva de distribución normal en la cual, la probabilidad de caer dentro de un rango de  $\pm 6\sigma$  alrededor de la media es 0.9999966 [48].

En un proceso de producción, la meta de 6 Sigma es llegar a un máximo de 3.4 *defectos* por millón de eventos u oportunidades (DPMO), entendiéndose como *defecto* cualquier evento en que un producto o servicio no logra cumplir los requisitos del cliente [49]. Comparado con otras iniciativas de calidad, la diferencia de Six Sigma es que no solo puede aplicarse a la calidad del producto, sino también a todos los aspectos de operación del negocio [48].

### 2.2.1 Proceso de negocio Seis Sigma

En un proyecto seis sigma, si el equipo de trabajo selecciona la estrategia de mejora de procesos Six Sigma, se utilizará un proceso de cinco etapas para mejorar un proceso existente, en la figura 16 se muestran estas cinco etapas [50]:

**I. DEFINIR (DEFINE):** Es la etapa en la que se define el proyecto de mejora. Se busca identificar y validar la oportunidad de mejora, desarrollar los procesos organizacionales, definir los Requerimientos Críticos para el Cliente (CTQ, en inglés Critical to Quality) y formar un equipo efectivo de trabajo y, a su vez, definir los indicadores de la mejora y fijar objetivos de éxito del proyecto.

**II. MEDIR (MEASURE):** Se busca identificar las mediciones que son necesarias para evaluar si se alcanzaron los CTQ. Para esto es necesario desarrollar una metodología que colecte efectivamente los datos para medir el rendimiento del proceso y entender los elementos para calcular y establecer el nivel sigma del proceso.

**III. ANALIZAR (ANALYSIS):** Estratificar y analizar para identificar el problema específico.

**IV. MEJORAR (IMPROVE):** Identificar, evaluar y seleccionar las soluciones de mejora correctas.

**IV. CONTROLAR (CONTROL):** Definir el cuadro de control para dar cierre y controlar el éxito del proyecto.

### 2.3 Diseño para Lean Seis Sigma (DFLSS)

El Diseño para Lean Seis Sigma (DFLSS, por sus siglas en inglés Design for Lean Six Sigma) es un método estructurado y cuantitativo para el desarrollo y lanzamiento de productos que reduce la repetición del diseño, mejora la calidad y reduce el riesgo.

La metodología combina principios clave de manufactura Lean con el proceso 3P (preparación del concepto, preparación del diseño y preparación de la producción) y herramientas del Diseño para Six Sigma (DFLSS, por sus siglas en inglés Design for Lean Six Sigma)

El DFLSS se enfoca en satisfacer las necesidades, maximizando al mismo tiempo el diseño para la fabricación. Otra característica que hace al proceso DFLSS poderoso y práctico es que puede ser hecho a la medida de las necesidades específicas del negocio [51].

La metodología DFLSS se constituye de cuatro etapas: Definir y Medir, Analizar, Diseñar y Verificar (DMADV), mostradas en la figura 17.

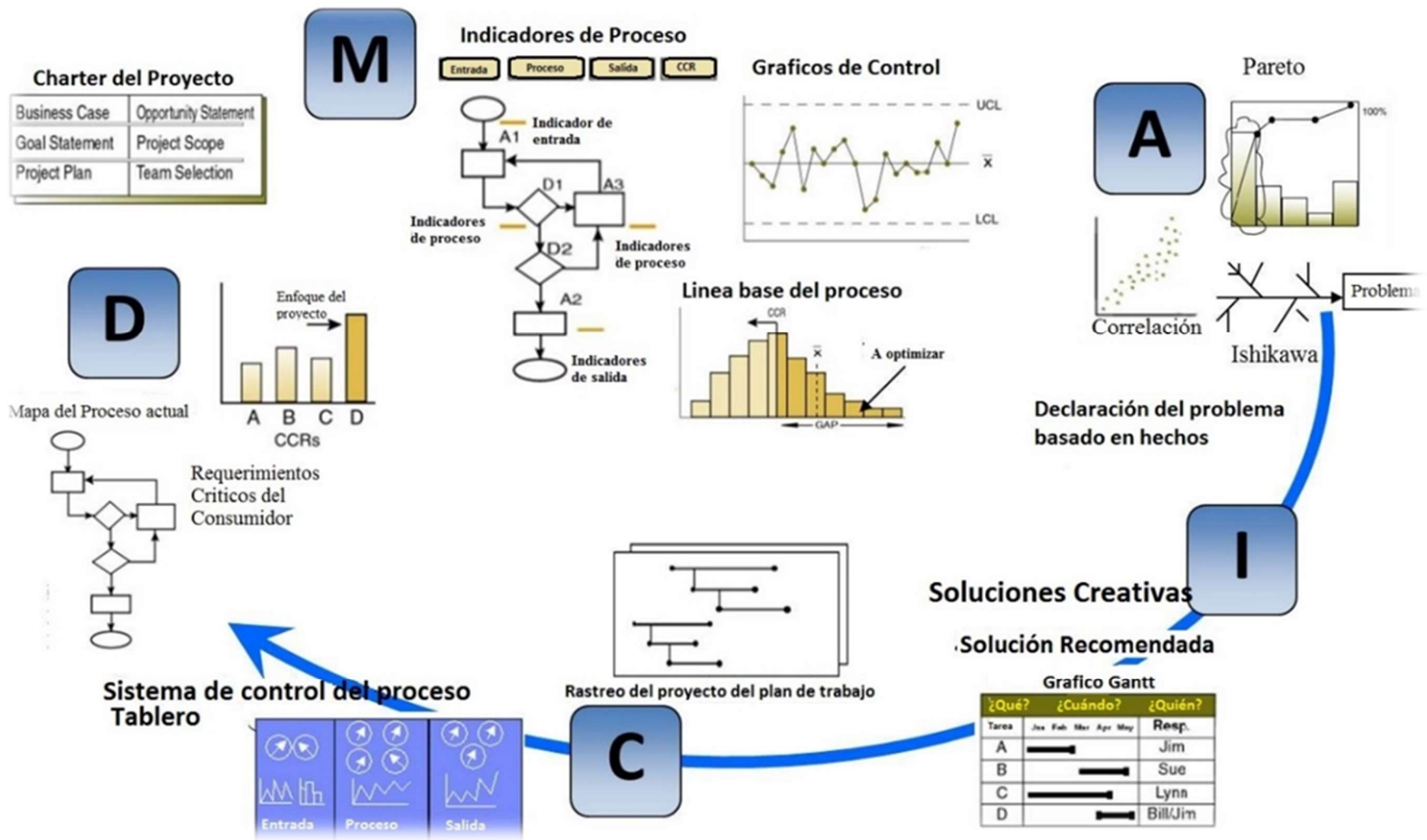


Figura 16. Etapas de la metodología DMAIC, modificado de [50].

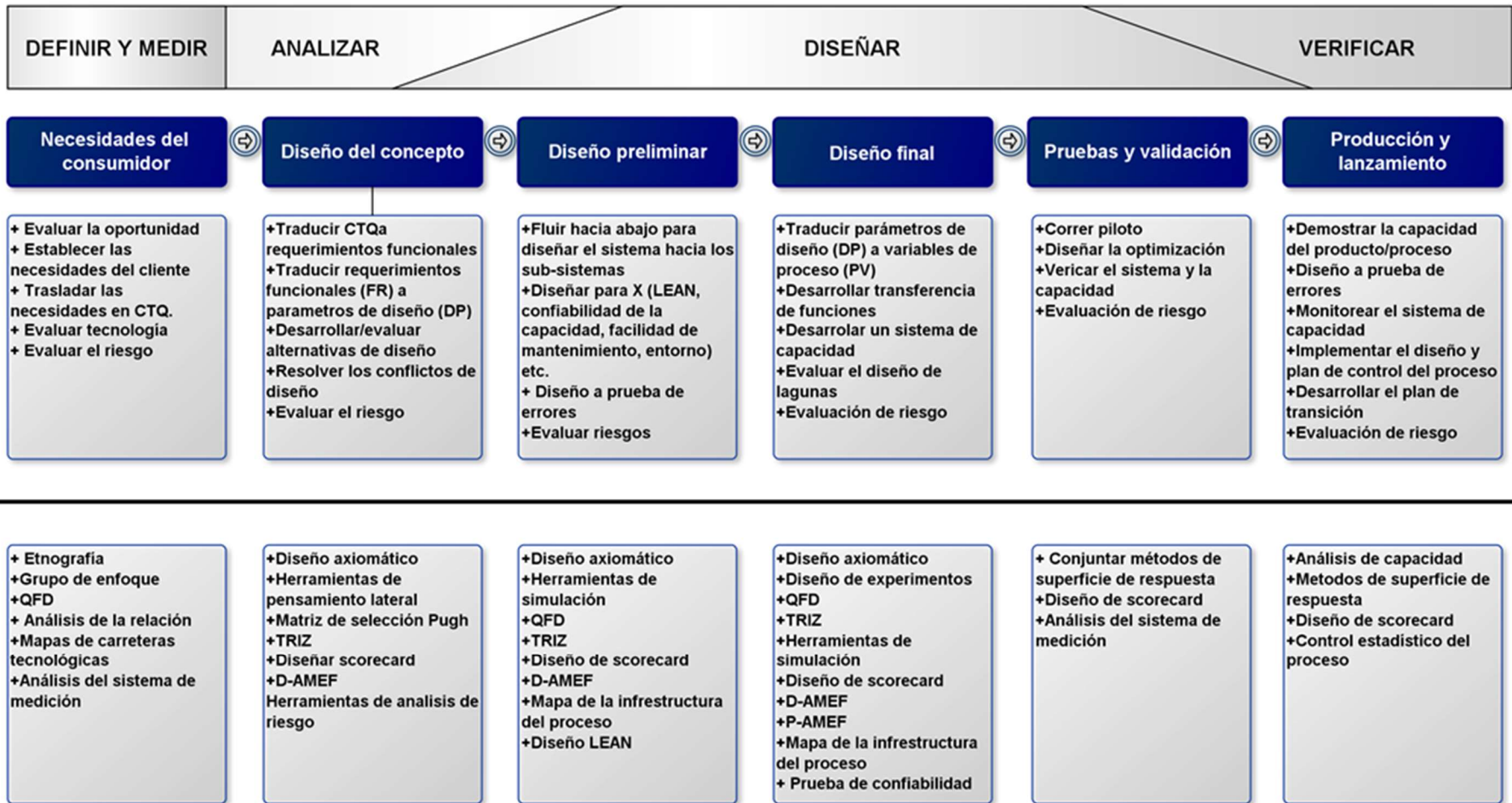


Figura 17. Etapas de la metodología DFLSS, de [52].

La primera etapa **definir y medir** se estudia el nuevo requerimiento del mercado y se evalúa propuestas contra criterios de negocio para minimizar los riesgos, se investigan a fondo el entendimiento de las necesidades y requerimientos del cliente, reduciendo el riesgo del diseño global. La etapa **analizar**, es la preparación del diseño conceptual del proceso atractivo a desarrollar, generando los requerimientos funcionales de forma general.

Durante la tercera etapa, **diseñar**, durante esta etapa el equipo de trabajo genera todas las especificaciones de ingeniería para el nuevo producto y todos los procesos asociados, equipamiento, instalaciones, así como un plan de aseguramiento de calidad detallado y se realiza la verificación y validación del diseño poniendo en marcha la producción. La última etapa, **verificar**, consiste en monitorear el proceso productivo optimizándolo y mejorándolo dentro de las metodologías Lean, monitoreando los indicadores de desempeño claves se puede evaluar el desempeño del producto en el mercado [50-52].

Los beneficios principales de la aplicación de DFLSS son:

- Satisfacción de necesidades del cliente final. Determinando las necesidades absolutas del cliente y siendo críticos respecto a la calidad desde un inicio.
- Acelerada inclusión en el mercado. Hace que el equipo incorpore rápidamente varias consideraciones en el diseño a raíz de los requerimientos del cliente.
- Riesgo reducido. Ciclos de desarrollo de diseño más cortos. Esto es al asegurarse de que todos los elementos (marketing, diseño, manufactura y calidad) tengan voz en el proceso de desarrollo [51].

## 2.4 Diseño clásico de procesos químicos

El diseño de procesos químicos comienza a partir de la definición de un problema declarado por la necesidad del consumidor o de la evaluación de una serie de resultados experimentales, con esto el ingeniero químico desarrollará un plan de acción que solucione dicho problema.



Figura 18. Restricciones de diseño, de [53].

Las etapas de desarrollo del diseño van desde la identificación inicial de los requerimientos del cliente hasta el diseño final del proceso, considerando las restricciones de diseño impuestas. La figura 18 muestra los tipos de restricciones que comúnmente el diseñador de procesos debe valorar y, de preferencia, considerar desde el inicio para delimitar el diseño.

Como se muestra en la figura 18, estas restricciones son una guía a la selección de rutas de diseño. Algunas de ellas serán rígidas (restricciones económicas, regulaciones de seguridad, recursos, leyes físicas, estándares y controles gubernamentales), fijándose en parámetros exactos de cumplimiento y otras serán más flexibles (condiciones de proceso, materiales, tiempo y personal) que ayudarán como guía a la selección del mejor diseño.

La secuencia de las etapas de diseño, construcción y lanzamiento de una planta de procesos químicos es abordada con la metodología que se muestra en la figura 19. Estas etapas del diseño se resumen en los siguientes pasos [53]:

1. *El diseño del objetivo.* Todo diseño comienza desde la percepción de una necesidad. La necesidad es el requerimiento público del producto, creación u oportunidad de comercio. Por esto es importante que el ingeniero químico trabaje mano a mano con el departamento de ventas o marketing para tener una idea clara de los requerimientos del consumidor.
2. *Ajuste del diseño básico.* En este paso el ingeniero químico deberá traducir los requerimientos del cliente a un diseño básico. El diseño básico es más bien una declaración precisa del problema a resolver donde se incluye velocidad de producción y especificaciones de pureza del producto principal.
3. *Generación de posibles diseños conceptuales.* Aquí la parte creativa del diseño de procesos se pone en marcha para generar una serie de posibles soluciones al problema, para su análisis, evaluación y selección. Es importante resaltar que la mayoría de diseños inician de la mejora o adaptación de un proceso ya conocido, rara vez se comienza a partir de una investigación nueva que requerirá varios años de investigación antes de pasar a un diseño de procesos. El progreso se logrará preferiblemente en pequeños pasos llevados a cabo de manera estratégica e incrementando la complejidad en cada uno hasta un cierto nivel práctico de aplicación.  
Se abordará el tamaño y trayectoria del trabajo a realizar de acuerdo con el grado de innovación del proyecto de diseño. El desarrollo de nuevos procesos requerirá inevitablemente recursos para investigación, recabar datos experimentales tanto a nivel laboratorio como en planta piloto.
4. *Pruebas de aptitud.* El ingeniero de diseño determina cómo el concepto de diseño reúne el cumplimiento de los requerimientos. En esta etapa el ingeniero de diseño puede hacer mano de diferentes herramientas de simulación de procesos y en algunos casos incluir plantas piloto que predicen el rendimiento de la planta mediante la colección de datos de diseño requeridos. Esta evaluación además se empleará para la optimización del diseño. El correcto diseño de condiciones de operación estándar tendrá un severo efecto económico.
5. *Diseño de detalle y selección de equipos.* Después de establecer el concepto del proceso o producto seleccionado, el proyecto pasa a la etapa del diseño de detalle,

donde las especificaciones de equipos, medios de almacenamiento, enfriadores, bombas e instrumentos son determinados. Es aquí donde el ingeniero de diseño se integrará grupos multidisciplinarios para desarrollar a detalle cada parte del proceso.

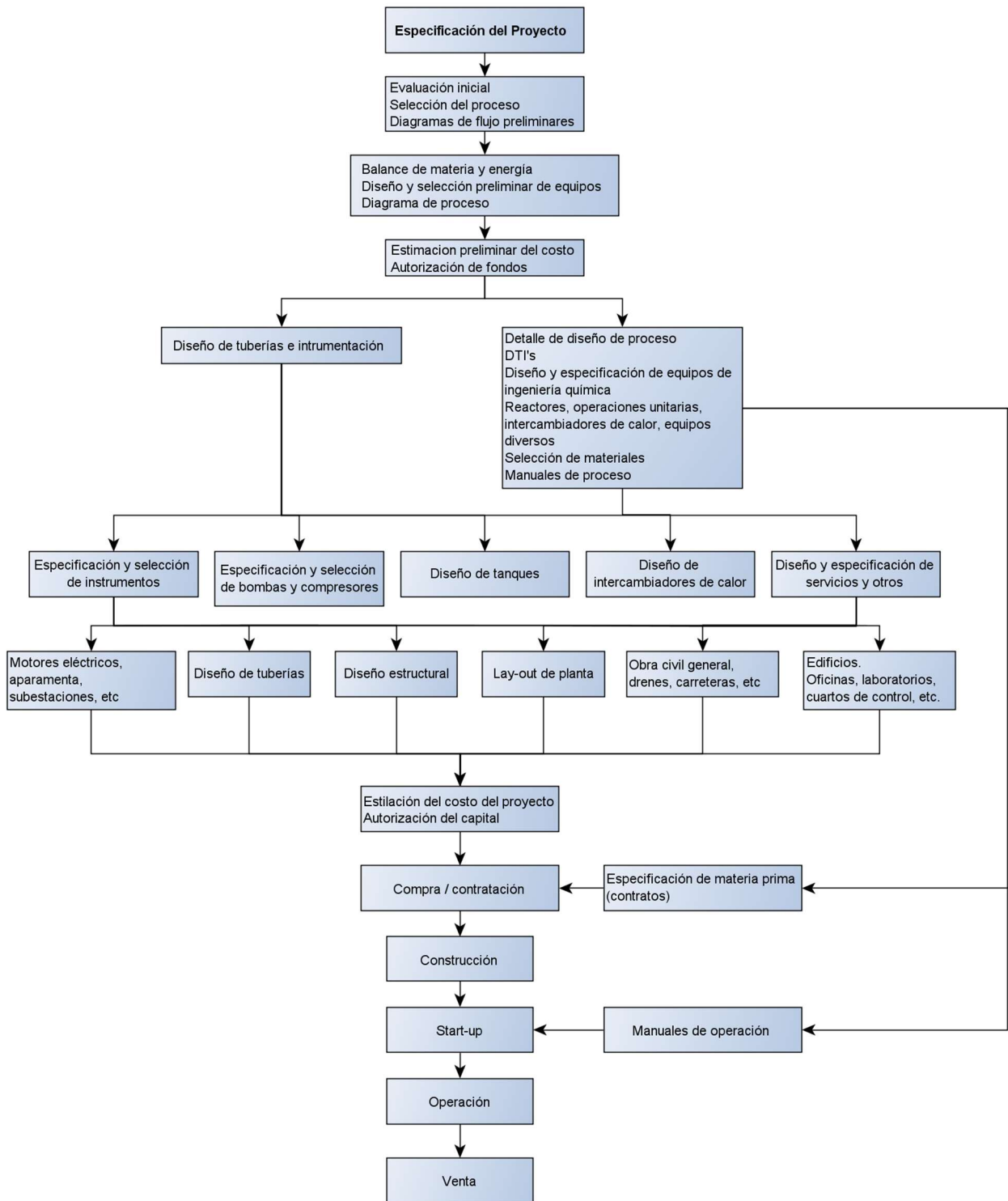


Figura 19. Estructura de un proyecto de ingeniería química, de [53].



6. *Evaluación económica, optimización y selección.* La evaluación económica implica el análisis de capital y los costos de operación del proceso para proyectar el tiempo de retorno de inversión.
7. *La obtención, construcción y operación.* Una vez concluido el diseño de detalle, los equipos pueden ser adquiridos y la planta puede ser construida. Finalmente, una vez que la planta está construida y ha comenzado a operar de acuerdo con estándares de operación creados. Un sistema de mejora continua deberá ser establecido a fin de resolver los problemas que surgirán en las etapas de vida en la operación del proceso.

## 2.5 Ingeniería verde

La ingeniería verde es el diseño, desarrollo e implementación de nuevos productos y procesos para la reducción o incluso eliminación de la generación de sustancias y procesos que afectan la salud humana y al medio ambiente. Paul Anastas y Julie Zimmerman desarrollaron doce principios de ingeniería verde dirigidos al diseño, inspirados en los siguientes dos conceptos [54]:

1. **Inherencia.** Inherente en lugar de circunstancial.
2. **Análisis de Ciclo de Vida** de todos los materiales comienzan con su adquisición y su movimiento a través de su manufactura, distribución, uso y el fin de su ciclo de vida.

**Principio 1. Los diseñadores deben esforzarse por asegurar que todas las entradas y salidas de materiales y energía sean tan inherentemente inocuas como sea posible.** Dentro de la búsqueda de la minimización de los efectos negativos de las sustancias intrínsecamente peligrosas, actualmente la industria se enfoca en una serie de recursos que generalmente no son económica, ni ambientalmente sostenibles. Es por eso que este principio se enfoca en la opción de la inherencia, aplicando como guía los siguientes puntos:

1. No emplear sustancias químicas. Dentro de la industria química es preferible económicamente y para la salud emplear métodos físicos antes que químicos, solo hasta agotar las posibilidades físicas se optará por un método químico;
2. Seleccionar materiales menos peligrosos. El diseñador debe esforzarse por usar sustancias de manejo más seguro;
3. Limitar la cantidad de energía que podría liberarse violentamente.

**Principio 2. Es mejor prevenir la contaminación que tratar o limpiar el residuo ya producido.** El término de desecho es asignado a la materia o energía de los procesos y sistemas actuales incapaces de explotarse efectivamente para dar valor agregado.

En la generación y manejo de desechos siempre se requiere la asignación de recursos para su manejo, control y disposición. Este gasto debe evitarse con tecnología orientada a diseños libres de residuos. Afortunadamente, hay varias herramientas disponibles que los ingenieros y químicos pueden emplear para reducir el desecho formado en el proceso.

Para un sistema de reacción, ajustando la temperatura de operación se puede acelerar la reacción e incrementar la selectividad del producto deseado, o bien, si la formación de este se favorece a bajas temperaturas se requerirá el uso de un catalizador que acelere la reacción. Al final el ingeniero

deberá asegurar la separación del producto y reciclar el reactante sin reaccionar al reactor. De este modo se incrementa la conversión global y se produce menos desecho que requiera disposición [55].

**Principio 3. Las operaciones de separación y purificación deberían diseñarse para minimizar el consumo de energía y el uso de materiales.** Los procesos de separación y purificación suelen ser en la mayoría de los casos los procesos más costosos, ya que muchos de éstos requieren el uso de grandes cantidades de disolventes, energía o presión.

En la actualidad los diseñadores deben procurar métodos que requieran menor energía y menor consumo de materiales externos, logrando la separación y purificación de los productos mediante propiedades física/químicamente intrínsecas de los mismos, y así reduciendo el consumo de recursos.

Por ejemplo [56], de la reacción de esterificación del metanol con ácido acético se produce acetato de metilo y agua. Esta reacción está limitada por el equilibrio, resultando una mezcla que contiene varios azeótropos binarios entre los componentes. El proceso de separación tradicional comprende el uso de 8 columnas de destilación, una extracción líquida y decantación [57]. Este proceso puede ser remplazado por una sola unidad donde la reacción está integrada dentro de los procesos de separación [58]. La idea clave es que si uno de los productos, en este caso el acetato de metilo sale en la fase de vapor, y el otro, el agua, en la fase líquida, la conversión por el equilibrio se elimina y los reactivos se consumen completamente en productos, generando ahorros sustanciales sobre el costo inicial del proceso [57].

**Principio 4. Los productos, procesos y sistemas deberían diseñarse para la maximización de la eficiencia en el uso de materia, energía y espacio.** Las mismas herramientas tradicionales del diseño se enfocan a maximizar la eficiencia del proceso. Todas las reacciones deben ser diseñadas para transformar la mayor cantidad del reactante utilizado, con elevadas conversiones, siendo selectivas hacia los productos deseados y con el mínimo de subproductos formados. Los químicos deben ser conscientes de las etapas subsiguientes en una secuencia de síntesis y diseñar la ruta para utilizar el calentamiento (o enfriamiento) que ya se ha asignado a la reacción en una etapa precedente. Además, si puede minimizar la masa de materiales que se mueven dentro de un proceso químico, también está contribuyendo a un ahorro de energía [59].

El incremento de la eficiencia en el uso de espacio y tiempo corresponde al diseño y uso de equipos más pequeños con la misma capacidad de procesamiento, a esto se le denomina *intensificación del proceso*. Recordemos que un buen diseño de proceso incluye también el esfuerzo de monitorear y controlar las condiciones destinadas del diseño, maximizando así el tiempo de vida de los equipos.

**Principio 5. Los productos, procesos y sistemas deberían estar orientados hacia la producción bajo demanda (pull system) más que hacia el agotamiento de la alimentación (Push system).** Similar al sistema empleado en la manufactura Lean, “justo a tiempo” es ajustarse a la demanda del cliente, entregando el producto en el tiempo requerido, reduciendo al máximo el almacenamiento o el manejo de excedentes, con la calidad deseada por el cliente.

**Principio 6. La entropía y la complejidad inherentes deben ser consideradas como una inversión al elegir entre reutilizar, reciclar o rechazar como residuo final.** Esto quiere decir que la complejidad de un material es proporcional a la dimensión de la inversión empleada para generarse. Entonces el

equipo de diseño debe revalorar el costo-beneficio de reutilizar o reciclar dicho material *versus* disponer de éste como un residuo final.

Este concepto de la retención de la complejidad es aplicable en las consideraciones de fin de vida de los productos. Se han visto grandes esfuerzos en el diseño de productos químicos y productos que han reducido o minimizado el impacto en el medio ambiente y la salud humana durante la fase de uso de su ciclo de vida. Esto ha dado lugar a importantes avances en la identificación y suministro de alternativas a productos químicos y productos más eficientes en su uso. Recientemente, este concepto se ha extendido más al considerar el fin de su vida, y centrarse en el diseño de los productos que se degraden de forma natural o diseñados para su reutilización, reciclado y reutilización [60].

**Principio 7. Diseñar para la durabilidad, no para la inmortalidad.** Consiste en diseñar productos para satisfacer el tiempo de vida que requieren para cumplir su función. Y en caso de no poderse reciclar, reutilizar o bien ser la alimentación para otro proceso, pueden ser desechados y reutilizados amigablemente con el medio ambiente.

**Principio 8. Satisfacer la necesidad, minimizar el exceso.** Este principio propone la reevaluación de los factores de corrección que se encargan mayormente de absorber las incertidumbres de los valores usados en un cálculo y asegurar la funcionalidad del diseño, ya que estos factores de corrección representan en muchos casos un mayor consumo energético, de material o de tiempo y espacio.

El diseño de capacidades o capacidades innecesarias (por ejemplo, soluciones de tamaño único) debe considerarse un defecto de diseño.

**Principio 9. Minimizar la diversidad de materiales.** Consiste en minimizar las opciones de materiales para minimizar los procesos y dificultades de la disposición final de los subproductos. Para esto pueden revisarse al menos dos conceptos de diseño habituales: (1) No realizar discusión de alternativas sobre material base, esperando alcanzar prestaciones requeridas mediante aditivos; (2) Seleccionar los materiales únicamente atendiendo a su disponibilidad inmediata.

**Principio 10. Cerrar los ciclos de materia y energía del proceso tanto como sea posible.** Procesos, productos y sistemas pueden ser diseñados aprovechando la materia y energía dentro de la unidad de operación.

La masa y la energía están íntimamente relacionadas en cualquier proceso de producción, ya que por ejemplo un proceso químico puede ser descrito como la forma en que convertimos la masa y la energía en un producto más valioso. En un proceso químico, comenzamos con materia prima (masa) y luego requerimos vapor (energía) para realizar transformaciones químicas y físicas. Como resultado, tendremos típicamente varias corrientes calientes que necesitan ser enfriadas y varias corrientes frías que necesitan ser calentadas. Para lograr esto, uno podría enfriar todas las corrientes calientes con agua fría o refrigerantes, y luego calentar todas las corrientes frías con vapor; pero al hacerlo, se maximizarían los requerimientos totales de energía. La integración de la energía se puede describir simplemente usando corrientes calientes para calentar corrientes frías, y viceversa, antes de que se utilicen servicios adicionales, reduciendo el uso total de servicios [61].

Las ventajas de integrar los ciclos de proceso de los materiales y energía se ven inmediatamente reflejadas en la minimización del uso de recursos externos, que establece un ahorro de diseño en gasto de procesamiento.

***Principio 11. Diseñar para la reutilización de componentes tras el final de la vida útil del producto.***

Los componentes de un producto no siempre son obsoletos al final de la vida útil del producto, para reducir el desperdicio, los componentes funcionales del producto pueden ser recuperados para reusarse o reconfigurarse. Esta estrategia motivará la reducción de iteraciones en la mejora de las posteriores generaciones del producto.

Un gran ejemplo de esto se puede encontrar con el proceso Petretec de DuPont [62]. DuPont ha encontrado una manera de tomar cualquier poliéster y descomprimir el polímero para liberar el monómero virgen, que puede reutilizarse para hacer "nuevos" productos de poliéster de muchos tipos. El proceso puede usarse para recuperar el monómero a partir de corrientes de material mixto que contienen poliéster y se integra fácilmente en instalaciones de fabricación de poliéster existentes. Esto desvía el poliéster de los vertederos o de los residuos a las aplicaciones de la energía, y reduce el impacto ambiental total [63].

***Principio 12. Las entradas de materia y energía deberían ser renovables.*** Las entradas de materia y energía deberían ser renovables en lugar de usar aquellos que se pueden agotar.

La Tierra contiene recursos finitos para apoyar el desarrollo sostenible en el futuro, y al ir incrementando la demanda de estos recursos, la oferta de los mismos disminuye, generando un alza en precio. El uso de materiales y energías renovables pueden ayudar a contrarrestar este efecto.

Por ejemplo, productos químicos de alto volumen de producción como el etileno se están produciendo comercialmente utilizando etanol de caña de azúcar como materia prima. La tela de celulosa regenerada se obtiene a partir de materias primas de madera dura utilizando un proceso de hilado de solvente orgánico para uso en prendas de vestir y otros tejidos. Las fuentes de energía solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica son bajos emisores de gases de efecto invernadero (GEI) y su uso en la fabricación de productos químicos puede reducir la intensidad de GEI de la industria química [64].

## **2.6 Sinergia entre gestión Lean - Green.**

La adición de valor entre los intereses económicos del negocio y los intereses de desempeño ambiental describen el concepto de ecoeficiencia. Ésta se incrementa, reduciendo el impacto ambiental del producto o servicio por medio del ahorro económico. La eco-eficiencia tiene tres objetivos principales: (1) reducir el consumo de recursos; (2) reducir el impacto ambiental a través de la disposición adecuada de desperdicios y (3) la mejora de productos y servicios: proveyendo mayores beneficios a través de la funcionalidad, flexibilidad, y modularidad del producto, proveyendo servicios adicionales y enfocados en las necesidades funcionales del consumidor [65].

En la búsqueda de la ecoeficiencia, ¿Cuáles serán los principios para la gestión enfocada al desempeño ambiental?

En esta era el incremento de la responsabilidad ambiental toma un sentido del negocio hacia implementar iniciativas Green en adición a las iniciativas Lean [66]. El impacto de los niveles de las actividades de gestión Lean en el desempeño ambiental se hacen mediante la extensión de prácticas

ambientales, en consecuencia, se define a Green como el lado positivo de los efectos logrados a través de los esfuerzos por la reducción de los desperdicios y reducción de la contaminación [67, 68].

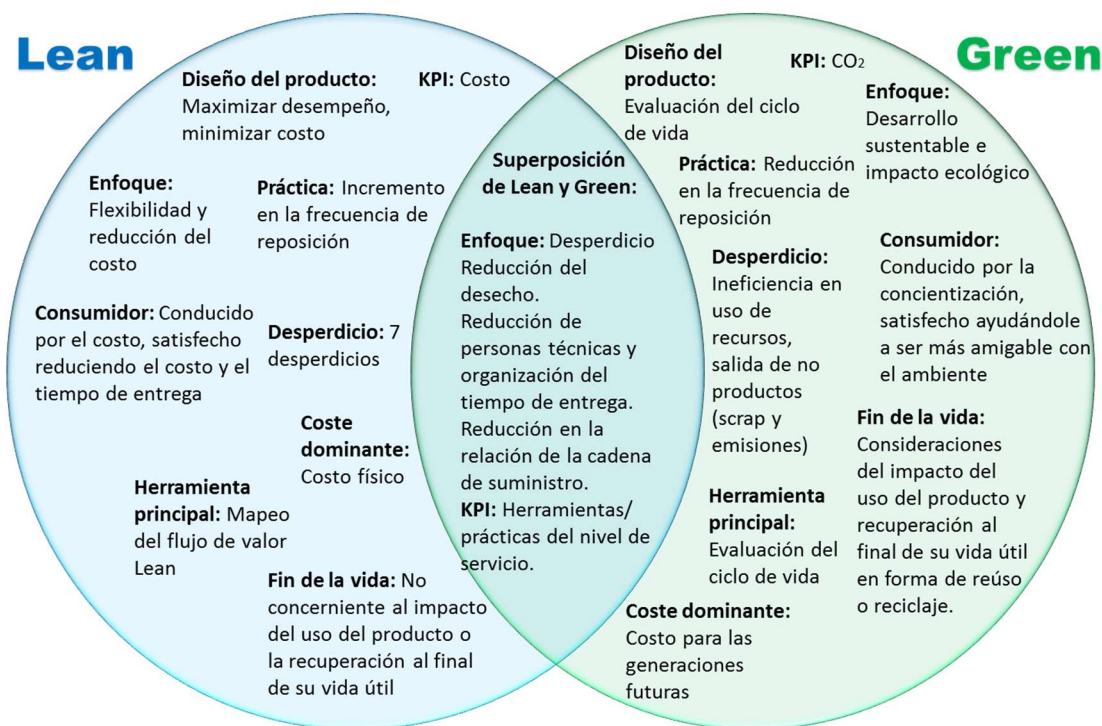


Figura 20. Superposición de Lean y Green [69]

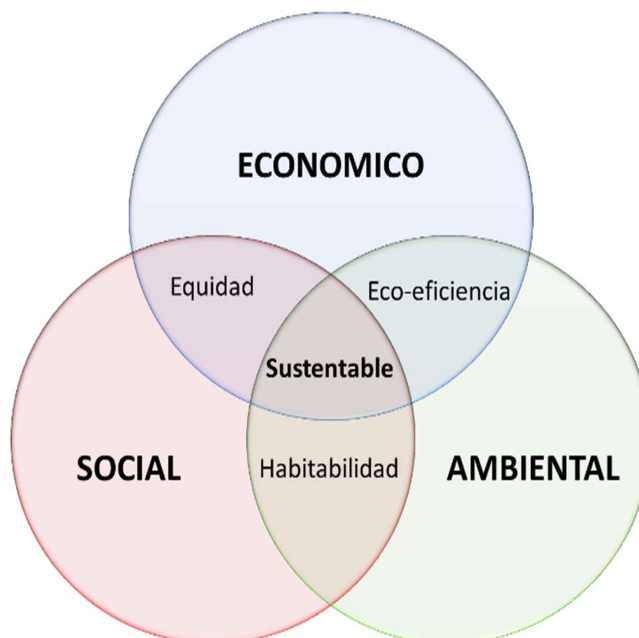
En la figura 20 puede observarse la relación entre los paradigmas Lean y Green. El pensamiento Lean está basado en la *mejora continua* dirigida a la eliminación de desperdicios y la eliminación de actividades que no agregan valor al cliente, las iniciativas Green se preocupan por el ambiente también. Esto incluye el diseño de eco-productos, diseño para el ambiente (DfE), diseño para el reúso, re-manufactura y reciclabilidad, reducción o eliminación de materiales tóxicos, y el uso de materias primas ambientalmente amigables.

## 2.7 Importancia del DFLSS en desarrollo de negocios Lean-Green.

La evolución de las compañías Lean crea oportunidades para la admisión de los principios de manufactura verde, esta es aquella que promueve la adopción de políticas de gestión ambiental para la reducción de los impactos negativos al ambiente, factor clave en el éxito de la transformación verde [70-72]. En adición, actualmente no es suficiente para muchas compañías adoptar Lean para la mejora de sus resultados, sino que ellas además desean ser vistas como gestores de negocios responsables y ser conscientes del impacto que sus actividades tienen en la sociedad, creando corporaciones socialmente responsables [73]. En consecuencia, numerosos autores subrayan el hecho de que la nueva dirección de Lean es la sustentabilidad [74]. Como se muestra en la figura 20, la sustentabilidad está identificada cómo la integración de los aspectos económicos, ambientales y sociales [75].

Por otro lado, algunos autores consideran que las limitantes principales para el enfoque Lean- Green radican en la ausencia que tiene Lean en el análisis y apunte por reducción de las variaciones del

proceso. Otra limitación de lean es la ausencia de prácticas y herramientas Lean asociadas con el uso de herramientas estadísticas y matemáticas avanzadas capaces de recolectar y utilizar datos estadísticos para controlar y monitorear los procesos e identificar otros problemas que aún persisten después de la eliminación de desperdicios [76]. Por consecuencia las limitantes de Lean serán inherentes para el enfoque Lean-Green.



*Figura 21. Las tres dimensiones de la sustentabilidad, de [77]*

Garza Reyes propone el uso de Six Sigma como el “otro” concepto que cumplirá la integración de Lean-Green con el uso de poderosas herramientas estadísticas apuntadas a la reducción de la variación de los procesos para el alcance de proyectos definidos [70].

Lean Six Sigma es una metodología relativamente nueva para la mejora de negocios, creada para una mejora acelerada a través de la eliminación de desperdicios, y al mismo tiempo la mejora de la calidad a través de la reducción de la variación de los procesos [78-81]. Empleando el modelo DMAIC se puede proveer Lean-Green con una mejor especificación basada en proyectos holísticos orientados a la implementación y logros de iniciativas Lean-Green [65]. Con el fin de incorporar aspectos ambientales a la técnica Six Sigma algunos autores proponen varios cambios a las fases de un proyecto DMAIC [82, 83], siempre enfocados a la mejora ambiental de productos o servicios existentes.

## CAPÍTULO III · DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO SUSTENTABLE DE BIOTURBOSINA

---

En este capítulo se desarrolla la propuesta de una metodología denominada *Diseño para la Sustentabilidad* (DPS) dirigida a directivos ejecutivos de empresas chicas y medianas que están considerando expandir su cartera de productos y servicios, y que éstos cumplan con requerimientos de sustentabilidad. Posteriormente en el Capítulo 4, la metodología DPS se aplica en la definición del proyecto de producción de bioturbosina en México.

Se propone que el DPS use una filosofía basada en la sustentabilidad para el diseño del *proceso de negocio* para la producción de bioturbosina, esto facilitará el diseño ecológico, delimitará las fuentes de materia prima, las tecnologías validadas para asegurar el valor de cada operación con elevados estándares de calidad y dará la confiabilidad esperada a los clientes.

### 3.1 Valor del negocio.

Para el desarrollo de la metodología del DPS primero se define el concepto de *valor del negocio*.

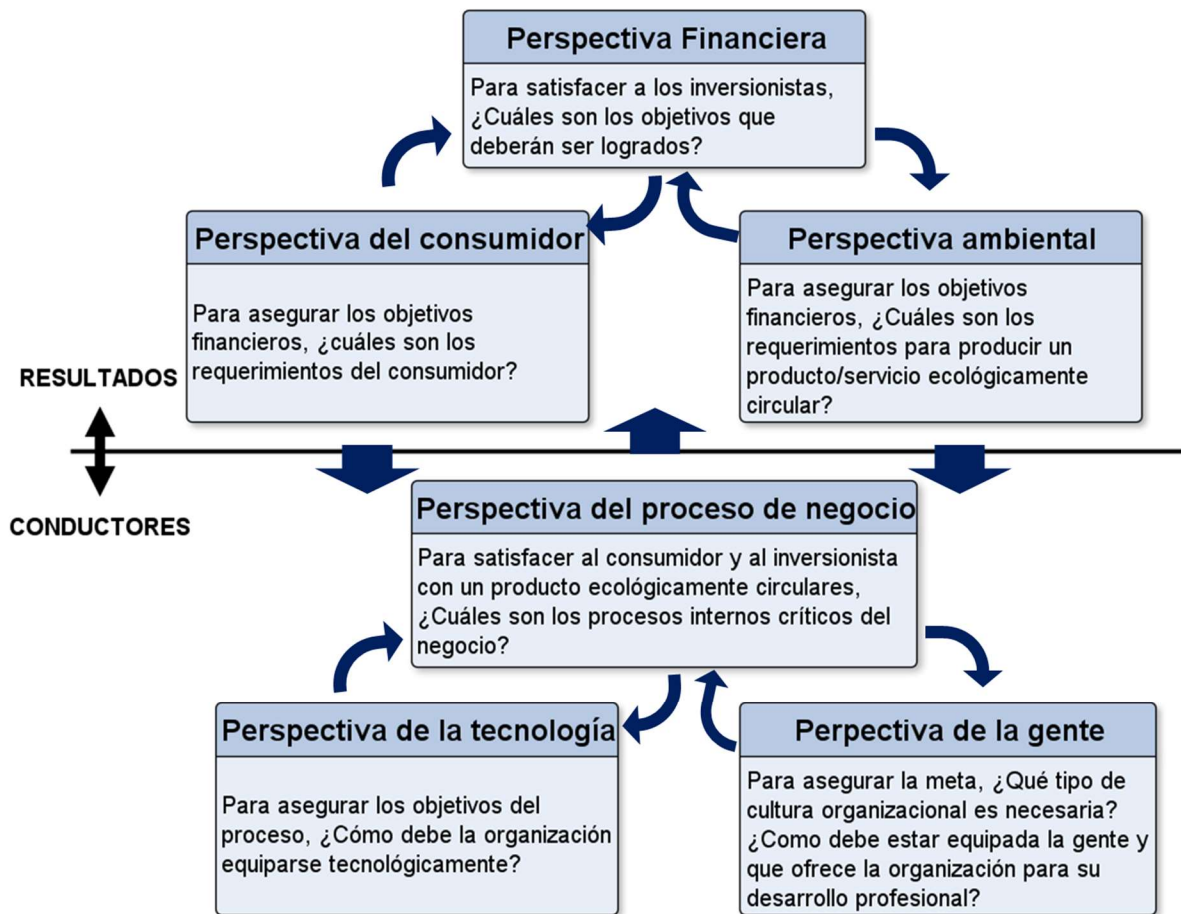
Como se muestra en la figura 22 en este trabajo se propone la creación de resultados de *valor* que satisfagan tres perspectivas:

1. La perspectiva del consumidor. Es el requerimiento del mercado que puede ser satisfecho con un producto o servicio que cumpla la función deseada.
2. La perspectiva ambiental. Es el requerimiento de productos o servicios circulares [84], es decir, productos y servicios con un balance neto neutro de materia y energía emitida y absorbida por el medio ambiente al producir, distribuir y usar un producto. Este requerimiento es el primer objetivo para el desarrollo del concepto de diseño que se expondrá posteriormente en este capítulo.
3. La perspectiva financiera. Es el interés económico de los inversionistas y está ligada directamente a la satisfacción de la perspectiva del consumidor y la perspectiva ambiental.

Los conductores para satisfacer las necesidades de las tres perspectivas son:

1. La perspectiva del proceso de negocio. Es la creación de los procesos productivos del negocio para generar *valor* a las tres perspectivas: financiera, del consumidor y del medio ambiente.
2. La perspectiva de la tecnología. Es la innovación requerida para satisfacer la demanda de los procesos del negocio.

- La perspectiva de la gente se refiere a la cultura operativa necesaria para que los recursos humanos focalicen sus esfuerzos en los intereses del negocio.



*Figura 22. Creación del valor del negocio, modificado de [52].*

Para el desarrollo del DPS los clientes del negocio serán: el consumidor, el medio ambiente y los inversionistas. Por lo tanto, los objetivos financieros se alcanzarán únicamente a través de la creación de servicios de valor para los clientes teniendo un balance entre los beneficios y los esfuerzos realizados dentro del negocio [48, 52].

Una vez definido el valor del negocio, se propone que el director ejecutivo que necesite crear procesos de negocio sustentables siga los pasos propuestos en la metodología DPS, figura 23, que se divide en cinco etapas: Definir, Evaluar y Seleccionar, Diseñar, Ejecutar y Gestionar. Estos pasos son descritos en los puntos 3.2 hasta el 3.6.

La metodología DPS se construyó integrando las herramientas de diseño, planeación y gestión de la producción expuestas en el capítulo 2, y abarca todos los pasos del diseño de *procesos del negocio* desde el planteamiento de un nuevo producto o servicio sustentable hasta la gestión de la producción sustentable del mismo.



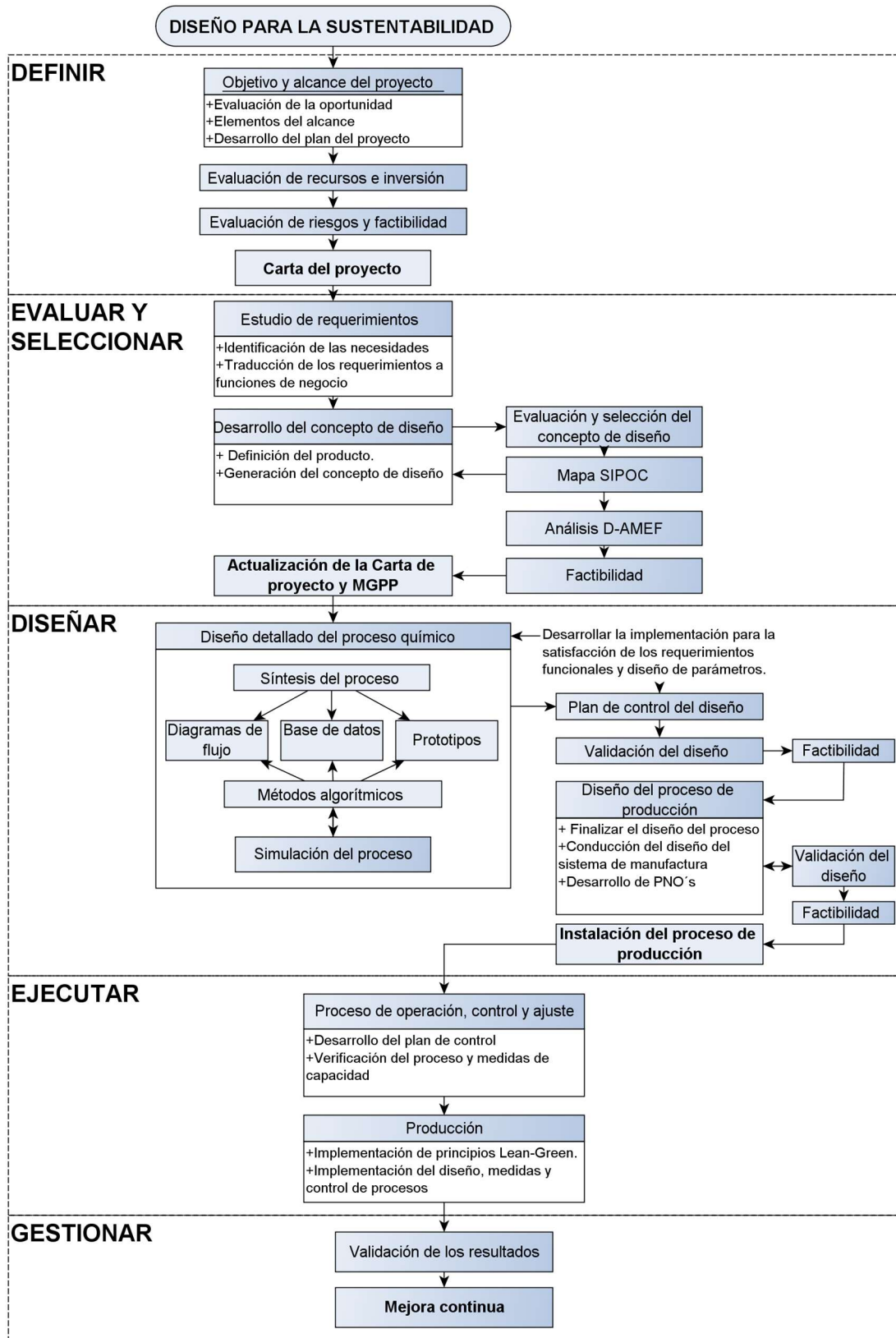


Figura 23. Pasos para el DPS

Aunque la metodología está orientada a directores ejecutivos, muchos temas aquí expuestos competen a la labor de recursos humanos con diferentes especialidades en: marketing, finanzas, ingeniería de diseño, ingeniería de procesos, comercialización, planeación, calidad, entre otros.

Los pasos del DPS usan herramientas existentes actualmente en diferentes disciplinas de aplicación, por ello solo se mencionará el objetivo de cada herramienta para el propósito del DPS sin profundizar en la especialidad de cada labor por parte del equipo del proyecto y de diseño.

### 3.2 Definir

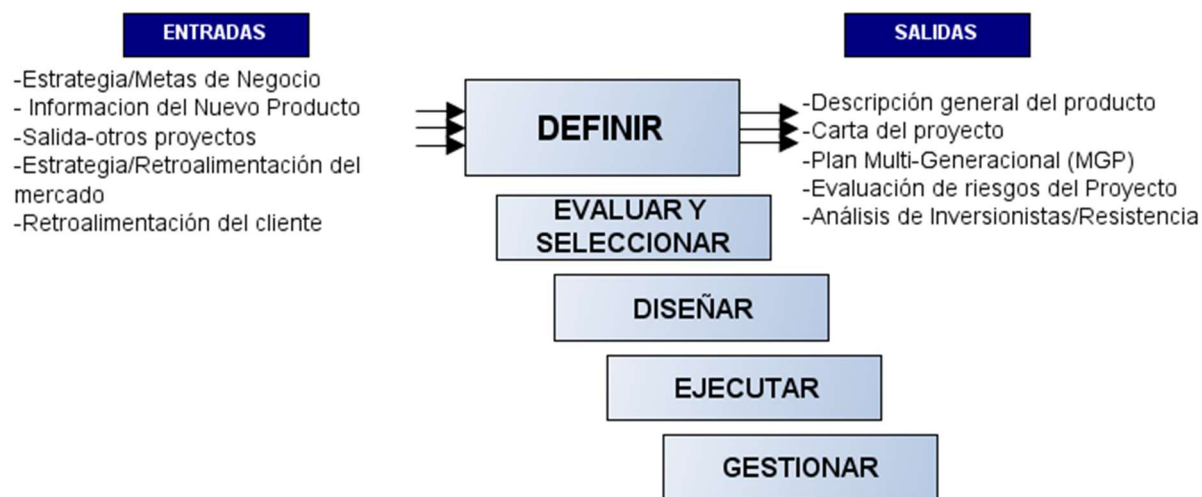


Figura 24. Entradas y salidas de DEFINIR

#### 3.2.1 Objetivo y alcance del proyecto

El interés por el desarrollo y lanzamiento de un nuevo producto o servicio nace del descubrimiento de una nueva tecnología para satisfacer de manera más sustentable una determinada necesidad previamente identificada. Esta fase de ideación se centra en presentar los potenciales productos y servicios detectados a través de un estudio de mercado, con lo que se busca tener una idea de la factibilidad de su comercialización. Hay varias claves para el éxito de esta fase, incluyendo el liderazgo, el tiempo que toma formular o sintetizar con base en nuevas tecnologías este nuevo producto, y el tiempo que toma determinar su viabilidad, ya que en muchos casos funciona bien en un laboratorio, pero presenta muchas dificultades en su industrialización [48, 52, 85].

##### i. Evaluación de la oportunidad

1. Identificación del requerimiento del consumidor y del medio ambiente como oportunidad del negocio.

Se describirá el beneficio de llevar a cabo un proyecto destacando lo siguiente [52]:

- ¿Cuál es la oportunidad potencial de negocio en el mercado?
- ¿Por qué el mercado demanda un nuevo producto o servicio?
- ¿Quiénes serán los clientes potenciales de esta propuesta?

- ¿El proyecto está patrocinado por los líderes de negocio?
- ¿El proyecto se alinea con las estrategias del negocio?
- ¿Cuál es el entorno competitivo del mercado?
- ¿Hay ya una tecnología o capacidad comercial disponible para generar la solución? ¿Y ésta cumple con el requerimiento de *economía circular*?

## 2. Cálculo del beneficio esperado

Se debe exponer el beneficio que puede o no ser monetario de forma cualitativa y cuantitativa.

- Mapear como es la mejora, describirlo en el establecimiento del problema.
- Exponer los impactos económicos negativos de no tomar el proyecto en este momento.
- Ajustar los beneficios en el curso del proyecto.

## 3. Objetivo del proyecto.

Se definirán completamente las expectativas del proyecto, asegurándose que éste se alinea a la estrategia del sector. Revisando la descripción del problema, se determinará si es específico, medible, agresivo, realista y tiempo definido (SMART, por sus siglas en inglés, Specific, Measurable, Achievable, Time-oriented) [86, 87]:

Específico	¿En qué producto o servicio demandado por el mercado se enfocará el proyecto? La definición del producto o servicio debe ser lo más concreto posible.
Medible	Formular la necesidad del mercado en al menos un parámetro de medición.
Agresivo	Las metas propuestas por el negocio deben ser ambiciosas y deben ser entendidas por todas las partes del negocio.
Realista	Los objetivos del proyecto deberán ser alcanzables en el tiempo esperado.
Tiempo definido	Se debe definir el tiempo de cumplimiento del proyecto.

## ii. Elementos del alcance

### 4. Marco del proyecto

En este punto se describirán el producto o servicio [86]:

- Idea del producto/servicio eco-amigable
- Mercado/Cliente objetivo.
- Necesidades preliminares del cliente.
- Visión competitiva.
- Objetivos y metas preliminares.

### 5. Plan multigeneracional del proyecto (MGPP)

Se definirá el producto, los límites del proceso a diseñar, recursos disponibles y se definirá el alcance para las generaciones múltiples del producto/proceso como se muestra en la figura 25.

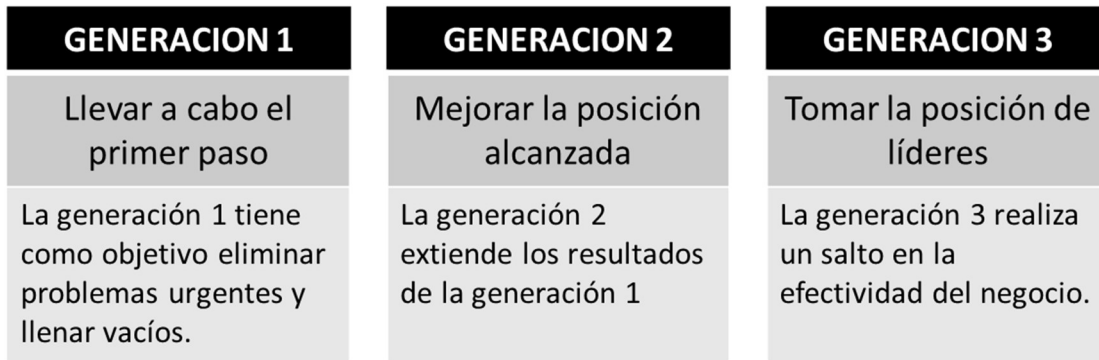


Figura 25. Plan Multi-Generacional del proyecto (MGPP) [87].

Un elemento clave del MGPP (figura 25), es su capacidad para dar seguimiento a la introducción del producto o proceso con versiones mejoradas y derivadas del producto original y entendiendo las capacidades o tecnologías que se requieren para lograr el objetivo a largo plazo. El proceso MGPP tiene tres pasos principales: (1) definir la meta, (2) identificar las generaciones y (3) identificar y categorizar las tecnologías.

6. Mapas de proceso a alto nivel (SIPOC)

La creación de mapas de proceso a alto nivel mostrado en la figura 26 (SIPOC, por sus siglas en inglés: Suppliers, Inputs, Process, Output y Client) ayuda a visualizar a grandes rasgos (alto nivel) el diagrama de la cadena de valor y que posteriormente evolucionará al ciclo de vida del producto. Este es el primer paso para la realización de un diagrama de flujo del *proceso del negocio*, ver figura 26.

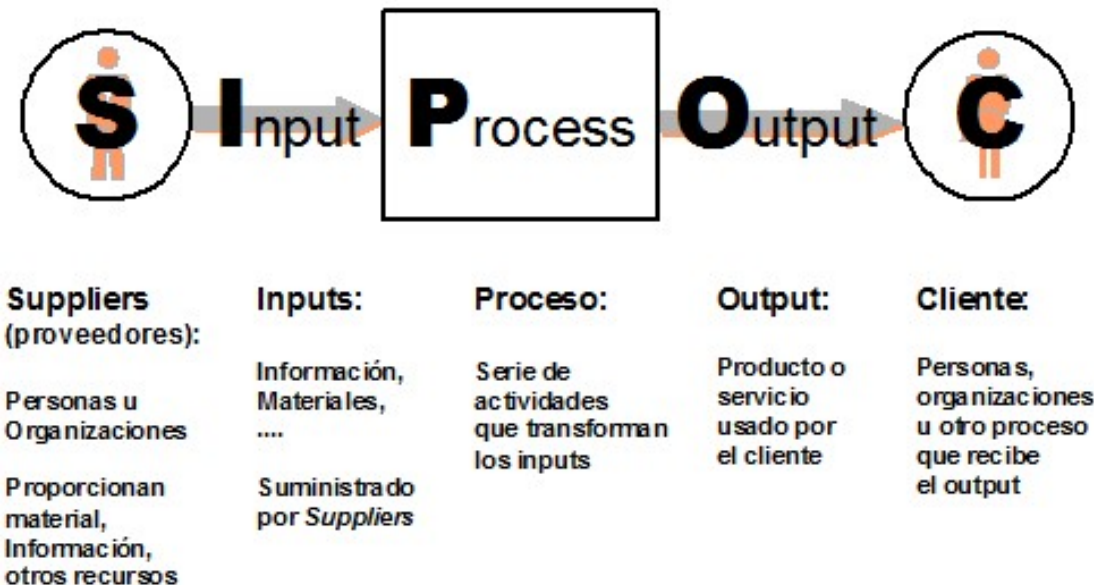


Figura 26. Mapa SIPOC [88].

El procedimiento para realizar un SIPOC es muy sencillo: se trata de listar los requerimientos funcionales del proyecto y distinguir a los Proveedores (Suppliers), Entradas (Inputs), Proceso,

Salida (Output) y Clientes. En esta etapa del proyecto este diagrama no contará con información detallada, solo permitirá exponer la ubicación dentro del negocio de la cadena de valor.

### iii. Desarrollo del plan del proyecto

#### 7. Desarrollo de tareas detalladas y metas del proyecto de diseño.

El plan de proyecto es un documento formal usado para gestionar la ejecución del proyecto, para esto es necesario desarrollar un calendario del proyecto (diagrama de Gantt) que liste las fechas planificadas para realizar las actividades [85]. Este diagrama se puede realizar en programas como Microsoft Project, Open Project, etc.

#### 8. Creación del equipo de proyecto.

El desarrollo del diseño para la sustentabilidad es posible con el soporte de una infraestructura organizacional. La administración de los recursos humanos requiere trabajo de gestores efectivos en el proyecto. Los roles clave propuestos para gestionar el proyecto con base en la metodología DPS son los siguientes [52][83]:

**Patrocinadores ejecutivos.** Tienen la visión de lograr los objetivos de crecimiento a través del diseño y la innovación tecnológica. Estas personas deberán proveer de la dirección para integrar el DPS con los procesos de diseño y liderar los esfuerzos de cambio. Es su responsabilidad remover los obstáculos y bloqueos que puedan estar en contra del DPS. El ejecutivo debe proveer la guía y asesoría al gerente de negocio.

**Gerente de negocio.** Proporcionará día a día la dirección y gestión del programa DPS. Es responsabilidad de este individuo trabajar en estrecha colaboración con los propietarios de los procesos de diseño y desarrollar la estrategia de despliegue del DPS asegurando la disponibilidad de los recursos.

**Gerente del proyecto de diseño.** Su principal responsabilidad será identificar y estudiar los proyectos del DPS. Dependiendo del tamaño y el alcance, ya que un nuevo producto o servicio a ser introducido podría ser delimitado como un solo proyecto de diseño o múltiples proyectos de diseño. Liderarán los proyectos de diseño a través de la aplicación de los principios DPS. En esta capacidad, trabajarán estrechamente con el equipo principal responsable de los proyectos de diseño, así como el equipo ampliado. El diseñador DPS tendrá habilidades de gestión de proyectos, habilidades de liderazgo, conocimiento y experiencia de aplicar los principios DPS y cambiar las habilidades de gestión conforme a los objetivos esperados para cada equipo de trabajo.

**Equipo principal.** Se integra de un líder de equipo, expertos en la materia y otros que trabajarán directamente en el proyecto de diseño. Este equipo será el responsable de la ejecución del proyecto. Por lo general, hay un equipo central responsable del sistema o subsistema. Para ejecutar el proyecto DPS de forma rigurosa. Los diseñadores DPS servirán como mentores de este equipo.

**Equipo extendido.** Este equipo apoyará las actividades del equipo principal. Su objetivo principal es apoyar al equipo principal y proporcionar experiencia para satisfacer una necesidad especializada. Dependiendo de la naturaleza y el alcance del trabajo que realizan, este equipo puede necesitar aprender DPS.

**Líder de calidad.** Su papel dentro del proyecto es asegurar la implementación de un sistema de mejora continua y el diseño del proceso con un enfoque de calidad en toda la cadena de valor. Es experto en las técnicas de evaluación de desempeño del producto o servicio, siendo el principal líder en el cumplimiento de las especificaciones y certificaciones.

**Director financiero.** Se encargará de la planificación económica y financiera de la compañía. Es quien decide la inversión, la financiación y el riesgo con el objetivo de conseguir que aumente el valor de la empresa para sus propietarios. Asistirá en los plazos de ahorro y validará estos ahorros esperados en cada etapa de la implementación de nuevas mejoras.

**Líder de responsabilidad social y ambiental.** Asegurará la implementación de las legislaciones que comprenden las relaciones en las que encaja el negocio (cadena de suministro, industria, regiones y ecosistemas). Colaborará con las operaciones ambientales descendentes, esto es en las relaciones de trabajo con los proveedores, clientes y hasta competidores. Posee habilidades para generar alianzas con el fin de explorar nuevas oportunidades de mercado y construir mejores soluciones a problemas sociales y ambientales.

El equipo de proyecto se organizará de forma estratégica para la asegurar el éxito del proyecto.

#### 9. Proyección de recursos humanos.

En cada una de las etapas del diseño se incorporará personal con diferentes competencias para dar cumplimiento a los objetivos de cada etapa en el tiempo pactado. El equipo de trabajo deberá proyectar el volumen de personal requerido para cada etapa y las competencias necesarias de cada uno. Las actividades de cada personal serán fijadas aquí proyectando también las responsabilidades de cada recurso humano. Esta información se detallará durante el desarrollo del proyecto.

#### 10. Estimación de costos.

Esto consiste en hacer una aproximación del costo de los recursos necesarios para completar las actividades del proyecto [85]. Estas estimaciones se hacen con base en la información disponible en ese momento (alcance, resultado esperado, etc.). Esto no es una revisión detallada, sino una aprobación inicial. Estas estimaciones se revisan a medida que avanza el proyecto y se dispone de datos más precisos [48].

#### 11. Análisis de inversionistas.

Dentro de la cadena de valor generada en esta primera etapa se listarán los posibles inversionistas o interesados y se determinará el apoyo requerido de cada parte interesada para posteriormente evaluar la resistencia actual y el plan de mitigación. Esta herramienta de evaluación es conocida dentro del DFLSS como *administración de inversionistas* [87], y se ocupará como esta propuesta por la referencia aquí mencionada.

#### 12. Evaluación de riesgos y factibilidad.

Se identificarán y se dará prioridad a los riesgos potenciales para el cliente, la empresa y el medio ambiente mediante la observación de las combinaciones de probabilidad e impacto. La figura 27 muestra cómo construir la matriz de evaluación de riesgos y cómo asignar actividades de contingencia que prevengan los riesgos identificados por orden de importancia [85].

De los resultados obtenidos en la evaluación de riesgos se determinará la prefactibilidad del proyecto.

Como resultado de esta etapa del proyecto se elaborará la *Carta del Proyecto* que contenga la siguiente información: caso del negocio; descripción del producto/servicio; objetivo del proyecto; plan del proyecto y el equipo del proyecto. La *Carta del Proyecto* junto con el análisis de riesgos se expondrá ante los inversionistas para determinar la continuidad del proyecto.

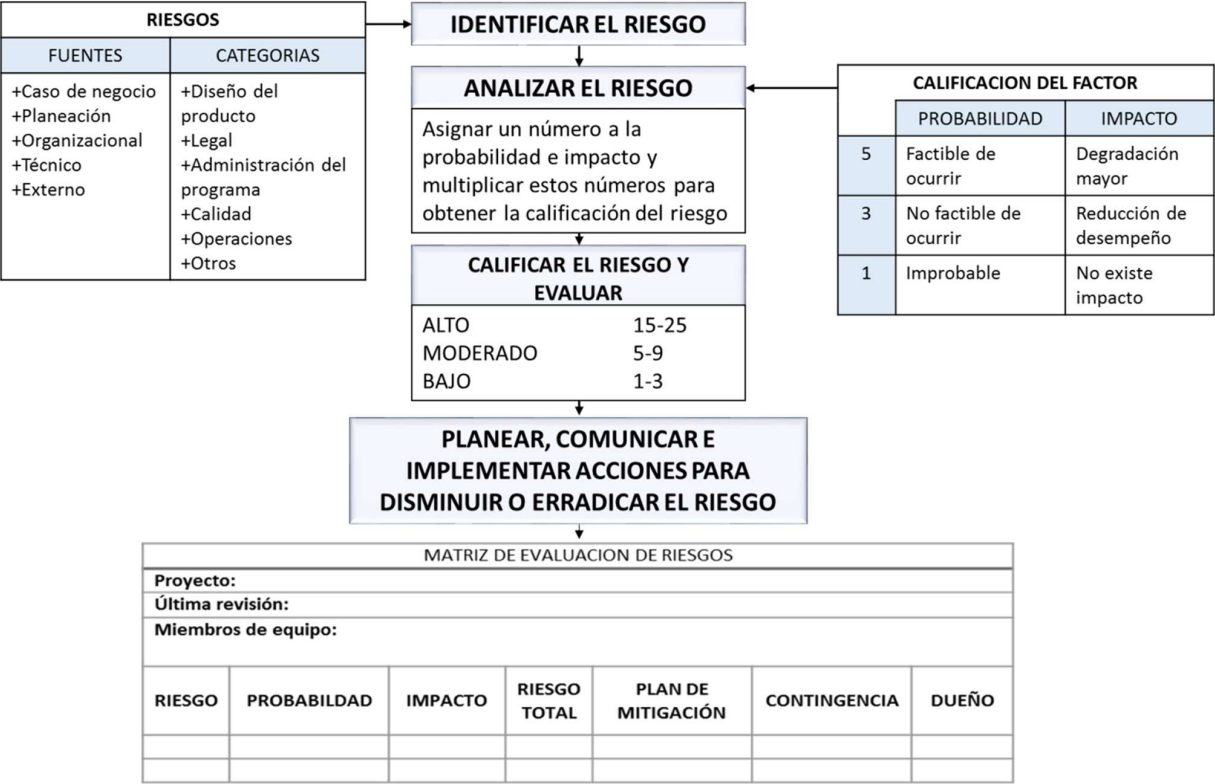


Figura 27. Construcción de la matriz de evaluación de riesgos, construido de [85, 86] [87].

### 3.3 Evaluar y seleccionar

En esta etapa se segmentará, y evaluará el mercado al que se va a dirigir el nuevo producto o servicio, y se seleccionará el producto y tecnología satisfactor de la demanda del mercado. Para esto, los clientes requieren ser evaluados en las primeras etapas del proyecto.

Durante el desarrollo del concepto inicial y las etapas de definición del producto, la investigación de los clientes, los estudios de factibilidad y la investigación costo/beneficio pueden ser mejoradas.

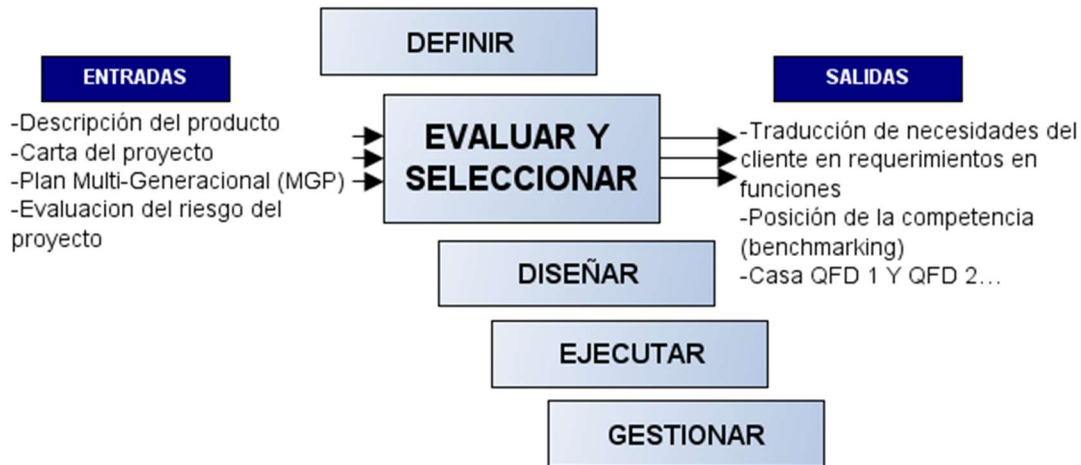


Figura 28. Entradas y salidas de EVALUAR Y SELECCIONAR

### 3.3.1 Estudio de los requerimientos del negocio, el consumidor y el ambiente.

Con la acepción actual del término *calidad*, como satisfacción de las necesidades y expectativas del cliente, esto se entiende como las características que ha de poseer un producto para satisfacer las necesidades y expectativas del cliente [48, 52].

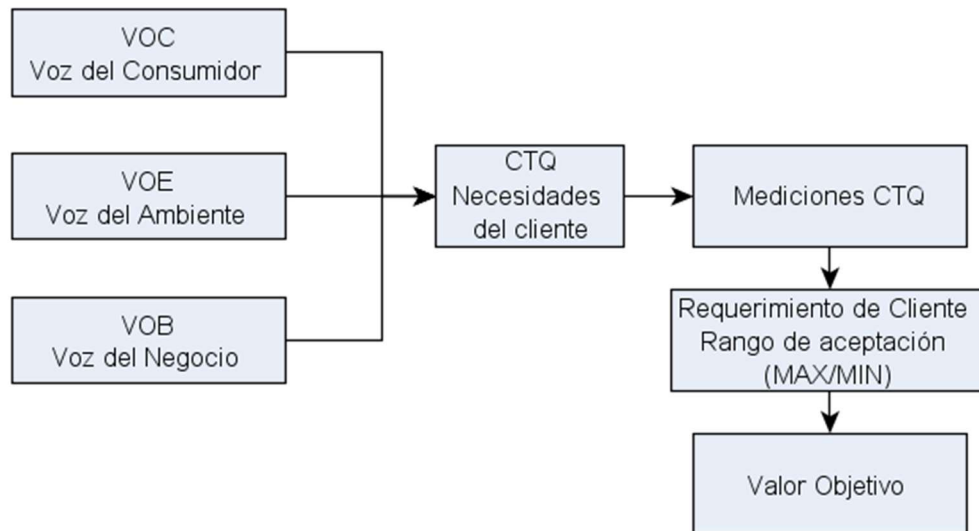


Figura 29. Secuencia del estudio y análisis de la voz del cliente, modificado de [86]

Para el DFS se deben trasladar las demandas, expresadas y latentes del cliente a las especificaciones del producto/servicio. Así que ya no basta con producir de acuerdo a especificaciones basadas en calidad y eficiencia de desempeño; sino que éstas deben tomar en cuenta lo que demanda el cliente e integrar, desde la fase de diseño de un producto o un servicio, además de las demandas, las necesidades y expectativas. El resultado de la identificación de los requerimientos se denomina en este trabajo *voz del cliente* y se clasifica en tres tipos: voz del consumidor (VOC), voz del medio ambiente (VOE) y voz del negocio (VOB) [33, 40-41]. En la figura 29 podemos observar que la captura



de la *voz del cliente* se traducirá en necesidades del cliente y posteriormente en mediciones CTQ que son los parámetros técnicos que servirán a los ingenieros de diseño para crear el proceso químico.

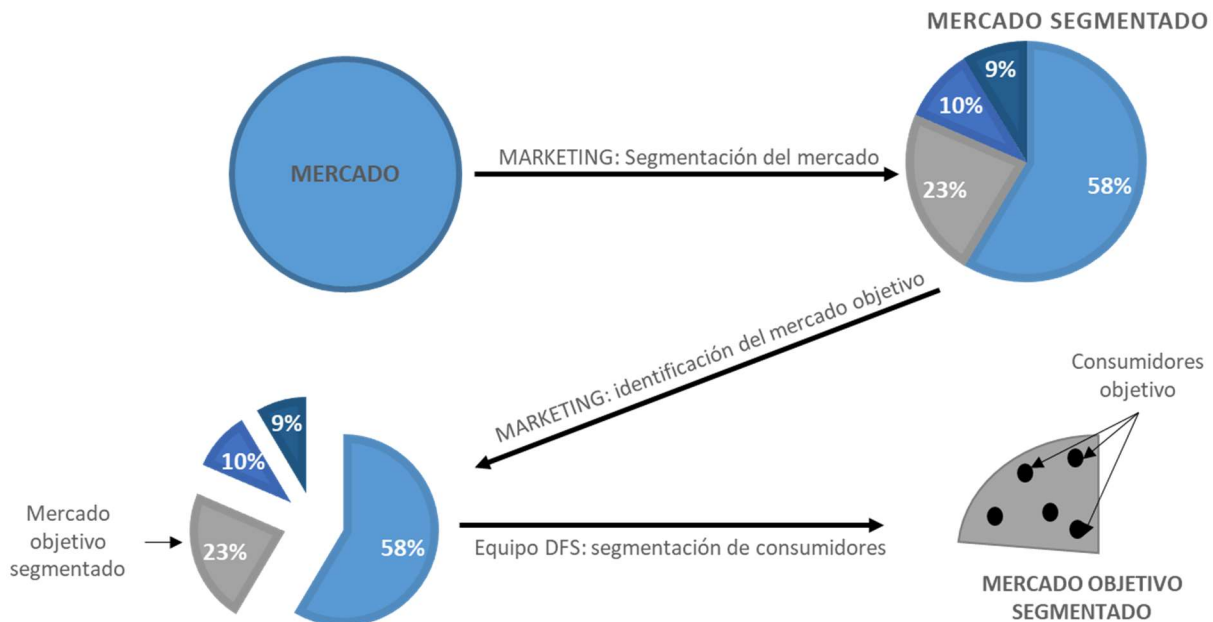
Los términos aquí ocupados se comprenderán en los puntos posteriores:

**i. Identificación de las necesidades y requerimientos.**

Para dirigirse a los clientes adecuados es necesario identificarlos, enumerando los clientes potenciales a los que va dirigido el producto o servicio:

13. Identificación y clasificación de consumidores

Hay que enfocarse en el consumidor más importante para garantizar el éxito del proyecto. Para identificar el mercado objetivo y consumidor objetivo, como se muestra en la figura 30, el mercado se segmenta, posteriormente se selecciona un segmento y finalmente se selecciona el consumidor relevante dentro de este segmento del mercado[87]. La selección del cliente puede hacerse por las siguientes características: cliente más exigente (pueden ser usuarios principales); cliente clave (puede ser de mayores utilidades, más estratégico, otros) y todos los clientes (incluirlá todas las necesidades pero quizá sea necesario agrupar posteriormente) [86].



**Figura 30. Segmentación del mercado [87].**

14. Identificación de los clientes internos y externos.

Una vez seleccionados los consumidores objetivo se mapeará la cadena de valor, ver figura 31, y se seleccionará el concepto del producto y servicio que satisface el requerimiento del mercado, esto puede realizarse con una lluvia de ideas.

El equipo de diseño ocupará el benchmarking del D4S propuesto por la UNEP [89], para seleccionar un producto que satisfaga las necesidades iniciales del mercado planteadas en la *Carta del Proyecto* y evaluará el fin de la vida útil del producto en un mapa SIPOC para asegurar que las entradas y salidas al ambiente sean neutras y que las emisiones del producto no afecten de forma negativa al medio ambiente.

Una vez garantizado el ciclo cerrado del producto se identificará la función del negocio dentro de la cadena de valor identificando a los clientes internos y externos del proceso del negocio en un diagrama SIPOC: Los clientes externos pueden ser centros de servicio, organizaciones independientes de venta/servicios, organizaciones regulatorias, sociedades especiales. Siempre se incluirán los distribuidores y usuarios finales.

Los clientes internos pueden estar en la producción y la manufactura, servicios de diseño, tiendas de mostrador y otras facilidades, finanzas, relación de empleados, grupos de diseño, organización de distribución.



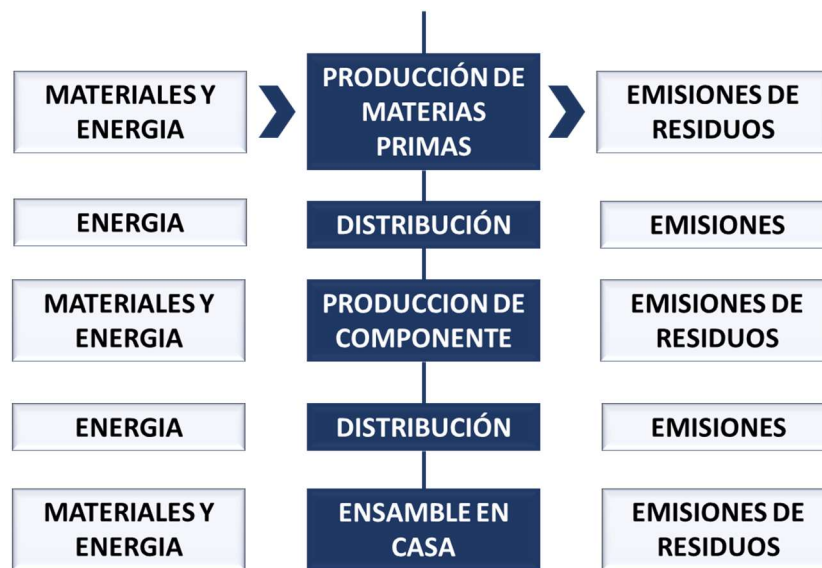
**Figura 31. Ciclo de vida útil del producto**

#### 15. Reunir de las necesidades del cliente.

Las expectativas del cliente y el grado en que estas se cumplen forman parte de la satisfacción del cliente. El estudio de mercado se reúne en dos métodos: (1) a través de información indirecta, obtenida por las encuestas, cuestionarios, competitividad de benchmarking y proyecciones, simulador de uso del cliente, revistas de negocio y el medio, y (2) mediante el compromiso directo del cliente, focalizado en grupos, consejo de consumidores, observaciones de campo y ensayos.

Entonces, ¿cuáles son algunas de las dimensiones claves deseadas por los consumidores? Para capturar estos requerimientos, el equipo de proyecto escaneará el ciclo de vida del producto y cualquier interacción del consumidor con el producto durante su ciclo de vida. Varias de estas expectativas se incluyen durante el proceso de adquisición del producto, entrega del producto, uso del producto, mantenimiento del producto, disposición del producto, fácil adquisición, asequibilidad del producto, rendimiento, expectativas de percepción en el uso del producto.

La identificación de los requerimientos ambientales se realizará usando herramientas del análisis ciclo de vida (ACV) que estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio [90]. Ocupando como una extensión del SIPOC, un modelo de la entradas y salidas del ciclo de vida del producto mostrado en la figura 32, que incluye la compra de materias primas, producción, distribución y transporte, uso y consideraciones con respecto al final de la vida útil. Cada fase del ciclo de vida del producto consume materiales y energía (entradas) y libera desechos y emisiones (salidas) al ambiente [89]. Como objetivo y alcance para el nivel actual del proyecto DPS se evaluará la función del negocio dentro de la cadena de valor del nuevo producto o servicio y la identificación de cargas ambientales se clasificarán de acuerdo a la categoría de impacto en las áreas: salud humana, entorno natural, entorno socio-cultural y recursos naturales.



*Figura 32. Modelo de entradas y salidas del ciclo de vida del producto [89].*

El alcance de las herramientas ocupadas del ACV en esta etapa del DFS se limitarán por la información disponible en este punto, sin embargo, permitirán al negocio identificar algunas áreas de impacto y asignar importancia a las funciones del DPS. Más aún, permitirá que el negocio visualice la clasificación de los indicadores ambientales que ayudarán a la gestión de la mejora continua propuesta más adelante en este trabajo.

Las necesidades del negocio son quizá las más fáciles de hallar debido a que son directamente expresadas por los inversionistas. Algunos de estos requerimientos incluyen: fácil manufactura; fácil de reparar; elevada barrera para el logro de su imitación; bajo costo de producción,

reparación, mantenimiento, re-uso y reciclaje; altos niveles de diferenciación contra el mercado actual; bajo riesgo y fácil de comercializar [48].

ii. **Trasladar la voz del cliente a requerimientos del producto/ servicio medibles y funcionales.**

La voz del cliente como se mencionó anteriormente se describe como la identificación clave de los requerimientos para el diseño ideal. El equipo de trabajo usará un método llamado Despliegue Funcional de la Calidad (QFD, por sus siglas en inglés Quality Function Deployment), para coleccionar y analizar las necesidades del cliente Y así asignar medidas de satisfacción, funciones y parámetros en el diseño del producto o servicio. Como se ve en la figura 33 el QFD está dividido en cuatro niveles y cada nivel está representado por una *casa de calidad*:

Casa de calidad I. Planeación de los CTQ.

Casa de calidad II. Requerimientos funcionales.

Casa de calidad III. Planeación de los parámetros de diseño

Casa de calidad IV. Planificación de las variables del proceso

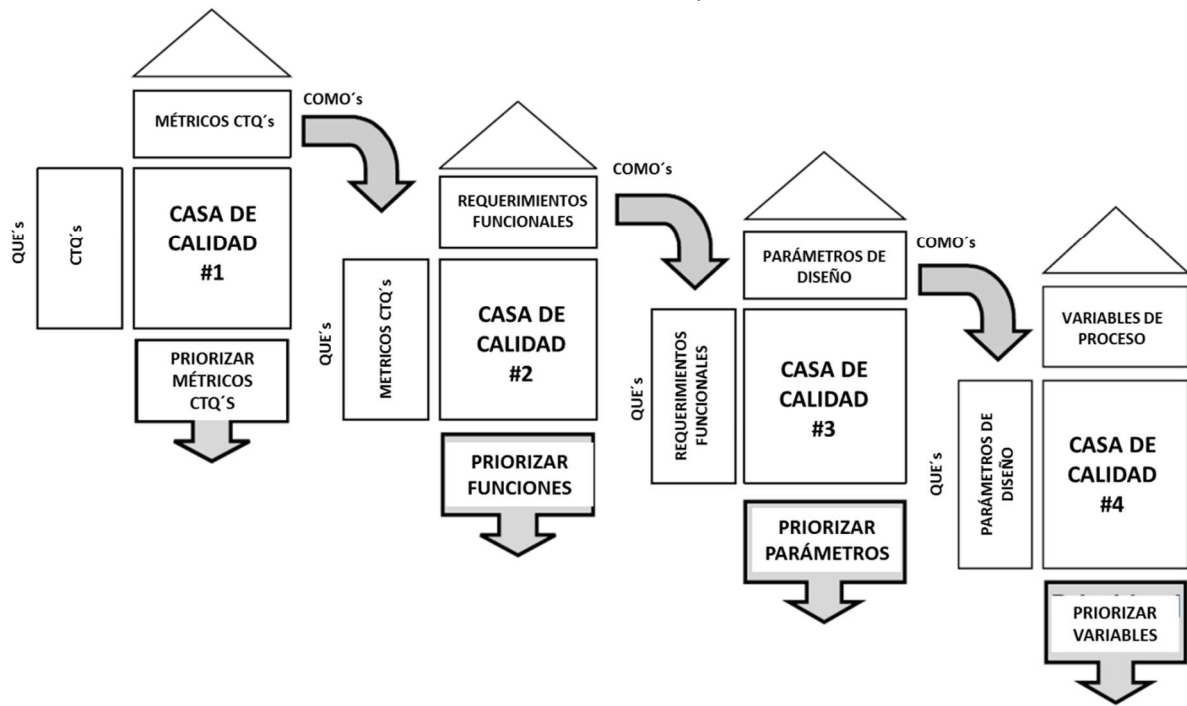


Figura 33. Fases del Despliegue Funcional de la Calidad (QFD) [48].

Los componentes que constituyen la primera casa de calidad (QFD-1) son los mostrados en la figura 41, donde los **QUÉs, Necesidades del Cliente** son los requerimientos CTQ (por sus siglas en inglés, Critical to Quality) que se desarrollarán como sigue:

16. Estructurar la voz del cliente

Una vez captadas las necesidades del cliente deberán ordenarse y resumirse en agrupaciones en un *diagrama de afinidad* [48], ver figura 34, basadas en su contenido concreto, representando a los conjuntos por las necesidades principales.



Figura 34. Diagrama de afinidad

Basados en la estructura del diagrama de afinidad, los requerimientos serán introducidos en un diagrama de árbol, ver en figura 35. El diagrama de árbol se conforma de tres niveles de necesidad: (1) necesidades del cliente, la pregunta clave es ¿cuáles son las expectativas del cliente? (están localizadas en el diagrama de afinidad como necesidades principales); (2) conductores de calidad, la pregunta claves es ¿Cómo se puede satisfacer este requerimiento? y (3) Requerimientos de calidad-CTQ, la pregunta clave es ¿Cómo se puede medir cada uno de los conductores de calidad? [48].

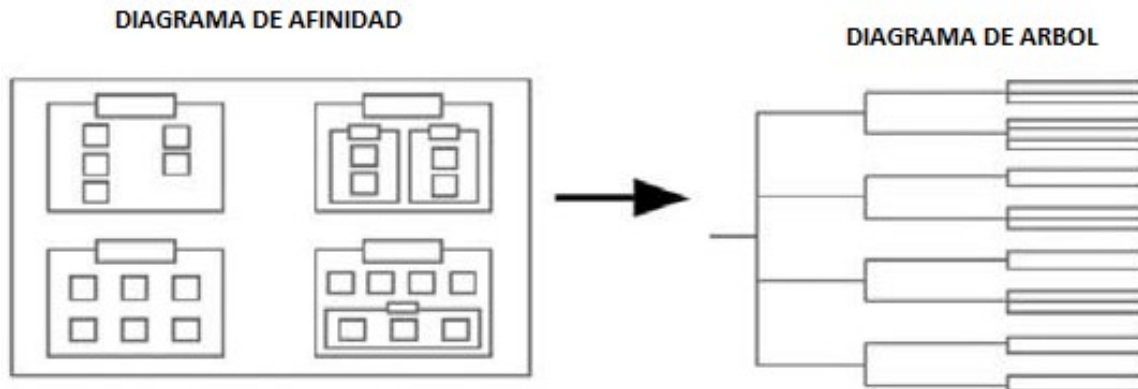


Figura 35. Traslación del diagrama de afinidad al diagrama de árbol [87].

#### 17. Priorizar los requerimientos CTQ.

Los requerimientos CTQ se clasificarán dentro del modelo Kano, donde según la figura 36 tres son los factores de necesidad:

**Los factores básicos o necesidades esperadas** son los requisitos mínimos esperados por el cliente, son características, funciones, atributos mínimos que el cliente espera a partir de comprar un producto o servicio. La inherencia del producto deberá incluirse como una necesidad básica del consumidor.

**Los factores de desempeño o necesidades de desempeño** se identifican como aquellas características y funciones que brinda el producto para satisfacer sus necesidades.

**Los factores de exaltación o necesidades emocionales** son los atributos del producto que sorprenden al cliente y generan placer, a partir de estos atributos una empresa de cualquier tipo puede distinguirse de sus competidores de una manera positiva [48, 52].

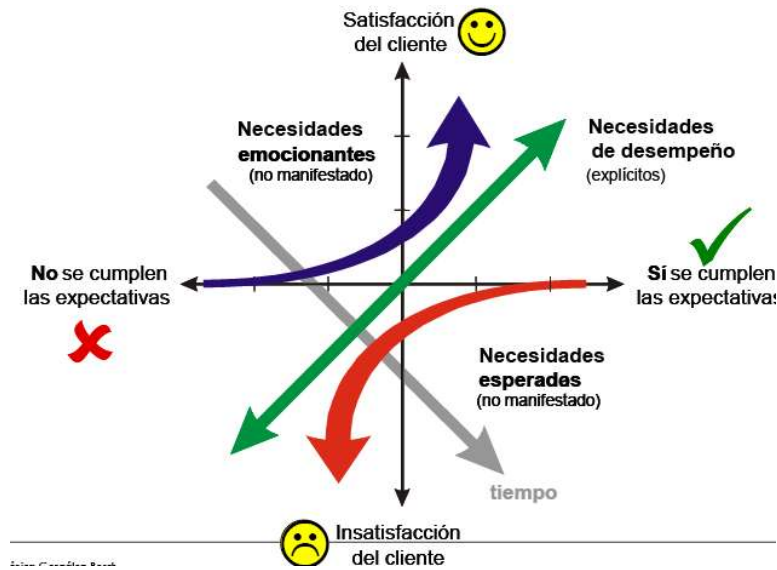


Figura 36. Modelo de Kano

La clasificación Kano se hará usando una matriz de respuestas a la formulación de preguntas negativas y positivas, siguiendo los siguientes pasos, figura 37:



Figura 37. Pasos para la clasificación de CTQ en modelo Kano, construido de [87].

Una vez clasificadas las necesidades de acuerdo a Kano se ponderará la importancia relativa de cada requerimiento CTQ.

Los requerimientos CTQ calificados de acuerdo a Kano como factores básicos no se someterán a esta evaluación, esto es porque estos requerimientos siempre tienen la máxima prioridad en el DFS. Por lo tanto, el desarrollo del diseño debe cubrir la satisfacción total de estos requerimientos.

Los CTQ que tuvieron una clasificación de *satisfecho* y *deleitado* se someterán a una evaluación de importancia. Se medirá la importancia relativa de estos requerimientos CTQ haciendo una matriz de pesos relativos, ver figura 39, con los siguientes pasos [87]:

1. Colocar los requerimientos CTQ en filas y columnas.
2. Asignar un peso ( $W_{CTQ_i-j}$ ) a cada CTQ respecto a otros CTQs en la siguiente escala, figura 38:

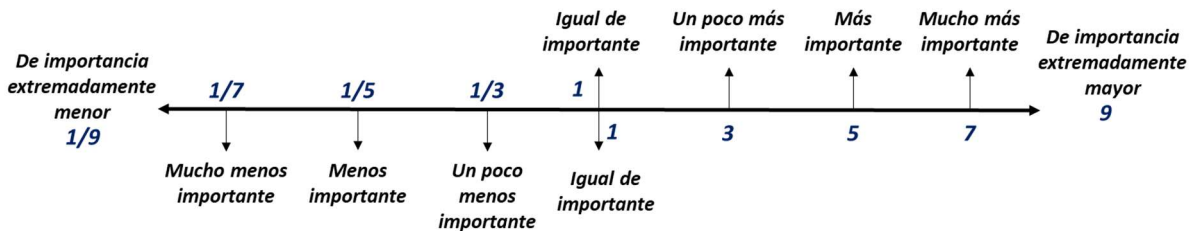


Figura 38. Relación de peso de los requerimientos CTQ

3. Sumar los pesos por columna y anotar el total acumulado ( $W_{CTQ_j}$ ).
4. Asignar un peso relativo a cada celda respecto al acumulado dividiendo:  

$$W_{R_i-j} = W_{CTQ_i-j} / W_{CTQ_j}$$
5. Sumar los pesos relativos de cada fila (importancia relativa):  $W_{R_i} = \sum W_{R_i-j}$ .
6. Estimar el peso relativo de cada requerimiento CTQ en porcentaje dividiendo cada peso relativo entre el peso relativo total:  $\%WR_{CTQ_i} = W_{R_i} / W_{R-T}$

Requerimientos	CTQ 1	CTQ 2	CTQ 3	CTQ 4	Importancia relativa	Peso relativo [%]
CTQ 1	$\frac{W_{CTQ,1-1}}{W_{R1-1}}$	$\frac{W_{CTQ,1-2}}{W_{R1-2}}$	$\frac{W_{CTQ,1-3}}{W_{R1-3}}$	$\frac{W_{CTQ,1-4}}{W_{R1-4}}$	$W_{R1}$	$\%WR_{CTQ1}$
CTQ 2	$\frac{W_{CTQ,2-1}}{W_{R2-1}}$	$\frac{W_{CTQ,2-2}}{W_{R2-2}}$	$\frac{W_{CTQ,2-3}}{W_{R2-3}}$	$\frac{W_{CTQ,2-4}}{W_{R2-4}}$	$W_{R2}$	$\%WR_{CTQ2}$
CTQ 3	$\frac{W_{CTQ,3-1}}{W_{R3-1}}$	$\frac{W_{CTQ,3-2}}{W_{R3-2}}$	$\frac{W_{CTQ,3-3}}{W_{R3-3}}$	$\frac{W_{CTQ,3-4}}{W_{R3-4}}$	$W_{R3}$	$\%WR_{CTQ3}$
CTQ 4	$\frac{W_{CTQ,4-1}}{W_{R4-1}}$	$\frac{W_{CTQ,4-2}}{W_{R4-2}}$	$\frac{W_{CTQ,4-3}}{W_{R4-3}}$	$\frac{W_{CTQ,4-4}}{W_{R4-4}}$	$W_{R4}$	$\%WR_{CTQ4}$
<b>Acumulado</b>	$W_{CTQ,1}$	$W_{CTQ,2}$	$W_{CTQ,3}$	$W_{CTQ,4}$		
<b>Acumulado relativo</b>	1.0	1.0	1.0	1.0	$W_{R-T}$	100.0%

Figura 39. Matriz de pesos relativos de los requerimientos CTQ.

Con esta evaluación se puede estimar una importancia relativa de aquellos CTQ que no están calificados como los factores básicos.

18. Traducción de los requerimientos CTQ a métricos CTQ.

Para todos los requerimientos CTQ se les asignará su correspondiente métrico. Este parámetro de medición debe mostrar claramente el alcance de la medición del requerimiento CTQ en una matriz de traducción mostrada en la figura 40.

Matriz de traducción del CTQ							
CTQ	Cliente [VOC, VOE, VOB]	Tipo de necesidad [KANO]	Importancia relativa	Medición de CTQ	Unidades	Objetivo	Rango de aceptación

Figura 40. Matriz de traducción de los requerimientos del cliente, modificado de [52]

La mayoría de los métricos CTQ de los requerimientos ambientales se traducirán en cantidad de materia y energía emitida al ambiente [85].

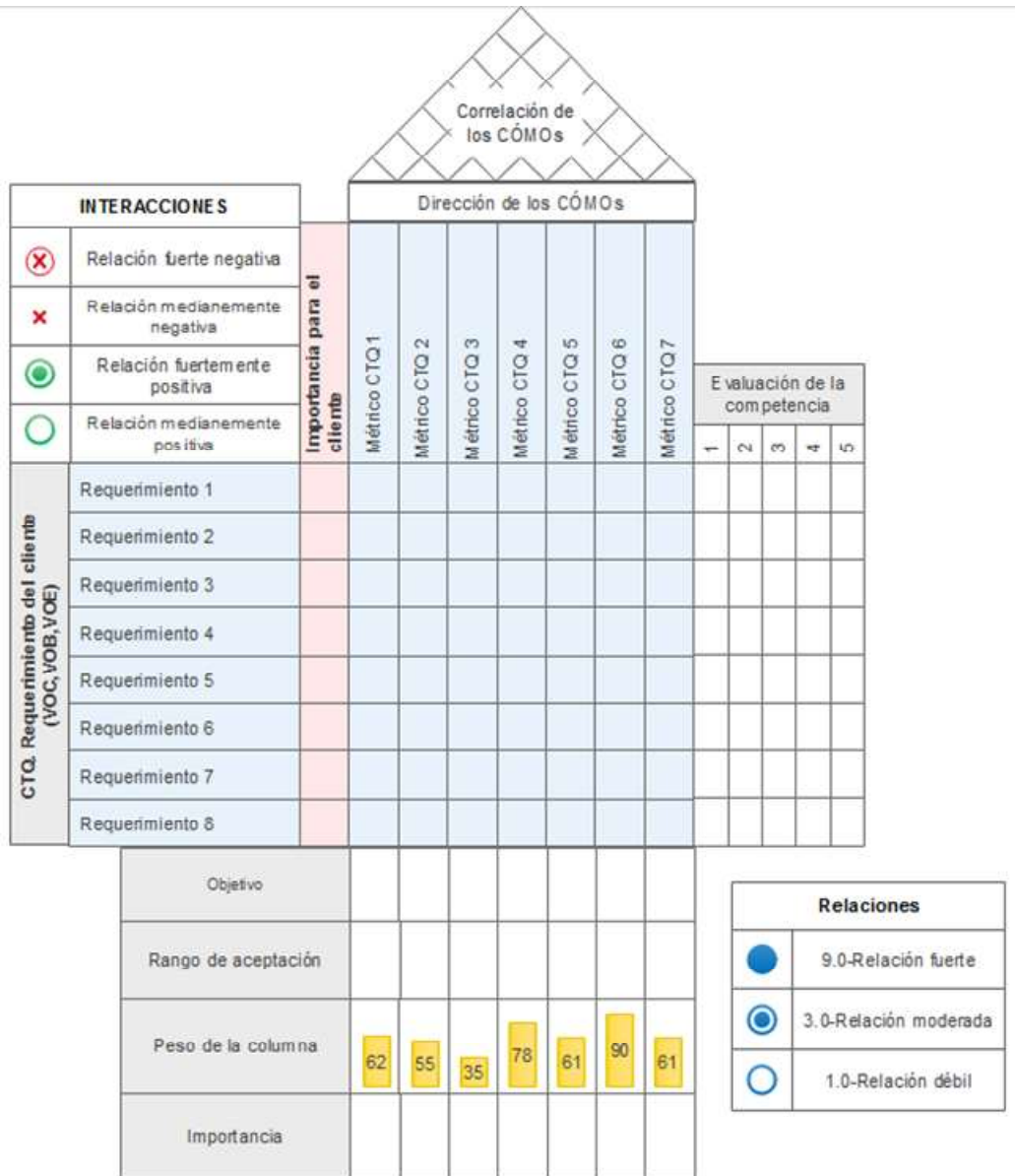
Una vez completada la matriz de traducción, se podrá construir la casa de calidad QFD-1, donde los métricos CTQ serán los COMOs.

19. Construcción de la primera casa del desarrollo funcional para la calidad QFD-1 [48].

Para evaluar la importancia de los métricos CTQ se recomienda construir dos casas de calidad QFD-1: (1) para factores básicos y (2) para factores de desempeño y de exaltación. Siguiendo los pasos, figura 41:

1. Los QUÉs y los CÓMOs se llenan en la primera casa de la calidad (QFD-1).
2. La importancia para el cliente es la importancia relativa obtenida en la matriz de pesos relativos de los requerimientos CTQ. Para la casa de factores básicos esta columna se omitirá.
3. Evaluar la competencia, comparando el grado de excelencia alcanzado por los competidores (A, B, C, etc.) en cada uno de los QUÉs usando una escala del 1-5.
4. Asignar cual es la dirección de la mejora de los CÓMOs, es decir, si se desea que el métrico CTQ incremente se usará la flecha ↑, caso contrario, si es preferible que el valor del métrico CTQ descienda, la flecha será ↓.
5. Estudiar si existe una correlación entre los CÓMOs e incorporar un símbolo de interacción positivo o negativo según lo indica la figura 41, estos símbolos se colocarán en el tejado de la casa.
6. Evaluar la relación de los QUÉs vs CÓMOs usando el estándar 1, 3 y 9 como lo indica la figura 41.
7. Se colocará el objetivo y el rango de aceptación de cada métrico CTQ.
8. Se calculará el peso de la columna (métrico CTQ) sumando los productos de la importancia de cada QUÉ por el coeficiente de correlación para cada columna, este cálculo indicará el grado de prioridad.
9. Asignar la importancia de los métricos CTQ dividiendo el peso de cada columna entre la suma de los pesos totales. Esta importancia puede manejarse en fracción o porcentaje.





**Figura 41. QFD-1 Planeación de los CTQ, modificado de [48, 86]**

El desarrollo de las casas de calidad QFD puede extenderse y ser más robusto usando la metodología propuesta por Renata Meran, Alexander John, Olin Roenpage y Christian Staudter en Six Sigma + Lean Toolset [83].

### 3.3.2 Desarrollo del concepto de diseño

#### i. Definición del producto basado en los requerimientos funcionales.

##### 20. Desarrollo de las funciones del negocio diseñando para Lean

El mayor énfasis del diseño es en el valor definido por las partes interesadas, es decir, el diseño de las actividades en el proceso productivo que agregarán valor a los clientes internos y externos.

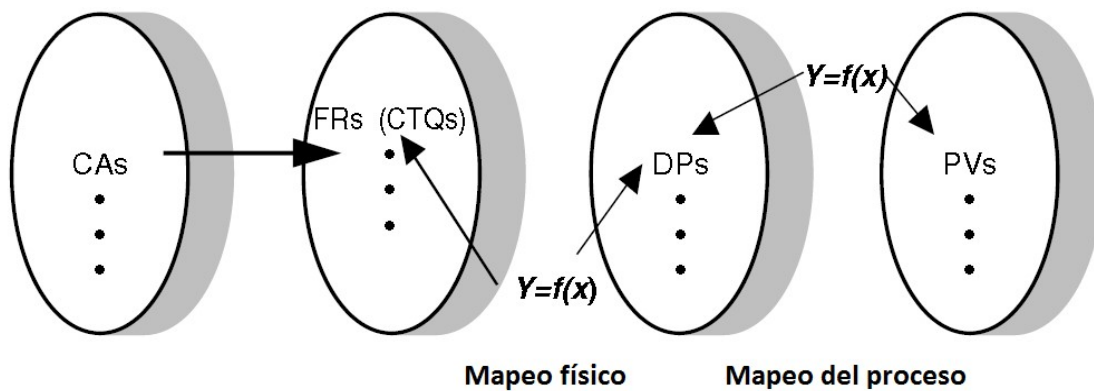


Figura 42. Proceso de diseño [52].

Por medio de una aplicación proactiva del pensamiento Lean durante la fase de diseño, pueden crearse mejores diseños que prevengan el desperdicio durante el ciclo de vida del producto. El principio clave del diseño para Lean es diseñar productos, servicios y proceso para prevenir desecho antes que tener que reducir el desperdicio durante la manufactura o entrega del servicio.

Para generar soluciones de diseño que maximicen el valor se debe identificar las funciones y requisitos funcionales del producto para el cliente. El diseño del proceso involucra tres mapeos bajo cuatro dominios mostrados en la figura 42. El primer mapeo consiste en mapear los atributos del cliente y los métricos críticos para la calidad (QFD-1), seguidos de un segundo mapeo de los CTQ a requerimientos funcionales (FRs), este mapeo es crucial para completar el diseño del *valor* desde la perspectiva del cliente. Se determinará un set mínimo de dominios FRs, que es definido como el inicio del mapeo físico, este mapeo comprende el dominio de los FRs y el co-dominio de los parámetros de diseño (DPs) [52].

El mapeo del proceso es el último mapeo, presenta el dominio DPps, el co-dominio de las variables de proceso (PVs) y provee la estructura necesaria para traducir las DPps a PVs en el proceso de producción.

El equipo de proyecto y de diseño puede hacer uso de diferentes herramientas para desarrollar los FRs, puede ser una lluvia de ideas para elaborar una lista de funciones del negocio y mapearlas. O pueden usarse herramientas más robustas como el diseño axiomático y el TRIZ [48, 52].

#### 21. Construir la segunda casa de la calidad.

Del mapeo de las funciones surgirán los requisitos del negocio para satisfacer los CTQ llamados funciones del negocio o *procesos del negocio*.

Con los FRs se construirá en la segunda casa de la calidad (QFD-2), ver figura 43, para asignar la importancia de cada uno en el cumplimiento de los requerimientos del cliente.

1. Se llenarán los QUÉs con los métricos CTQ identificados en la primera casa de la calidad y los CÓMOs con los FRs desarrollados en el paso anterior.

		Importancia de los métricos CTQ	Funciones del Negocio (FRs)						
			FR-1	FR-2	FR-3	FR-4	FR-5	FR-6	FR-7
Métricos CTQ	Métrico CTQ 1								
	Métrico CTQ 2								
	Métrico CTQ 3								
	Métrico CTQ 4								
	Métrico CTQ 5								
	Métrico CTQ 6								
	Métrico CTQ 7								
	Métrico CTQ 8								
Peso de la columna			62	55	35	78	61	90	61
Importancia									

**Figura 43. QFD-2 Análisis funcional del producto, modificado de [48, 86]**

2. Se colocará la importancia de los QUÉS.
3. Se evaluará la relación de los QUÉS vs CÓMOs usando el estándar 1, 3 y 9 como lo indica la figura 41.
4. Se calculará el peso de la columna, función del negocio, sumando los productos del peso de cada QUÉ por el coeficiente de correlación para cada columna.
5. Se asignará la importancia de las funciones dividiendo el peso de cada columna entre la suma de los pesos totales. Esta importancia puede manejarse en fracción o porcentaje.

Una vez completada la segunda casa de calidad (QFD-2) el equipo de diseño principal conocerá cuáles son las funciones del negocio que darán *valor* al medio ambiente y al mercado consumidor.

Después de formular la problemática principal de diseño, surgen las preguntas acerca de las nuevas materias, nuevos procesos y nuevas tecnologías de procesamiento. Como se muestra en la figura 44, el equipo de diseño principal determinará cuál es el nivel de innovación que el negocio requiere para cumplir con las funciones más importantes del QFD-2.

De acuerdo a la figura 44, la primera pregunta que se planteará el equipo de diseño será:

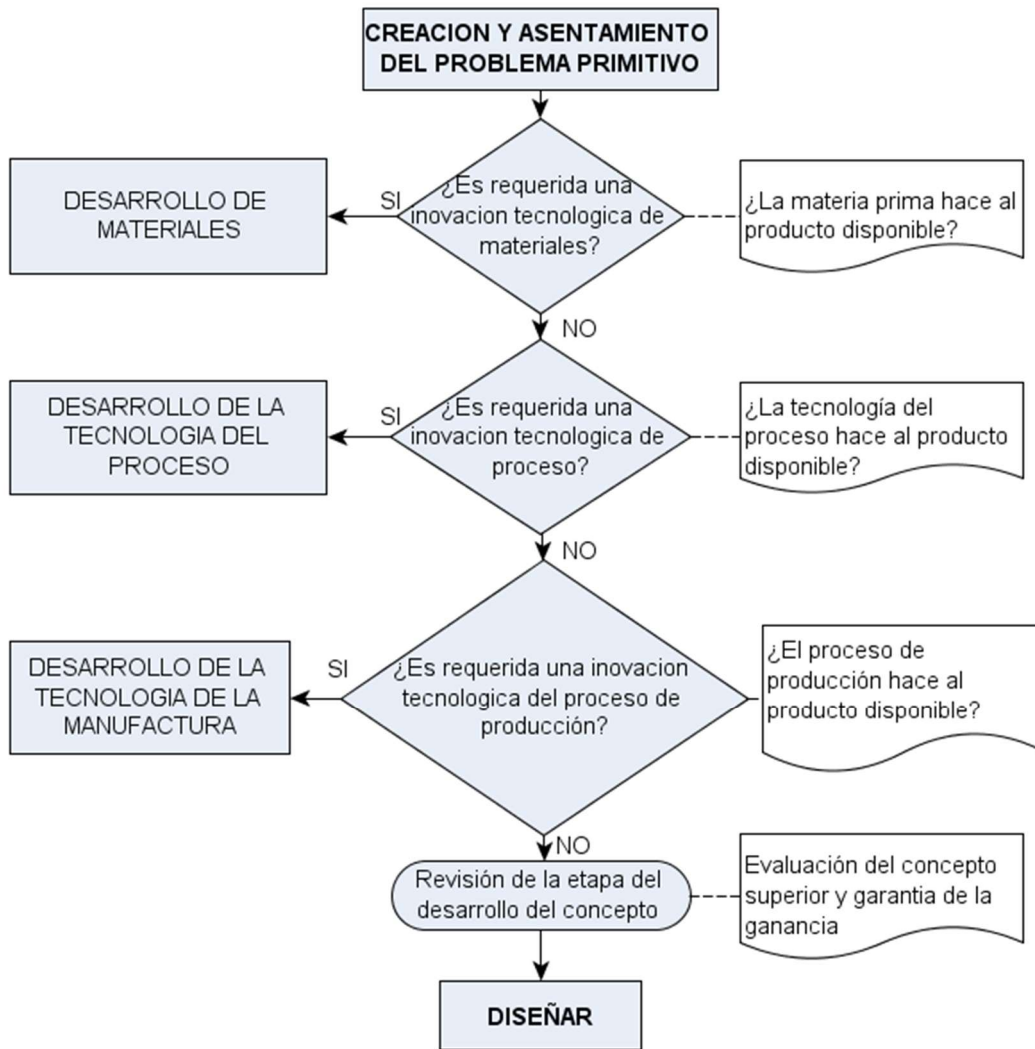


Figura 44. Pasos para el desarrollo del concepto y diseño preliminar [91]

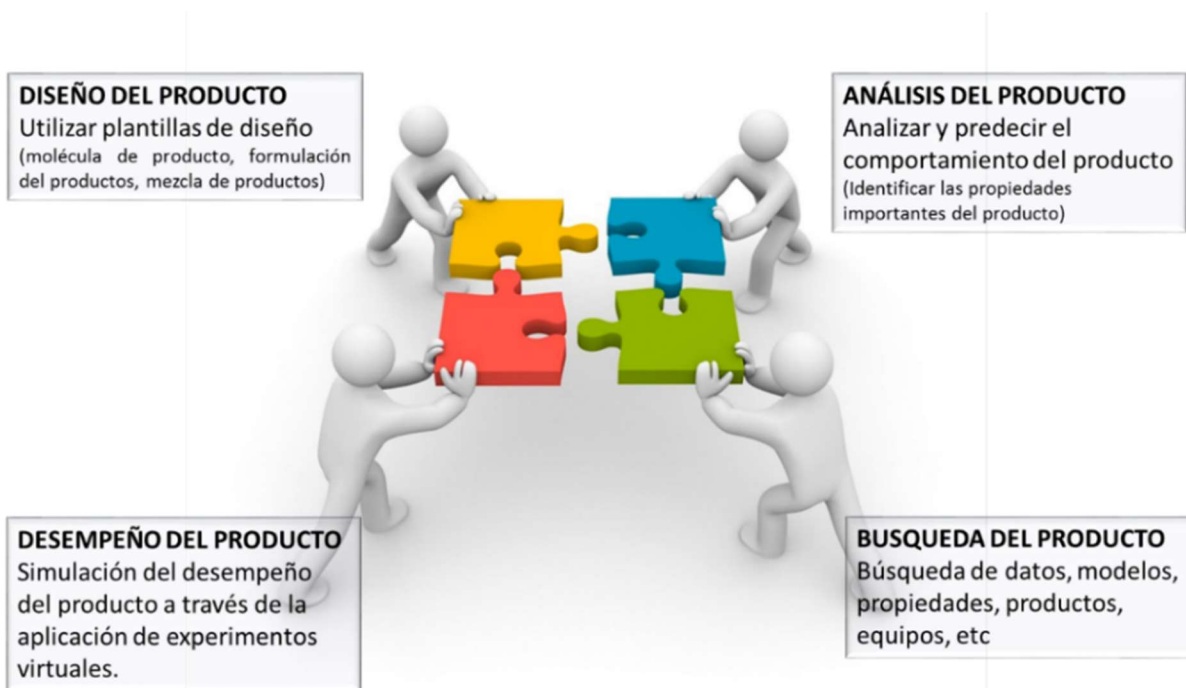
### ¿Es requerida una innovación tecnológica de materiales?

22. Seleccionar los químicos o mezcla de químicos.

Los productos químicos diseñados deben poseer las propiedades y desempeño deseado para cumplir con los CTQ's del consumidor. Como se muestra en la figura 45 para cumplir este propósito se utilizarán métodos de estimación de las propiedades deseadas que incluyan métodos por contribución de grupos. Lei Zhang, Deenesh K. y Rafiqul Gani [92], resumieron en una línea del tiempo diferentes metodologías de diseño de productos. Estos métodos envuelven heurísticas, experimentación, y la evaluación de diferentes alternativas halladas. Aunado a esto los diseñadores deben asegurarse de:

- Diseñar el producto de la cuna a la cuna, es decir, que el producto retorne al ambiente en el mismo recurso adquirido del medio ambiente, usando materias primas renovables en lugar de agotar los recursos naturales y al mismo tiempo prevenir la generación de residuos contaminantes.

- Seleccionar materias primas y subproductos menos peligrosos para permitan su manejo más seguro, minimizando las problemáticas de diseño al asegurar la disposición amigable de las sustancias asociadas con su fabricación, uso y eliminación.
- Disminuir la variedad de materias primas y asegurar la disponibilidad inmediata de las mismas.
- Seleccionar productos y procesos validados contra los competidores del mismo mercado internacional usando el benchmarking funcional.



**Figura 45. Desarrollo del material [92]**

### 23. Crear la base de datos preliminar.

En esta etapa de diseño, varios problemas específicos son inicialmente considerados cubriendo materias primas, productos deseados, varios sub-productos y reacciones intermediarias. Para estos químicos, es necesario conocer las propiedades termodinámicas, incluyendo pesos moleculares, punto de ebullición, punto de congelamiento, propiedades críticas, calores latentes, entre otros. Esta colección de datos puede ser hecha a través de diferentes fuentes, como lo son: CRC Handbook of Chemistry and Physics; Perry's Chemical Engineers' Handbook; NIST Chemistry Webbook; Engineering Data Book; API Book; Properties of Gases and Liquids; Data for Process Design and Engineering Practice y algunos simuladores de proceso que incluyen bases de datos extensas (ASPEN PLUS, HYSYS.Plant, CHEMCAD, PRO/II, Super Pro Designer) [91].

### 24. Realizar experimentos a nivel laboratorio.

Muchos diseños son provistos por extensivos experimentos de laboratorio, que proveen datos valiosos al equipo de diseño. En este paso se evalúan las condiciones de composición, temperatura, presión y uso de solventes en una extensa cantidad de experimentos para maximizar la eficiencia de la materia prima y energía en la obtención del producto. Cuando el proceso involucra reacciones químicas se requerirá la determinación de las velocidades de

reacción y la evaluación del catalizador a emplear. Adicionalmente los experimentos de laboratorio proveen la selección preliminar de los sistemas de separación que minimicen el uso de energía y materiales [91]. La optimización de las variables más significativas en la síntesis de un producto se puede hacer a nivel laboratorio y con base en un análisis estadístico se puede obtener un modelo matemático que permita simular la reacción a diferentes condiciones operativas.

Generar mapas de rutas tecnológicas donde se visualicen las funciones del negocio y cada avance de mejora que se espera tener en cada generación del MGPP.

## ii. Generación del concepto de diseño.

### ¿Es requerida una innovación tecnológica del proceso y de la producción?

#### 25. Síntesis preliminar del proceso químico.

En un proceso químico, como se muestra en la figura 46, la transformación de las materias primas a los productos deseados usualmente no es lograda en un solo paso. Mas bien la transformación ocurre en una serie de pasos que generan transformaciones intermedias. Estas son acarreadas fuera mediante reacciones, separaciones, mezclas, enfriamientos, cambios de presión disminución de tamaños de partícula o agrandamiento de partículas. Una serie de pasos deberá ser seleccionada mediante la síntesis de un proceso químico y configurada en un diagrama de proceso [89].

La síntesis del proceso comprende dos extensas actividades: Primero, seleccionar los pasos individuales de transformación y segundo, conectar las transformaciones individuales e interconectarlas para formar un proceso completo que comprenda toda la transformación requerida.

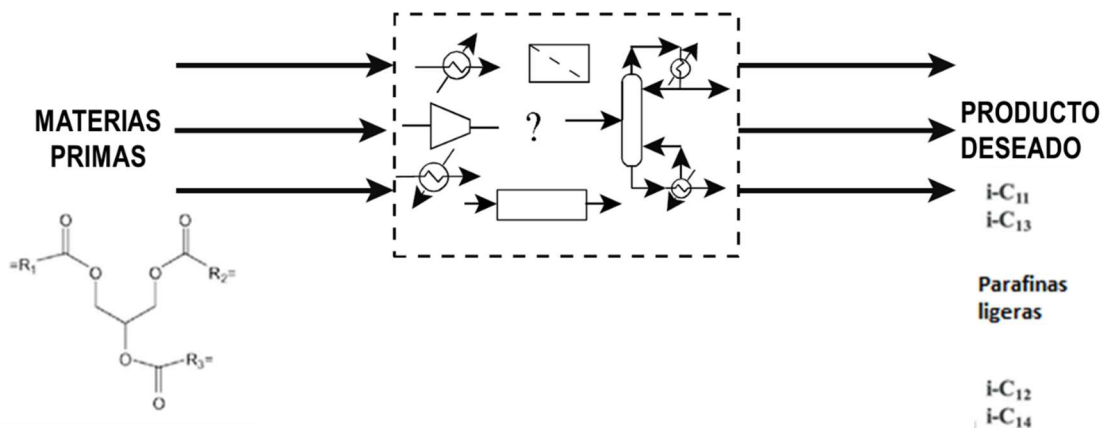


Figura 46. Problema para la síntesis del proceso [91, 93]

Una herramienta poderosa a este nivel es el uso del benchmarking funcional, ver figura 47, que proporcionará al equipo la dirección en la selección de la tecnología a emplear para el diseño del proceso químico.

En la figura 48, se observan los pasos de la síntesis del diseño del proceso químico y los operadores que se ocuparán en cada paso. Otro método de síntesis del proceso químico es

conocido como el diagrama de cebolla [89], que por su similitud a la propuesta por Seider&Seader [86] puede emplearse igualmente en este trabajo.

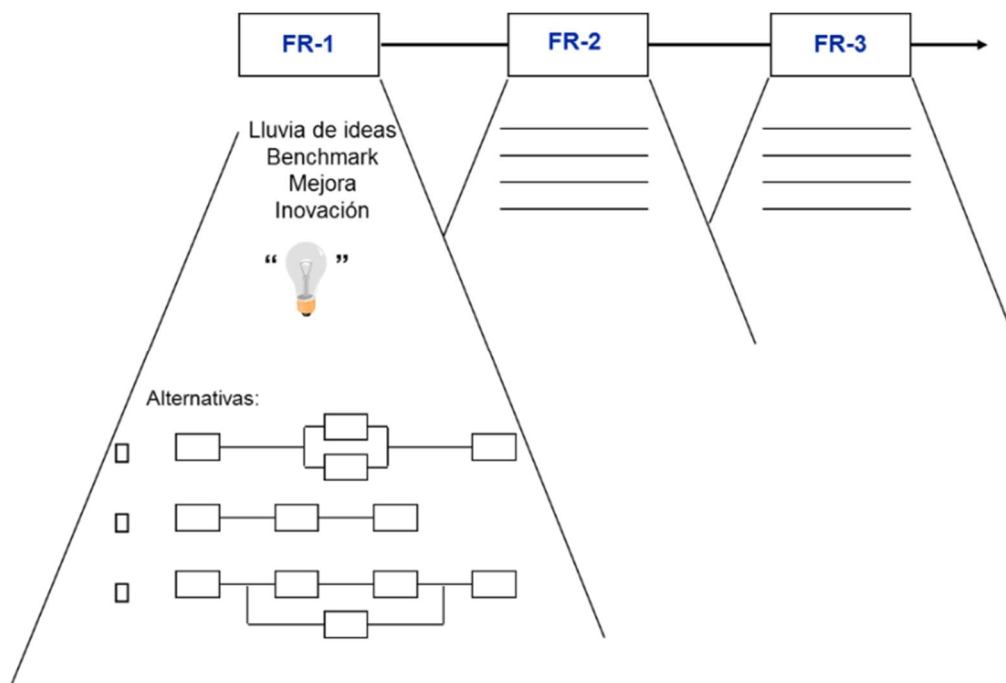


Figura 47. Diseño de conceptos a partir de las funciones del negocio [86].

Paso de la Síntesis	Operadores
1. Eliminar diferencias de tipo de molécula.	Reactores
2. Distribuir los productos químicos.	Mezcladores y bifurcadores
3. Eliminar las diferencias de composición.	Separadores
4. Eliminar las diferencias de temperatura, presión y fase.	Bombas, compresores y válvulas. Intercambiadores de calor. Indicadores de fase
5. Integrar tareas; esto es, combinación de operaciones dentro de las unidades de proceso y decidir si el proceso será continuo o por lotes	

Figura 48. Síntesis para el diseño del proceso [91].

**1. Eliminar diferencias de tipo molécula.** Con las pruebas realizadas en el laboratorio, el equipo de diseño seleccionará una serie de rutas de reacción prometedoras y las dirigirá al diseño de reactores ideales resolviendo las siguientes problemáticas [89]: tipo de reactor, catalizador, tamaño (dependiente del volumen de operación necesario para satisfacer la demanda, *pull*

system), condiciones de operación (temperatura y presión), fase (homogéneo o heterogéneo) y condiciones de alimentación (concentración y temperatura).

El equipo de diseño principal tomará decisiones básicas respecto a estos problemas seleccionando un reactor práctico, aproximándose tanto como sea posible al ideal, tanto que el diseño detallado pueda continuar posteriormente.

**2. Distribuir los productos químicos.** Asegurar el balance de flujo de masa a la entrada y salida del reactor, adicionando mezcladores a la entrada del reactor que garanticen el ingreso de un solo flujo másico, esto puede incluir la suma de los reactivos y reflujos de reactivos sin reaccionar del efluente del reactor.

**3. Eliminar diferencias de composición.** El efluente de la selección inicial del reactor requiere ser separado para la purificación de los productos obtenidos.

Aunado a las consideraciones de fase para la selección de los separadores de cada tarea (como lo indica Robin Smith en su libro, *Chemical Process Design and Integration*), el equipo de diseño debe evaluar que los separadores seleccionados sean las opciones que empleen el menor gasto de energía y materiales adicionales (3er principio de IV).

**4. Eliminar las diferencias de temperatura, presión y fase.** Para cada una de las tareas de reacción y separación se eligieron las condiciones de operación requeridas al ingreso del reactor y separador. Y para alcanzar estas condiciones, el equipo de diseño seleccionará los tipos de operaciones (cambio de fase, cambio de temperatura y cambio de presión) para las corrientes de ingreso y salida de cada unidad de reacción o separación.

**5. Integrar tareas.** Cuando ya se han seleccionado los equipos de proceso, el paso de integración de tareas, el tamaño y la continuidad de la demanda juega un papel muy importante en el modo de operación de la producción.

Para generar el diagrama de flujo más prometedor se usan simuladores de procesos químicos como ASPEN PLUS, HYSYS.Plant, CHEMCAD, PRO/II, Super Pro Designer. Estas herramientas ayudarán al equipo de diseño a seleccionar entre procesos continuos o intermitentes.

Como se muestra en la figura 49 en el desarrollo de la síntesis preliminar del proceso el equipo de diseño limitará las opciones de procesamiento químico a aquellas rutas de procesamiento que cumplan los pasos de la síntesis.

## 26. Crear del mapa de evaluación de impacto.

Se evaluará el desarrollo del concepto de diseño mediante un mapa de evaluación de impacto mostrado en la figura 50, donde se determinará la continuidad del diseño de los materiales y energía usados, este diagrama puede ser llenado por el equipo de diseño tanto como cuente con la información necesaria.



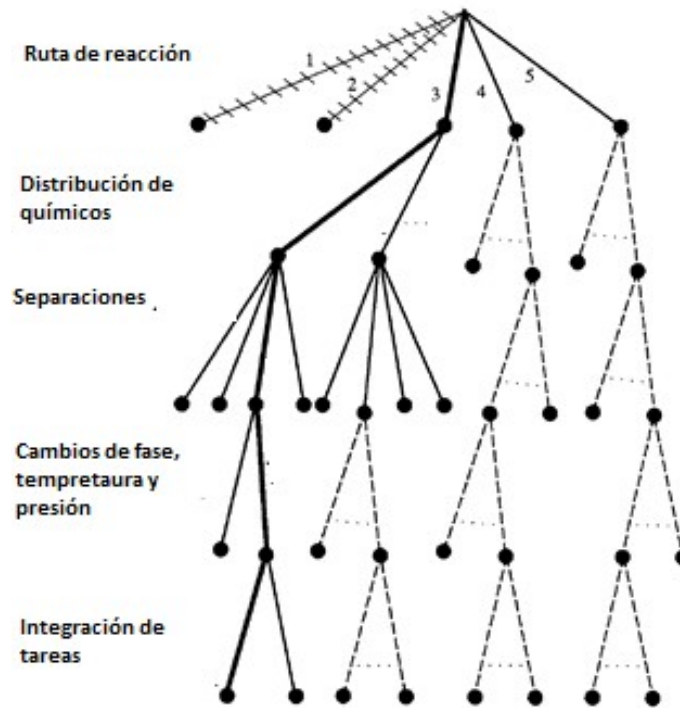


Figura 49. Árbol de síntesis del proceso [91].

Las columnas corresponden al flujo de los recursos (filas) a través del proceso del negocio. Por ejemplo, los materiales usados en el proceso del negocio (función/proceso) pueden provenir de recursos (proveedores) reciclados; de efluentes de otro proceso; y recursos naturales, los materiales de salida del proceso puede ocuparse como materia prima de otro proceso interno, un cliente externo o puede salir como un desecho hacia el ambiente. Esto permitiría identificar inmediatamente los indicadores ambientales y actualizar el análisis de la segunda casa de la calidad (QFD-2).

	PROVEEDOR	ENTRADA	FUNCIÓN/PROCESO	SALIDA	USO/CLIENTE
MATERIALES					
ENERGIA USADA					
RECURSOS HUMANOS					
COSTOS					

Figura 50. Mapa de evaluación de impacto, modificado de [89].

### 27. Análisis Ciclo de Vida.

Con la información disponible en la selección del concepto de diseño se realizará un análisis ciclo de vida del producto (ACV), conforme lo indica la ISO 14040, ver figura 51.

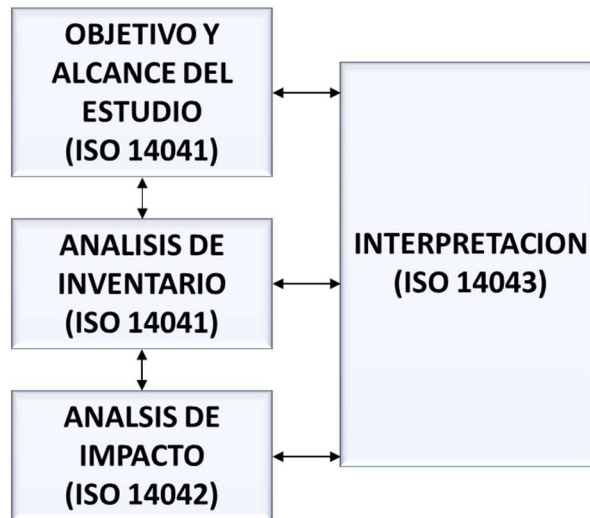


Figura 51. Fases de un Análisis Ciclo de Vida (ACV), ISO 1440

28. Seleccionar el concepto de diseño adecuado.

Una vez obtenidas dos o tres opciones del árbol de síntesis se evaluará la factibilidad de cada operación para poder realizar una selección del concepto del diseño del proceso químico usando como herramienta la matriz pugh, figura 52.

Leyenda de selección de concepto

Mejor +  
Peor -  
Igual 0

CRITERIOS CLAVE	IMPORTANCIA	CONCEPTO REFERENCIA	CONCEPTO A	CONCEPTO B	CONCEPTO C
Métrico CTQ 1	5	0			
Métrico CTQ 2	7	0			
Métrico CTQ 3	4	0			
Métrico CTQ 4	2	0			
Métrico CTQ 5	6	0			
<b>Suma de positivos</b>					
<b>Suma de negativos</b>					
<b>Suma de iguales</b>					
<b>Suma del peso de los positivos</b>					
<b>Suma del peso de los negativos</b>					

Figura 52. Matriz Pugh

La matriz pugh también llamada método pugh y análisis pugh, funciona como un modelo de toma de decisiones, se usa para elegir entre las alternativas desarrolladas en el árbol de síntesis. Lo más importante en este filtro de decisión es tomar los métricos CTQ como criterios de comparación entre

las rutas propuestas por la síntesis preliminar del proceso químico. Los CTQ's ya cuentan con una valoración de importancia que funcionará para la evaluación de los conceptos.

Un criterio importante es el financiero donde los intereses del negocio se destacan en importancia, ya que pueden elegirse rutas de procesamiento y de producción conforme al Plan del Proyecto Multi-Generacional.

El equipo de proyecto integrará el producto y proceso actual del mercado como referencia de comparación: (0) mismo; (+) Mejor y (-) Peor.

Se sumarán las positivas, las negativas, los '0', la suma del peso de las positivas y la suma del peso de las negativas para contar con una evaluación completa de las opciones presentadas.

### 29. Evaluación de riesgos D-AMEF.

El Análisis del Modo y Efectos de Fallas (D-AMEF) es un procedimiento que permite identificar las fallas del producto, procesos y sistemas, así como evaluar y clasificar de manera objetiva sus efectos, causas y elementos de identificación, con ello se puede evitar su ocurrencia [48, 94]. Los pasos para la evaluación de riesgos AMEF se incluye en el anexo 2.

### 30. Factibilidad del concepto de diseño.

A esta etapa del DPS la evaluación de las CTQ y selección de una ruta de procesamiento permitirán al equipo de trabajo una mejor visualización de los alcances del proyecto y actualizar la Carta del Proyecto y el MGPP. Con toda la información disponible, se evaluará la factibilidad del concepto seleccionado y que este cumpla con todos con las perspectivas financieras, del cliente y del medio ambiente, véase figura 22.

Y al finalizar esta etapa del DFS se presentará como entregable el concepto del diseño químico, la actualización del Carta del proyecto, las dos casas de calidad QFD-1 y QFD-2, y el análisis D-AMEF, a este último se le dará continuidad en la siguiente etapa.

## 3.4 Diseñar

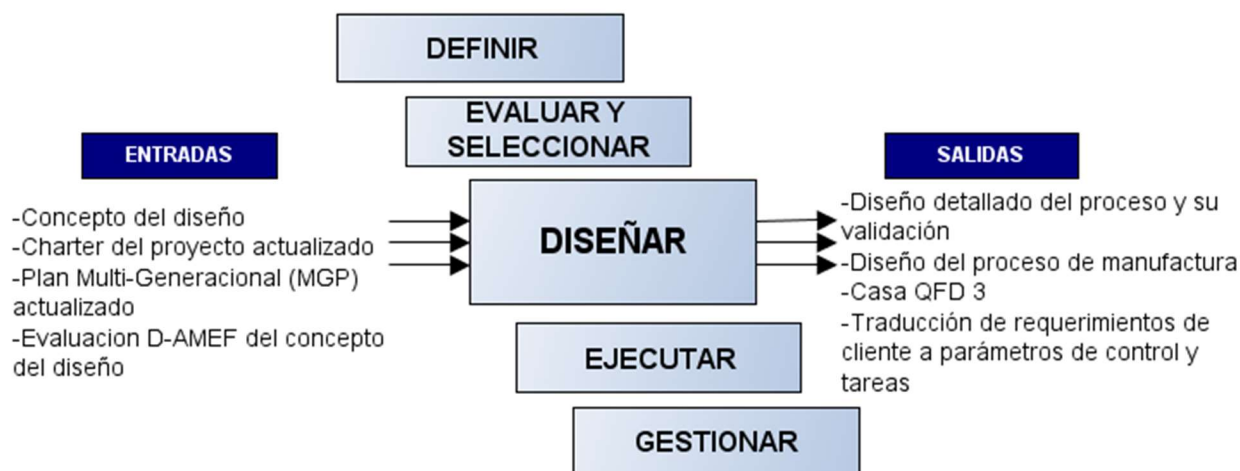
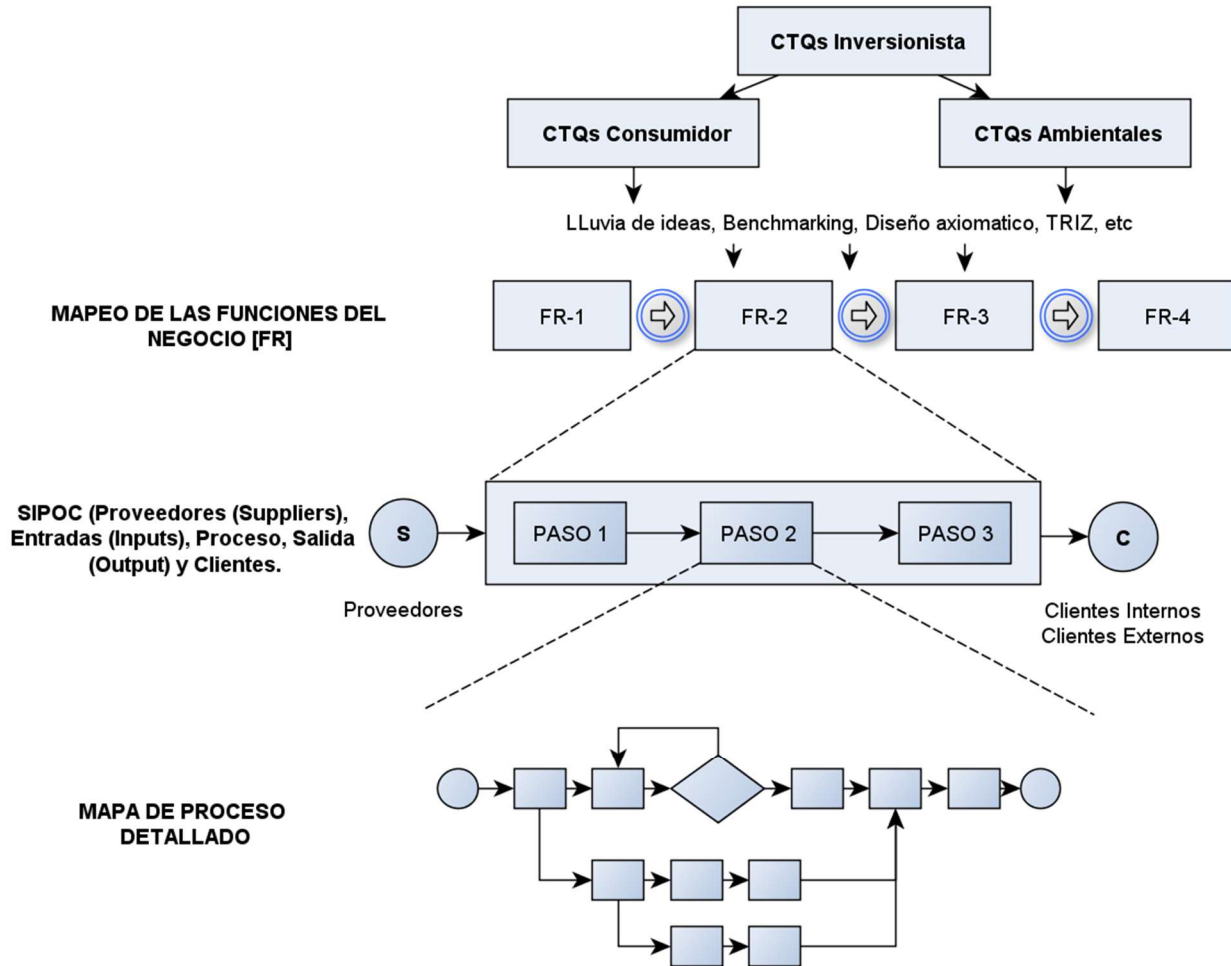


Figura 53. Entradas y salidas de DISEÑAR

Como se muestra en la figura 54, para asignar la relación directa de las medidas críticas para la calidad en los pasos del proceso y subsecuentemente la satisfacción de los tres clientes se identificarán los pasos del proceso que tienen mayor impacto en las funciones del negocio en la tercera casa de la calidad QFD-3.

Pero antes de esto, el equipo de diseño detallará los pasos del proceso dando prioridad al diseño detallado del proceso químico como la función principal del negocio. Ahora el cliente principal interno del negocio será el proceso químico.



**Figura 54. Despliegue del diseño de los procesos del negocio**

Los procesos químicos deben diseñarse como parte de una actividad industrial sostenible que mantenga la capacidad de los ecosistemas para apoyar tanto la vida como la actividad industrial en el futuro. La actividad industrial sostenible debe responder a las necesidades del presente, sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras. Para el diseño de procesos químicos, esto significa que los procesos deben utilizar las materias primas tan eficientemente como es económica y factible, tanto para evitar la producción de residuos que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y para preservar las reservas de materias primas tanto como sea posible. Los

procesos deben utilizar la menor cantidad de energía que sea económica y factible, tanto para evitar la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera al quemar combustibles fósiles como para preservar las reservas de combustibles fósiles. El agua también debe ser consumida en cantidades sostenibles que no causen deterioro en la calidad de la fuente de agua y la cantidad a largo plazo de las reservas. Las emisiones acuosas y atmosféricas no deben ser perjudiciales para el medio ambiente, y los desechos sólidos en vertederos deben ser evitados [72].

### 3.4.1 Diseño detallado del proceso químico

#### i. Desarrollo detallado de la síntesis de diseño del proceso químico.

En esta etapa el tamaño del equipo de diseño se expandirá para crear el diagrama de flujo del proceso detallado y mejorar la integración de las tareas iniciadas en el proceso preliminar de síntesis.

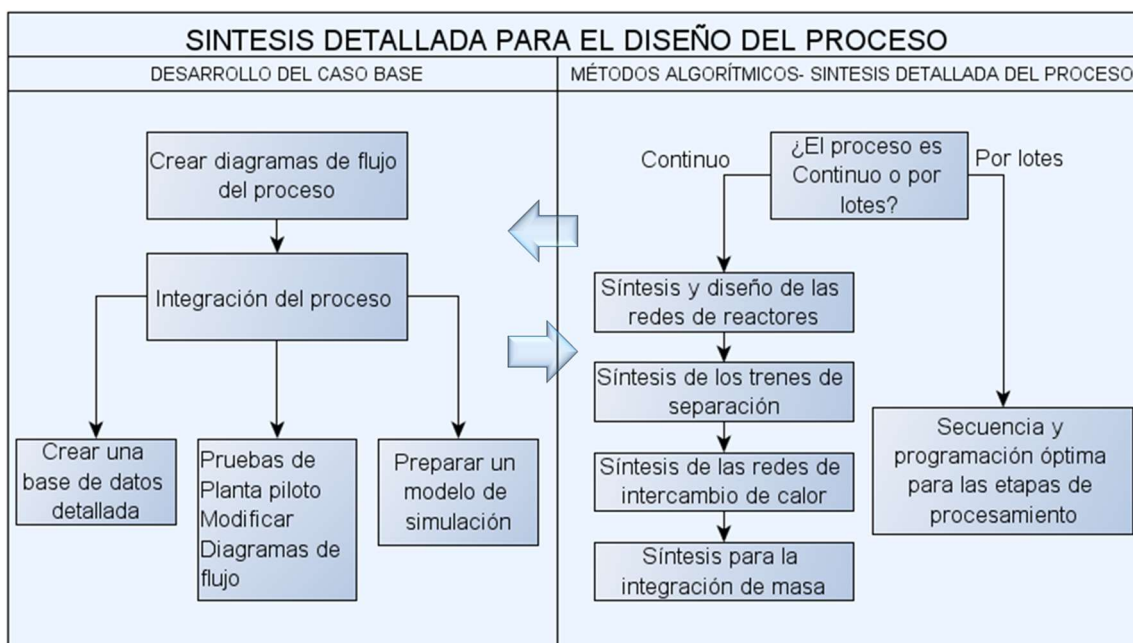


Figura 55. Síntesis detallada para el diseño del proceso [91].

Como se muestra en la figura 55 la síntesis de un proceso químico implica dos amplias actividades. En primer lugar, se seleccionan los pasos individuales de transformación. En segundo lugar, estas transformaciones individuales requieren estar interconectadas para formar un proceso completo que logra la transformación global requerida. Un diagrama de flujo es una representación esquemática de las etapas del proceso con sus interconexiones.

#### 31. Desarrollo del caso base

##### A. Diagramas de flujo.

A medida que avanza el trabajo de ingeniería en el diseño del caso-base, se utilizará una secuencia de diagramas de flujo para proporcionar un vehículo crucial para compartir información. Tres son los principales introducidos en esta sección. Iniciando con el Diagrama de

Flujo en Bloques (DFB), después el Diagramas de Flujo del Proceso (DFP) y terminando con los Diagramas de Tubería e Instrumentación (DT&I) [91]:

**Diagrama de Flujo en Bloques (DFB).** Representa principalmente las secciones de procesamiento en términos de bloques funcionales. Este nivel de detalle ayuda a la suma de las secciones del proceso y es apropiado en el temprano diseño de las etapas del proceso[53, 91]. Esos diagramas incluyen los balances de materia y las condiciones de cada etapa, ejemplo en figura 56.

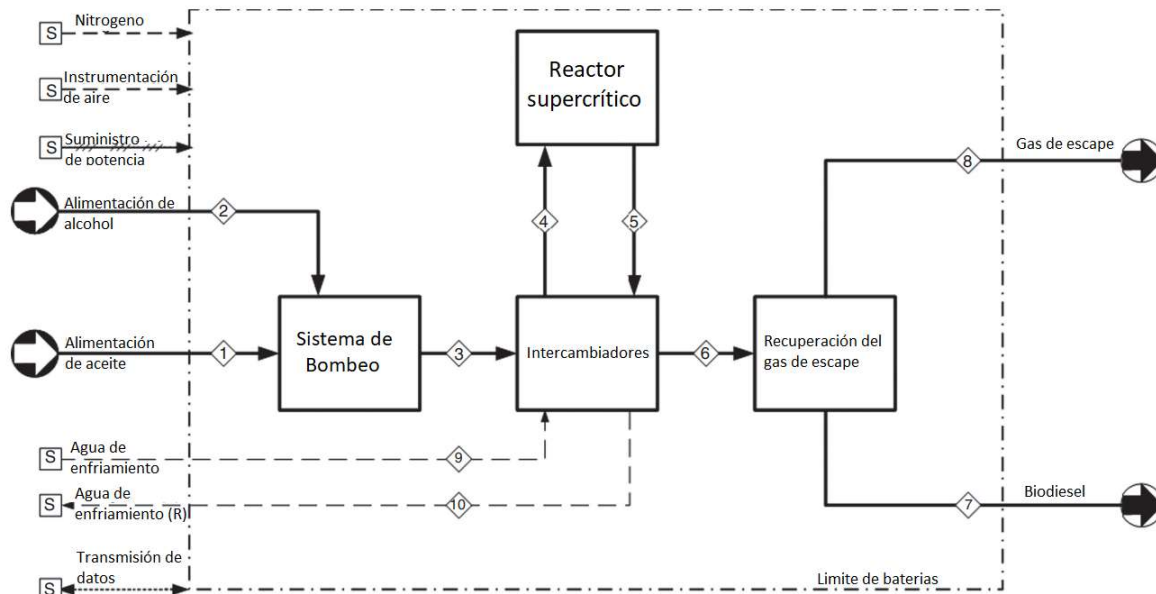


Figura 56. DFB de la producción supercrítica de biodiesel, [95].

**Diagrama de Flujo del Proceso (DFP).** Proveen una vista del proceso más detallada. Estos diagramas muestran la mayoría de las unidades del proceso (incluyendo intercambiadores de calor, bombas y compresores) proveen información de las corrientes e incluyen los lazos de control principales que permiten la regulación del proceso a las condiciones normales de operación. Estos diagramas se construyen preliminarmente con ayuda de simuladores de proceso y subsecuentemente se detallan con un software como AUTOCAD [53, 91]. Y se componen de la siguiente estructura: Unidades de proceso; Información de corrientes y Tabla de resumen de equipos, ejemplo en figura 57.

**Diagramas de Tuberías e Instrumentación (DT&I).** Estos diagramas contienen información que los DFP no contemplan, como: la localización y tipo de instrumentos de medición y control, posición de las válvulas, tamaño, material de la construcción de las tuberías.

Para estos diagramas se hacen cálculos de balances de materia y energía, que pueden ser completados con el uso de simuladores de proceso, que son comúnmente usados para calcular los calores de reacción, cambio de entalpia, sobre calentamientos y enfriamientos y equilibrios líquido-vapor. El nivel de aproximación de estos cálculos de balance de materia y energía será tan bueno como el detalle de las especificaciones de las unidades de proceso. La simulación completa no es justificada hasta que el equipo de diseño está listo para el

diseño de detalle, esto es porque los detalles de simulación son adicionados gradualmente [53, 91], ejemplo en figura 58.

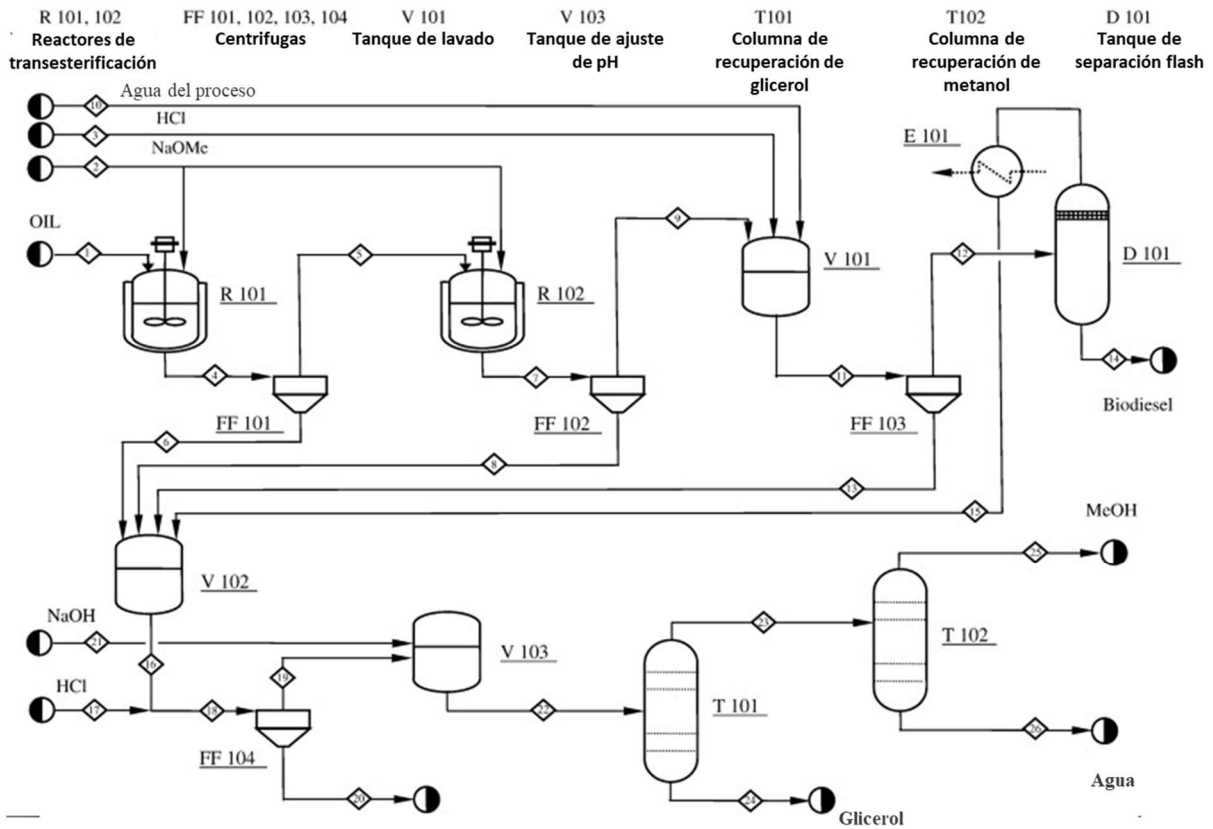


Figura 57. DFP de la producción de biodiesel [96].

## B. Integración del proceso

En términos generales, existen dos enfoques para el diseño e integración de procesos químicos [93]:

- Construir una estructura irreducible.** En cada capa, las decisiones deben tomarse sobre la base de la información disponible en esa etapa. La capacidad de mirar adelante al diseño terminado podría conducir a decisiones diferentes. Desafortunadamente, esto no es posible, y, en cambio, las decisiones deben basarse en una imagen incompleta [91]. Este enfoque para la creación del diseño implica tomar una serie de mejores decisiones locales. Esto podría basarse en el uso de la heurística o las reglas empíricas desarrolladas a partir de la experiencia sobre un enfoque verde más sistemático. En el anexo 3 se incluyen heurísticas para la síntesis del proceso donde se integran tres fuentes [54, 91, 97], enfocadas al diseño verde. Estas reglas se incrementarán conforme se desarrolle la inserción del enfoque de IV en la síntesis del proceso químico.

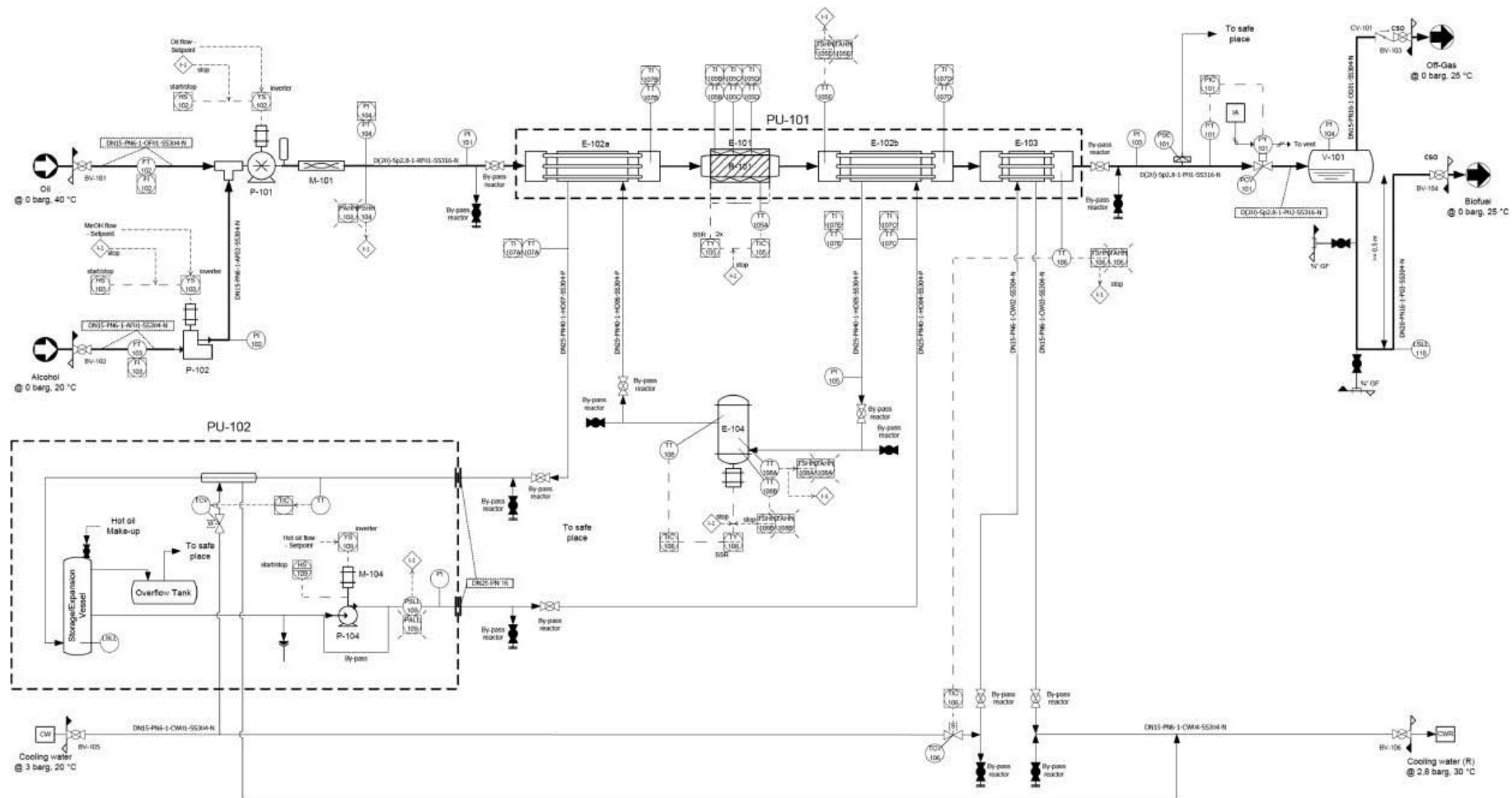


Figura 58. DT&I de la producción supercrítica de biodiesel, [95].



El equipamiento se añade sólo si se puede justificar económicamente sobre la base de la información disponible, aunque sea incompleta. Esto mantiene la estructura irreducible, y las características que son técnicamente o económicamente redundantes no están incluidas.

- **Crear y optimizar una superestructura.** En este enfoque, se crea primero una estructura reducible, conocida como una superestructura, que ha incorporado dentro de ella todas las opciones de proceso viables y todas las interconexiones factibles que son candidatas para una estructura de diseño óptima. Inicialmente, las características redundantes están incorporadas en la superestructura.

Rafiqul Gani junto con un grupo de trabajo del departamento de ingeniería química y bioquímica de la Universidad Técnica de Dinamarca creó un método genérico para el diseño y síntesis del proceso basado en la optimización de una super estructura [98]. Esta metodología consta de tres etapas: la primera etapa, la optimización de la superestructura es usada para seleccionar la ruta óptima de procesamiento; en la etapa dos, se resuelven las problemáticas del diseño y a partir de las herramientas de integración se identifican las tareas para mejora; y en la tercera etapa se crean nuevas alternativas de usando la ruta seleccionada y las tareas antes identificadas.

Teniendo un diagrama de flujo del proceso (DFP) completo, el equipo de diseño requerirá revisar las suposiciones y detallar la información necesaria para comenzar el diseño de detalle para su manufactura. La generación de este detalle de información usualmente comprende tres actividades que deberán hacerse de forma paralela [91]:

- **Base de datos detallada.** La creación detallada de la base de datos por medio del refinamiento y adición de información a la base de datos preliminar.
- **Planta piloto.** La construcción de un equipo piloto que confirmará que los equipos trabajan apropiadamente y proveerá información para el banco de datos.
- **Modelo de simulación.** El problema de diseño se formula como un modelo matemático. Una vez que el problema se formula matemáticamente, su solución se lleva a cabo a través de la implementación de un algoritmo de optimización. La optimización justifica la existencia de características estructurales y elimina aquellas características de la estructura que no pueden justificarse económicamente. De esta manera, la estructura reduce su complejidad. Al mismo tiempo, se optimizan las condiciones de operación y el tamaño de los equipos. En efecto, los aspectos discretos de toma de decisiones del diseño del proceso se sustituyen por una optimización discreta / continua [93].

### 32. Métodos algorítmicos-síntesis detallada del proceso

**¿El proceso es continuo o por lotes?** Para cada etapa en la síntesis del proceso deberán usarse métodos algorítmicos para procesos continuos o de tipo lote para generar alternativas prometedoras durante el desarrollo del diseño del caso base.

#### A. Diseño del reactor y síntesis de la red de reactores.

El diseño de reactores es el primer paso para eliminar las diferencias en el tipo de molécula. Específicamente, es deseado asegurar el suficiente rendimiento y selectividad de las especies del producto deseado por medio del reactor o red de reactores apropiado [91].

Dado que el diseño del proceso comienza con el reactor, las primeras decisiones son las que conducen a la elección del reactor. El buen desempeño del reactor es de suma importancia para determinar la viabilidad económica del diseño general y es fundamentalmente importante para el impacto ambiental del proceso. Además de los productos deseados, los reactores producen subproductos no deseados. Estos subproductos no deseados no sólo llevan a una pérdida de ingresos, también crean problemas ambientales. La mejor solución a los problemas medioambientales es no emplear métodos de tratamiento elaborados, pero en primer lugar es preferible no producir residuos.

En el diseño del concepto se fijaron las especificaciones del producto, la ruta de reacción que gobernará el proceso, el catalizador que se empleará para promover la reacción, y las características y las condiciones necesarias para el sistema de reacción. Por ello los temas que deben abordarse para el diseño de los reactores son: tipo de reactor; catalizador; tamaño; condiciones de operación (temperatura, presión, flujo, nivel), fase y condiciones de alimentación (concentración, temperatura) [93], ver figura 59.

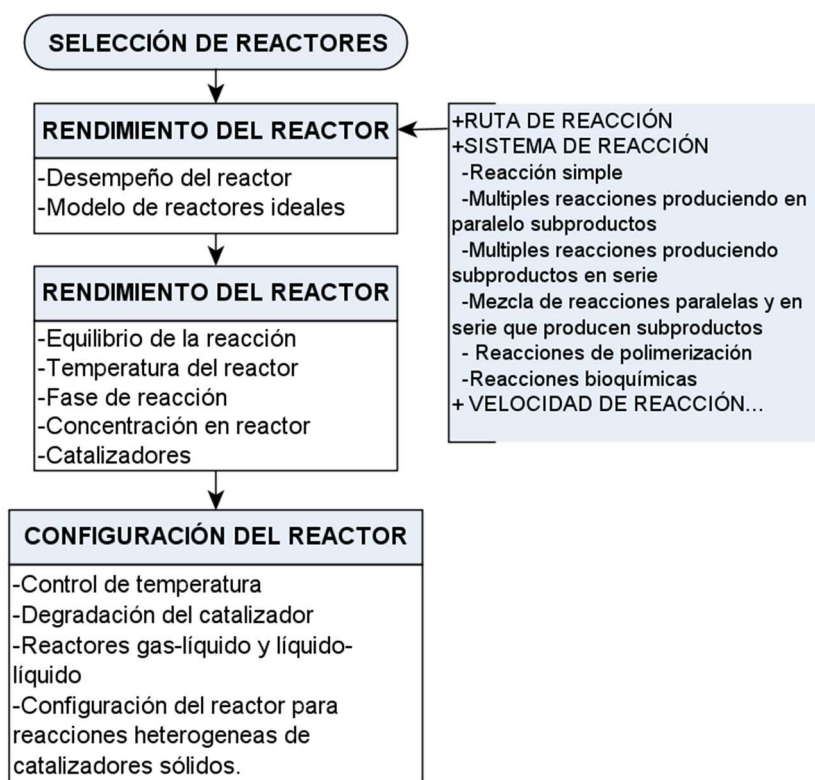


Figura 59. Selección y configuración de reactores, construido de [93].

## B. Síntesis de los trenes de separación.

Habiendo una especificación inicial para el reactor, la atención se dirige a la separación del efluente del reactor. En algunas circunstancias, podría ser necesario llevar a cabo la separación antes del reactor para purificar la alimentación.

Ya sea antes o después del reactor, es posible que la tarea de separación general tenga que desglosarse en una serie de tareas de separación intermedias. Por ello, ahora se considera la elección del separador para las tareas de separación. Si la mezcla a separar es homogénea, la separación sólo puede realizarse mediante la creación de otra fase dentro del sistema o mediante la adición de un agente de separación en masa, ver figura 60.

Si se necesita separar una mezcla heterogénea, entonces la separación se puede hacer físicamente haciendo mano de las diferencias de densidad entre las fases. La separación de las diferentes fases de una mezcla heterogénea debe realizarse antes de la separación homogénea, ya que la separación de fases tiende a ser más fácil. Las separaciones de fases que probablemente se llevarán a cabo son: gas-líquido; gas-sólido; líquido-líquido (inmiscible); Líquido-sólido y sólido-sólido. Los principales métodos de separación de mezclas heterogéneas son mostrados en la figura 60.

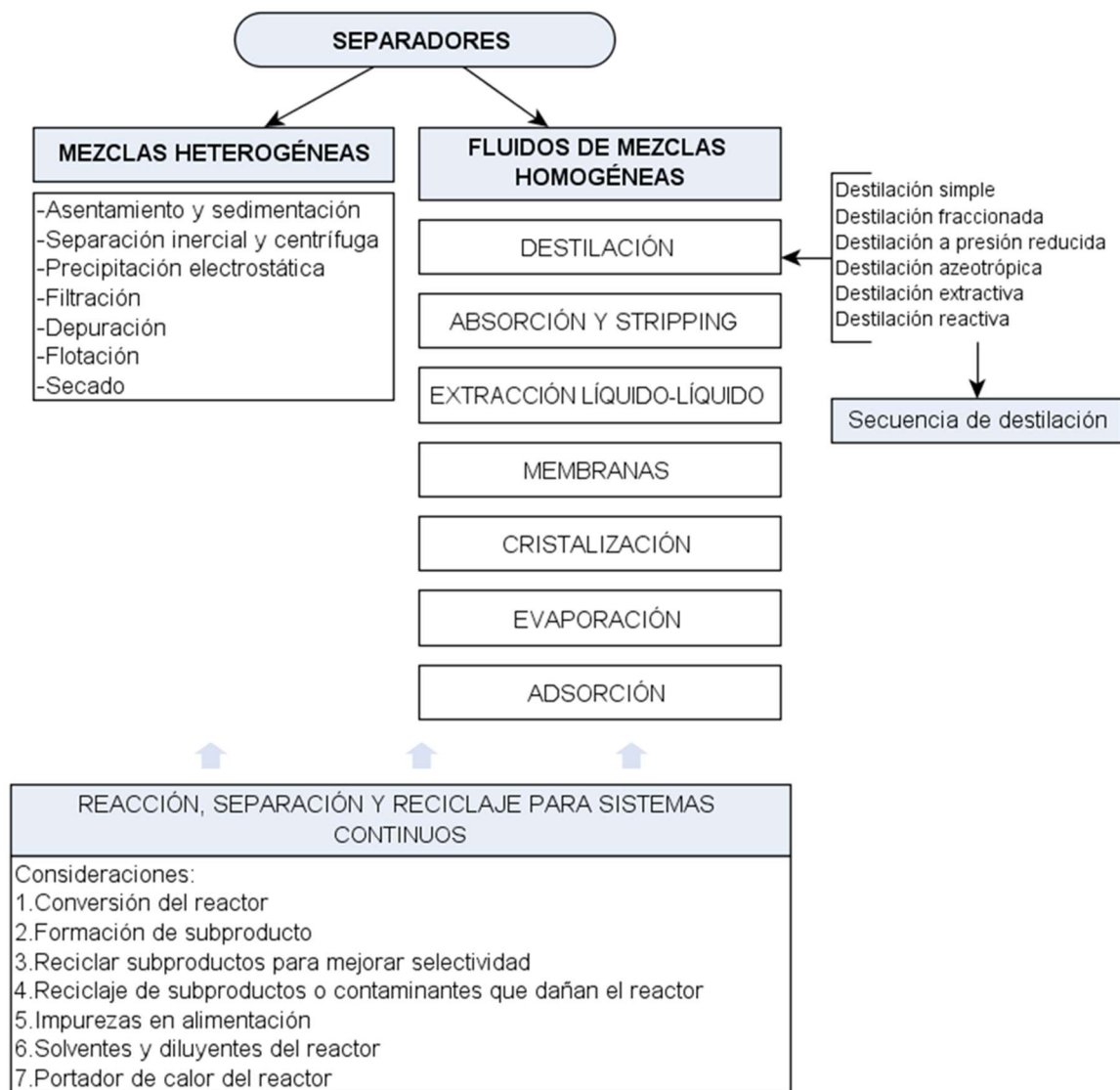


Figura 60. Métodos de separación de mezclas, construido de [93].

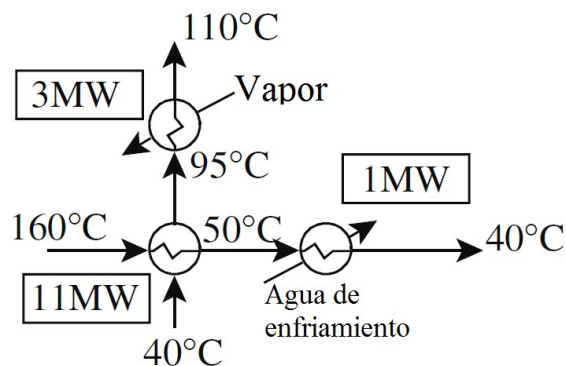
Después de tomar algunas decisiones básicas sobre la elección del reactor y el sistema de separación resultante, estos dos sistemas necesitan ser reunidos. Las materias primas necesitan ser traídas de almacenamiento, purificadas o tratadas si es necesario, y alimentadas al sistema de reacción. El efluente del reactor se pasa al sistema de separación y el producto se aísla, junto con subproductos y material de alimentación sin reaccionar, en esta etapa de la síntesis de los sistemas de separación el reciclaje de algunos materiales, especialmente material sin reaccionar, puede ser la respuesta en la optimización del uso de recursos y reducción en las problemáticas en la disposición de efluentes. Para ello es necesario considerar los principales factores que dictan la estructura de reciclaje de un proceso [93], ver figura 60.

### C. Integración de poder y energía.

Desarrollar la integración óptima del proceso para alcanzar satisfactoriamente las demandas de enfriamiento, calentamiento y energía del proceso [45].

El análisis de la red de intercambiadores de calor identifica primero las fuentes de calor (denominadas corrientes calientes) y los sumideros (denominados corrientes frías) del balance de materia y energía.

Considerar primero un problema muy simple con sólo una corriente caliente (fuente de calor) y una corriente fría (disipador de calor). Es posible calentar la corriente fría utilizando vapor y enfriar la corriente caliente, usando agua de refrigeración. Sin embargo, esto supondría un costo excesivo de energía, que es incompatible con los objetivos de la actividad industrial sostenible, que exigen el uso del consumo mínimo de energía. En su lugar, es preferible tratar de recuperar el calor entre las corrientes de proceso, si esto es posible [54, 93], ver ejemplo de figura 61.



**Figura 61. Un problema simple de recuperación de calor con una corriente caliente y una corriente fría [93].**

Para estimar el uso mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento cuando se usan intercambiadores de calor entre las corrientes calientes y frías del proceso, tres métodos pueden ocuparse: el método de intervalo de temperatura (TI); método del enfoque gráfico y método de programación lineal (LP) [91].

Sabiendo el objetivo para la red de intercambiadores de calor, ahora queda por desarrollar el diseño de la red de intercambiadores de calor, esto es la posición de los intercambiadores de calor en una red de los mismos, asumiendo coeficientes globales de transferencia de calor [93]. Dos métodos pueden ser empleados en esta etapa: El método de diseño pinch y MILP (por sus siglas en inglés, formulation and solution of mixed-integer linear program) [91].

El método de diseño pinch crea una estructura de red basada en la suposición de que ningún intercambiador de calor debe tener una diferencia de temperatura menor que el  $\Delta T_{min}$ . Así, una vez creada una estructura para la red de intercambiadores de calor, la estructura puede someterse a una optimización continua. La identificación de las modificaciones estructurales de la red se puede hacer sobre la base de minimizar el consumo de energía para un  $\Delta T_{min}$  utilizando MILP. Una vez que se han identificado las modificaciones estructurales, éstas deben someterse a un equilibrio detallado de capital y energía mediante la optimización de la PNL [93].

#### **D. Síntesis para la integración de masa.**

Como una extensión de las estrategias de integración de energía y calor, es necesario aplicar la integración de masa de químicos durante el proceso para asegurar el mínimo consumo de agentes externos. Por lo tanto, de forma analógica a la integración de poder y energía, también es necesario estimar el requerimiento mínimo de agentes de separación de masa para determinar el costo mínimo objetivo de operación [54, 91].

#### **E. Secuencia óptima para las etapas del proceso por lotes.**

Este comienza con los equipos individuales, enfocándose en los métodos para asegurar el tiempo y tamaño óptimo del lote. Entonces, el reactor y los procesos de separación son examinados, donde existen compensaciones entre la conversión de la reacción como variaciones con el tiempo de reacción, el costo de separación que decrecen con la conversión, y el tiempo de ciclo del lote. Subsecuentemente, programar los métodos del proceso por lotes con recetas que contienen numerosas tareas y la consideración de varios equipos. Esto aplica a procesos de un solo producto como el diseño de plantas batch para multi-componentes [91].

### 33. Evaluar el plan de control.

Las consideraciones tempranas del control y operación del proceso en el diseño del mismo marcarán la diferencia entre un proceso que es fácil y difícil de controlar. Para permitir la evaluación del control y resistencia de la configuración de los procesos es importante considerar dos aspectos [91]: (1) La clasificación y selección de las variables manipulables y controlables, y (2) La síntesis cualitativa de la estructura del control del proceso basada en el análisis de los grados de libertad y directrices cualitativas.

Para diseñar el sistema de control debemos volver a las CTQ definidas al principio del diseño. Hasta esta etapa del diseño del proceso productivo se basó en el cumplimiento de los requerimientos del cliente (consumidor, el ambiente y el negocio). Ahora, antes de identificar las variables del proceso que deberán controlarse deben identificarse cuales etapas del proceso tendrán mayor impacto en el requerimiento del cliente.

El equipo multidisciplinario del proyecto desarrollará la tercera casa del QFD para identificar qué pasos del proceso tienen mayor impacto en la satisfacción del cliente, usando como ponderador la importancia de los métricos CTQ, ver figura 62.

Esta etapa del despliegue funcional para la calidad debe desarrollarse para cada unidad del proceso permitiendo al equipo un desarrollo detallado del control del proceso.

Una vez identificados los pasos de mayor impacto el equipo de diseño podrá trabajar en el diseño de los parámetros que cumplirán con las especificaciones del producto/ proceso. En este paso

será importante integrar las restricciones operacionales y de seguridad para alcanzar los requerimientos métricos del cliente (métricos CTQ), ya que el proceso estará limitado por los alcances del diseño.



Figura 62. QFD-3 Planeación de los parámetros de diseño, modificado de [48, 86]

Usar el diagrama-P mostrado en la figura 63 para identificar los parámetros de diseño del proceso y los factores ruido iniciando por las unidades de proceso críticas para la calidad (CTQ).

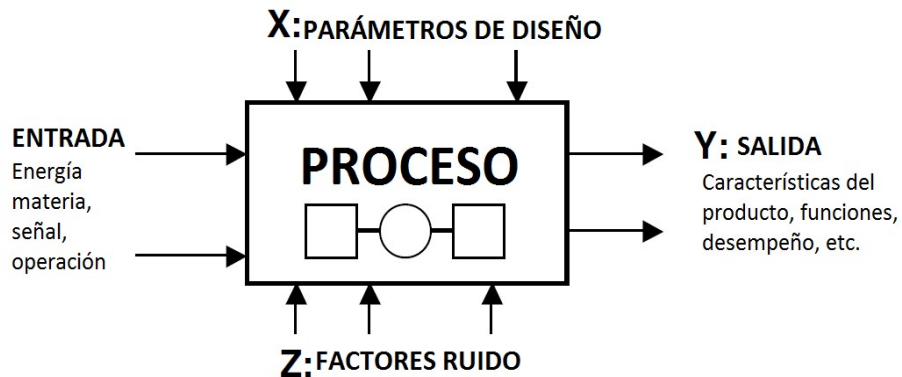


Figura 63. Diagrama-P [48]

Antes de seleccionar el controlador y el sistema de control, debe ser determinado el número permisible de variables manipulables. Esto se discute en los grados de libertad. El número de variables no puede exceder el número de los grados de libertad,

$$N_D = N_{variables} - N_{ecuaciones} \quad (3.1)$$

Donde  $N_D$  es el número de los grados de libertad,  $N_{variables}$  es el número de variables del proceso y  $N_{ecuaciones}$  es el número de ecuaciones independientes que describen el proceso.

La síntesis para el sistema de control de la planta constará de 9 pasos, ver tabla 5, para cada subproceso,

**Tabla 5. Síntesis para el sistema de control [91].**

<b>Paso 1.</b> Establecer objetivos control	Estos están directamente relacionados con las medidas CTQ y las limitaciones del proceso.
<b>Paso 2.</b> Determinar el control de los grados de libertad	El número de válvulas de control en el diagrama de flujo es igual a los grados de libertad. Como las válvulas son posicionadas en el diagrama de flujo, se debe tener cuidado de evitar el control de una corriente por más de una válvula.
<b>Paso 3.</b> Establecer el sistema de administración de la energía	El control de bucles es posicionado para regular reacciones exotérmicas y endotérmicas a las temperaturas deseadas
<b>Paso 4.</b> Establecer la tasa de producción	Esto es completado por la colocación de un bucle de control de flujo en la corriente principal de alimentación o en una de las corrientes de los productos principales
<b>Paso 5.</b> Controlar la calidad del producto y manejar las limitaciones de seguridad, ambiental y operativas.	Estos controles deben ser dirigidos en esta etapa después de asegurar la velocidad de la producción y el efecto del disturbio de la temperatura. Pruebas guiadas por diseños de experimentos pueden usarse a este nivel para asegurar la optimización robusta. Como lo muestra el diagrama-P de la figura x, las Y de salida usualmente están en función de los parámetros de diseño X y los factores ruido Z. Siendo $Y=f(X,Z)$ El diseño de experimentos de Taguchi es una herramienta que puede emplearse en esta etapa del diseño para asegurar la optimización del efecto de las variables controlables sobre las variables ruido. Para esta etapa del diseño, los experimentos y validaciones podrán realizarse por simuladores de proceso, pruebas piloto y pruebas de rendimiento del producto obtenido a este nivel. Las técnicas de diseño para X están en parte del diseño detallado donde la técnica poka-yoke puede ser aplicada (el poka-yoke es una técnica que para eliminar el riesgo de errores humanos).
<b>Paso 6.</b> Establecer una velocidad de flujo en cada buque de reciclaje y controlar los inventarios de vapor y líquidos.	Una vez optimizadas las variables de operación, se establecerá la velocidad de flujo de corrientes de vapor y líquidas.

<b>Paso 7.</b> Revisar los balances por componentes.	Bucles de control son instalados para prevenir la acumulación de especies químicas en el proceso.
<b>Paso 8.</b> Controlar las unidades de proceso individuales.	Los grados de libertad remanentes son asignados para asegurar el adecuado control local.
<b>Paso 9.</b> Optimización económica y Mejorar el control dinámico	La asignación de válvulas remanentes es usada para la mejora del desempeño dinámico y económico del proceso.

**ii. Conducir la validación del diseño.**

34. Evaluación D-AMEF

Para conducir la validación del diseño se ocupará el un análisis de modo y efecto de riesgos del diseño (D-AMEF) permite visualizar y priorizar actividades que mejorarán la confiabilidad del diseño. La figura 64 representa la mejor ruta de aplicación de esta herramienta, donde se evaluarán las funciones del negocio o estructuras del proceso diseñado. Esto permitirá que el equipo de diseño pueda hacer correcciones antes de iniciar el diseño detallado del proceso de producción.

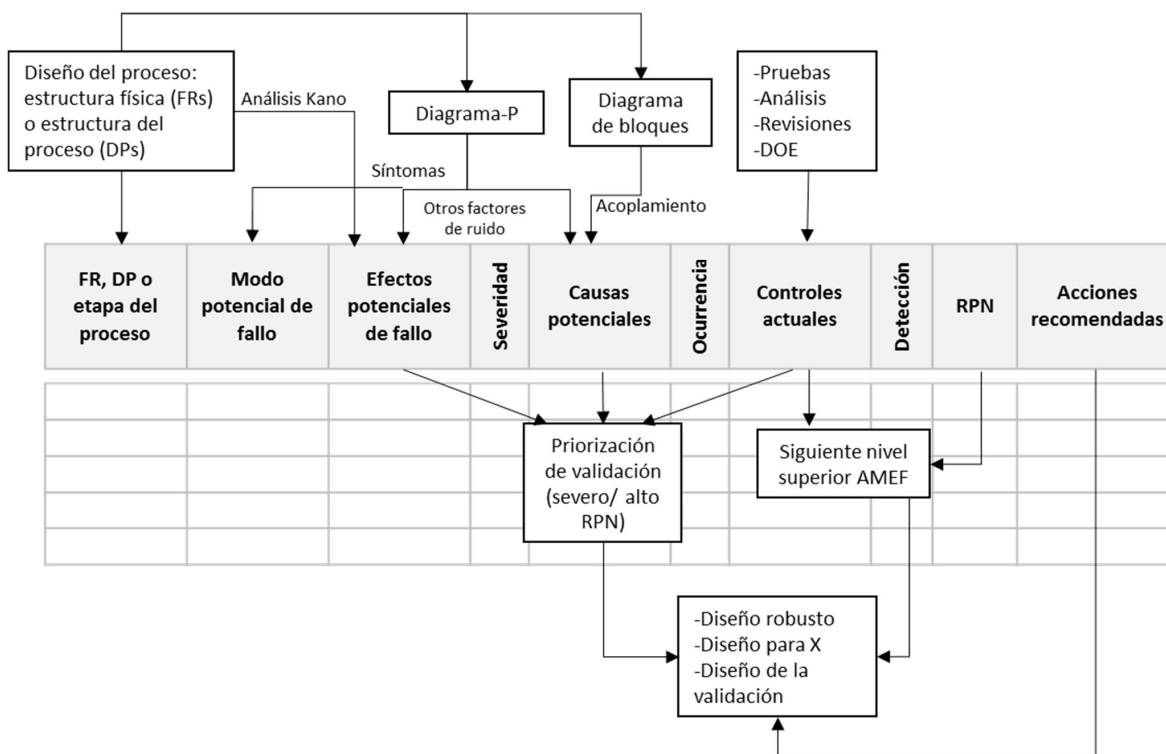


Figura 64. Análisis AMEF para la validación del diseño [91].



Otra herramienta que puede incluirse en esta validación de resultados es la evaluación es el análisis ciclo de vida, con esto los indicadores ambientales podrán ser bien especificados e incluidos en la creación del cuadro integral de control, que se explicará posteriormente en este trabajo.

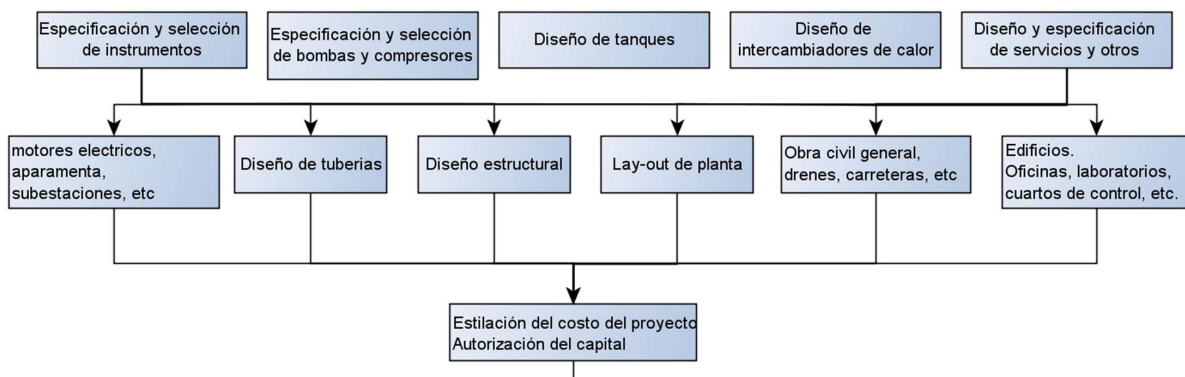
### 3.4.2 Diseño del proceso de producción

Del mapa principal del proceso a nivel funcional seleccionado se desarrollarán los sub-procesos, considerando los 8 elementos críticos (Producto/servicio, proceso, tecnología /IT, RH, Instalaciones, Legal/normatividad, equipos/ materiales y comunicaciones con el cliente) [86].

#### i. Finalizar el diseño del proceso.

##### 35. Diseño detallado de equipos

Como se muestra en la figura 65, esta etapa cubre los pasos del diseño detallado en (1) determinación del tamaño de equipos; (2) sacar a la luz los cálculos económicos y (3) la optimización del diseño [91].



**Figura 65. Diseño detallado de los equipos [53].**

El equipo de diseño realizará el diseño detallado de equipos considerando lo siguiente [97]:

- Diseño de tanques: asegurar el fácil acceso a los tanques para simplificar su limpieza; y diseñarlos para su completo drene.
- Diseño de tuberías: recuperar las corrientes por separado; minimizar el largo de la tubería, esto disminuirá el inventario en proceso (WIP); Enrutar las líneas de dren, venteo y alivio a recuperación o tratamiento; y minimizar el número de válvulas y bridas.
- Diseño de instrumentación: emplear analizadores en de proceso en línea; usar puertos de muestreo en ciclo cerrado; instalar equipos de monitoreo para el mantenimiento preventivo; instrumentación en intercambiadores de calor que permitan monitorear en tiempo real el ensuciamiento y las fugas; y considerar estrategias de control tanto como un modelo base de control.

- Selección de materiales: Considera el costo de disposición cuando se seleccionan las tasas de corrosión máximas permitidas; considerar la resistencia de los materiales a ensuciarse como el teflón en superficies que requieren una limpieza frecuente; y considerar los revestimientos de vidrio o polímeros cuando la limpieza es requerida con frecuencia.
- Estimación de costo: Incorporar el costo de desperdicio perdido en la estimación de costos.

## ii. Conducir el diseño del sistema de producción

### 36. Entregables del diseño de producción

Una vez definido el detalle del diseño del proceso se actualizará el mapa de *proceso de alto nivel* para cada unidad del proceso productivo. Y se definirán los ocho factores críticos del producto, figura 66.

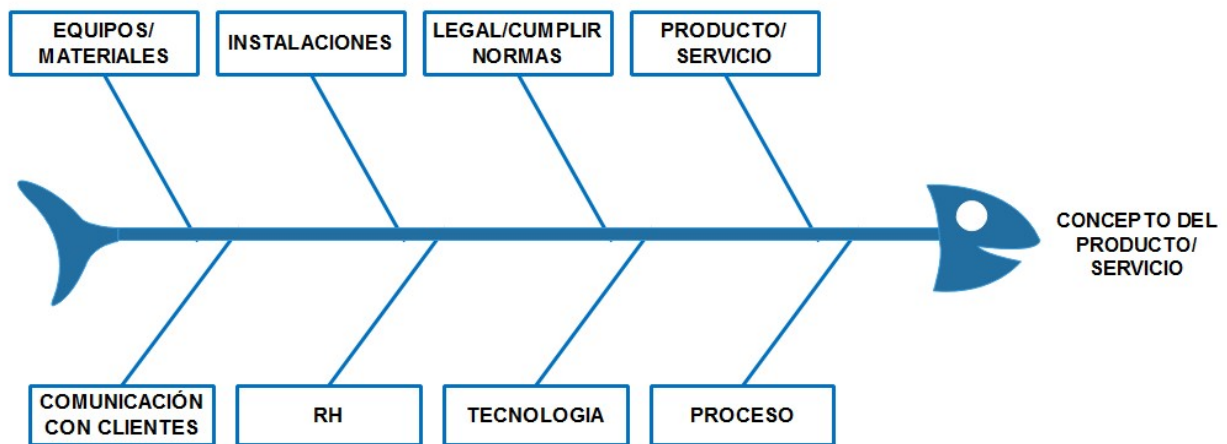


Figura 66. Ocho elementos críticos del concepto del producto [86].

Aunque el diseño para Lean fue la base de toda la creación del diseño para maximizar el *valor* al cliente y tener mínimas oportunidades de construir desperdicios dentro del diseño de los *procesos del negocio*. El equipo de diseño se ocupará de orientar el conjunto de las labores de diseño del sistema de producción para minimizar o eliminar aquellas actividades que no agregan *valor* a las partes interesadas [52]: elevado costo o dificultad de manufactura o servicio de entrega; muchos requerimientos de inspección y pruebas; difícil de mantener y reparar; difícil de operar o almacenar; complejo de operar o usar; sensible a la variación y al ruido del ambiente; elevadas competencias para operar; baja disponibilidad y elevado costo en el suministro de materias primas; complejo para manufacturar, o alto costo para su distribución; costosa primera inversión en equipos o es mandatorio tener conocimiento, competencias o material especializado. Los elementos entregables al finalizar el diseño del proceso y manufactura serán los siguientes, tabla 6:

**Tabla 6. Entregables críticos del diseño de la producción [86, 91]**

<b>Factor crítico</b>	<b>Entregable</b>
PRODUCTO	+Descripciones +Diseño del producto +Legal, análisis regulatorios +Muestras de pruebas de producto +Cálculos de diseño +Especificaciones
PROCESO	+ Mapas del proceso de la cadena de valor +Diagramas de flujo del proceso +Rutas alternativas +Mapa de despliegue funcional.
TECNOLOGÍA/IT	+Diseño técnico + Construir/desarrollar sistema +Probar el sistema + Aprobación del usuario +Implementación del sistema +Pruebas de desarrollo y ambiente
CAPITAL HUMANO / RH	+Análisis de puesto tarea +Diseño organizacional +Diseño de capacitaciones + Reconocimientos
INSTALACIONES	+Dibujos +Modelos +Diagramas lay-out +Especificaciones
EQUIPO/ MATERIALES	+Descripciones +Modelos +Especificaciones +Diseños de formas
COMUNICACIÓN CON EL CLIENTE	+Segmentación +Lista de documentos +Limitación +Diseños de marketing
LEGAL/ NORMATIVIDAD & AUDITORIA	+Reglamentos +Opinión +Especificaciones +Procedimientos de revisión

**iii. Desarrollar requerimientos a nivel actividades.**

37. Construcción de los procedimientos de operación

Las tareas a nivel actividades surgirán del diseño detallado de los procesos, los ocho elementos críticos deben ser contemplados en este desarrollo.

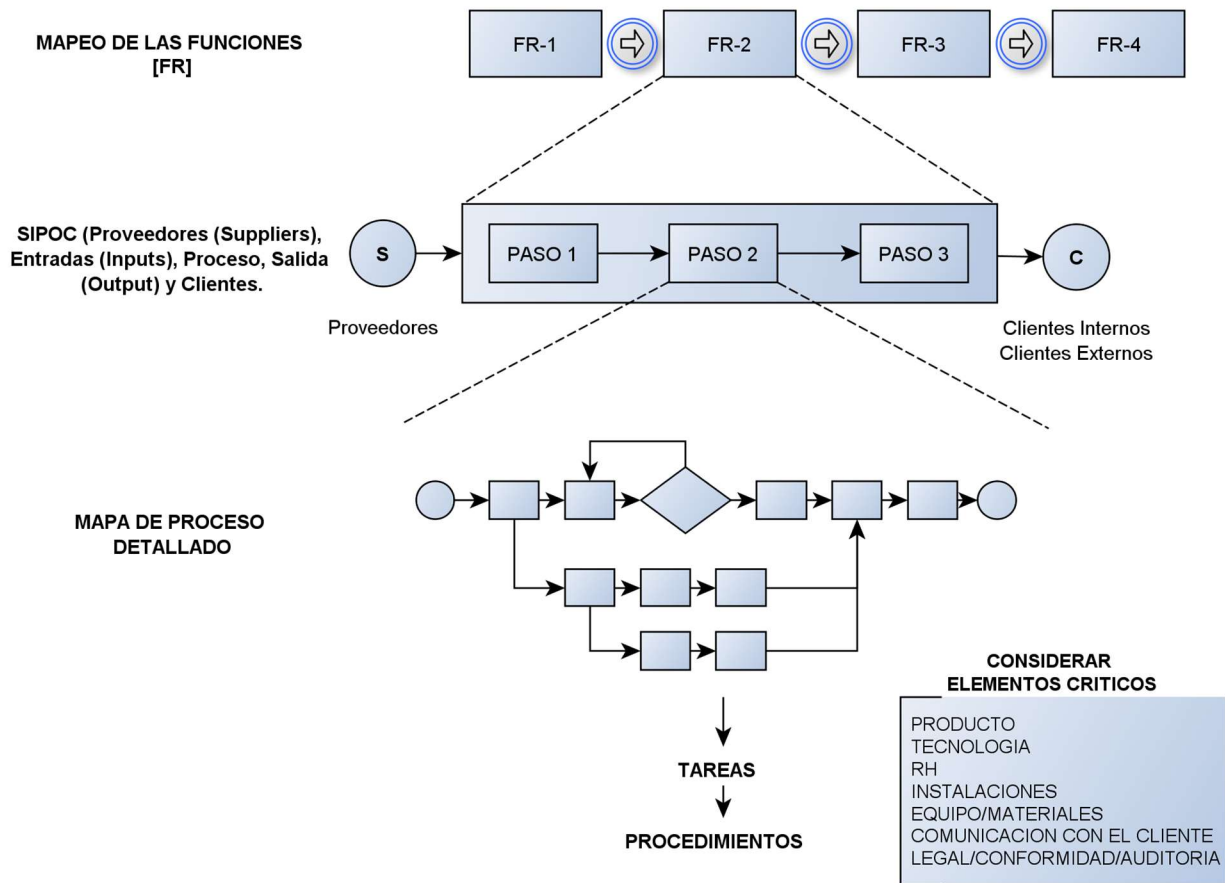


Figura 67. Desarrollo a nivel tareas, modificado de [86]

En la figura 67 podemos visualizar el resultado del desarrollo del proceso. El equipo de diseño partió de los requerimientos del cliente para fabricar el mapeo de las funciones del negocio que agregan *valor* al cliente. De las funciones del negocio se desarrollaron el diseño del producto y la síntesis del proceso productivo. Las unidades de procesamiento diseñadas fueron la base para la construcción de los mapas SIPOC y el mapa del proceso detallado. Es el momento de identificar aquellas tareas y actividades que impactan en los requerimientos del cliente.

Estas actividades deben estar focalizada en agregar valor con una mentalidad Lean. Para cada etapa del proceso pueden asignarse las tareas con el objetivo de satisfacer el requerimiento del paso siguiente del proceso productivo.

#### iv. Conducir el proceso de pruebas, ajuste y validación

##### 38. Diseño de indicadores de desempeño.

Para predecir y mejorar la calidad final del producto durante el proceso de diseño; identificar procesos u otros elementos de diseño que mantengan un nivel de sigma bajo; impulsar la recolección de datos e información y proporcionar el método para la toma de acciones

correctivas durante el diseño se establecerá un sistema de control del proceso. Este debe ser desarrollado y simulado antes de su implementación, ver figura 68.

El diseño de scorecards viene de objetivos claros de desempeño para el cumplimiento de los métricos CTQ. Es un conjunto de mediciones que entrega a los altos ejecutivos/líderes de proyecto una visión rápida e integral del negocio. Incluye indicadores financieros que dan resultado a las acciones ya tomadas. Y los complementa con indicadores operacionales sobre satisfacción de los clientes, procesos internos y actividades operacionales sobre innovación y aprendizaje al interior de la organización; indicadores que son impulsores del desempeño financiero futuro [99, 100]; así como indicadores ambientales que permitirán al negocio realizar mejoras inmediatas o planes a medianos plazos.

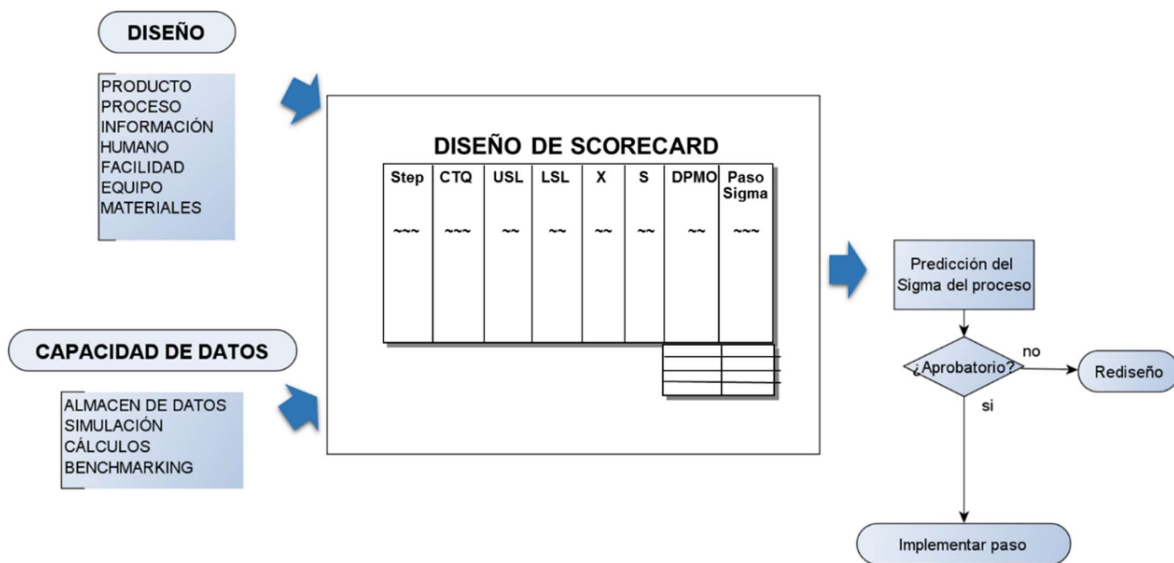


Figura 68. Diseño del proceso de validación del diseño [86].

Aquí se evalúa la factibilidad del diseño del proceso de producción y si éste cumple con todos los requerimientos tanto del consumidor como del negocio y del ambiente.

Al concluir esta etapa del DFS se presentará un diseño detallado del proceso químico, así como un plan de ejecución para el proceso de manufactura.

#### v. Conducción de la instalación del proceso de producción

##### 39. Construir el plan de puesta en marcha del proceso productivo

Desarrollar tareas detalladas para la puesta en marcha del proceso en etapas de un proyecto. Creando un plan del proyecto que incluya fecha de inicio, fecha de culminación, responsables y la descripción de la actividad.

### 3.5 Ejecutar

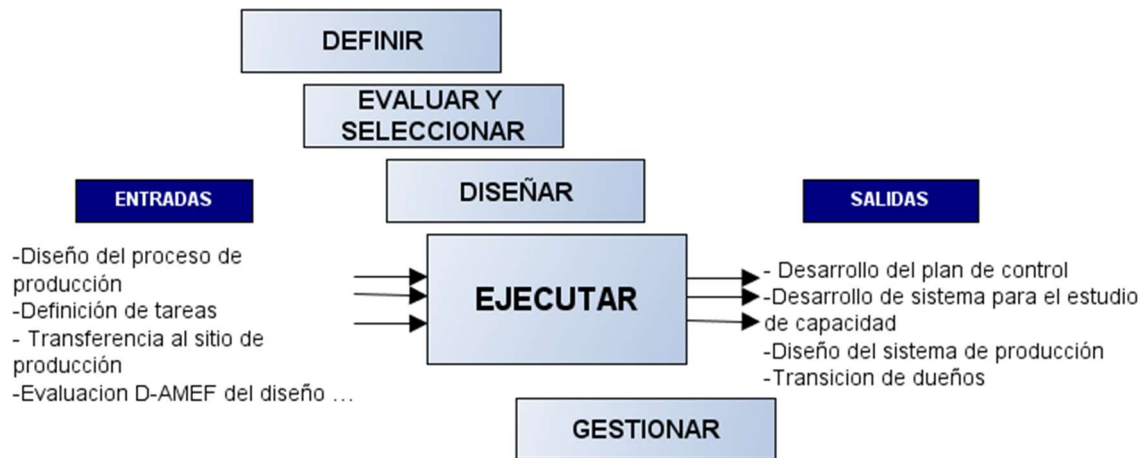


Figura 69 Entradas y salidas de EJECUTAR

#### 3.5.1 Proceso de operación, control y ajuste

La implementación del proyecto DFS con una planificación inicial del lanzamiento, combinada con una formación del operador justo a tiempo, permite un lanzamiento suave y una rampa para la producción a toda velocidad [48].

Derivado de la comprensión de las variaciones en el rendimiento de las expectativas. El lanzamiento y producción en masa es una oportunidad para confirmar que el proceso de producción no ha cambiado los requisitos funcionales de diseño. El equipo del proyecto debe comprobar esto antes de que el cliente reciba el diseño.

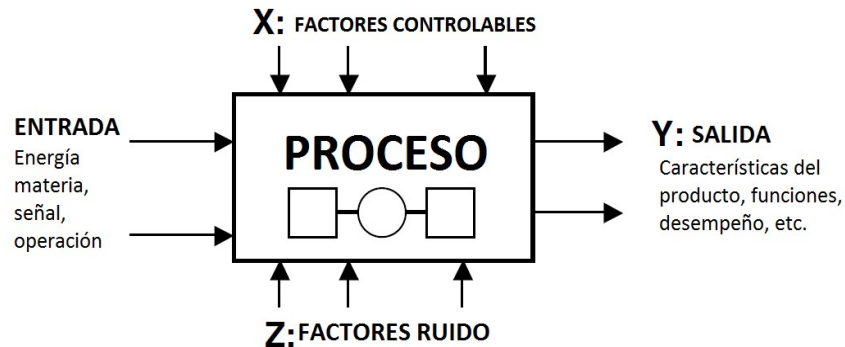
##### i. Desarrollar plan de control

En el lanzamiento y la producción en masa también comienzan la transición del control de calidad en línea al control de calidad en línea y la gestión diaria. Con eso viene la responsabilidad de implementar técnicas de poka-yoke y diseños para Lean con métodos de calidad en línea para mejorar continuamente a un ritmo más rápido que el de los competidores, de la siguiente forma [48, 52]:

- Desarrollar e iniciar un plan de soporte de lanzamiento para la fabricación, y mantenimiento y servicio.
- Construir una estrategia de reacción de preocupación de lanzamiento.
- Apoyar un plan de lanzamiento de marketing.
- Implementar un plan de lanzamiento de producción.
- Implementar una evaluación de capacidad de producción en masa.
- Mejorar el producto y el proceso a un ritmo más rápido que el de los competidores.
- Utilizar los procedimientos disciplinados para recolectar, sintetizar y
- Transferir información a los libros de diseño corporativo.

#### 40. Conducir las pruebas para el desempeño del producto.

En la evaluación del plan de control se ocupó el diagrama-P para identificar los parámetros o variables de diseño que sirven para controlar el proceso. En esta etapa se desarrollará el plan total de control de tolerancias mediante el diseño de experimentos para encontrar la relación causa-efecto entre la salida y los factores experimentales en el proceso. Y consiste en tres pasos importantes: (1) planear los experimentos; (2) desempeño de los experimentos y (3) análisis y verificación de los resultados de los experimentos.



*Figura 70. Modelo del proceso [48].*

El modelo de diseño de experimentos (DOE) es mostrado en la figura 69, este diagrama es el mismo que el diagrama-P.

En los proyectos DOE podemos modificar los niveles de los factores controlables deliberadamente y observar el efecto de estos en la respuesta de salida. Los datos obtenidos de estos experimentos son usados para construir los modelos matemáticos que expresen la relación entre los factores experimentados y la respuesta de salida. Las Y de salida usualmente están en función de los factores controlables X y los factores ruido Z.

$$Y = f(X, Z) \quad (3.1)$$

Los factores controlables son aquellos factores que son controlables en el proceso productivo como son flujo, temperatura, presión, nivel, algunos pueden ser del sentido administrativo. Los factores ruido son los factores incontrolables en el proceso productivo, estos pueden ser uno o la combinación de tres tipos: diversas condiciones de uso, uso y deterioro, y diferencia individual.

En la figura 71 se muestra el desarrollo del diseño de experimentos para la robustez de Taguchi, que consta de: la evaluación de la función mediante transformación de la entrada; estudiar las interacciones entre los factores de control y ruido; el uso de matrices ortogonales y relaciones señal-ruido para mejorar la robustez; optimización en dos pasos y el diseño de la tolerancia usando el acercamiento de la función de la pérdida de la calidad.

El resultado obtenido es la predicción del desempeño esperado y los niveles de operación óptimos. La validación de la predicción debe realizarse a escala y en el proceso productivo (2-P).

## MÉTODO DE TAGUCHI

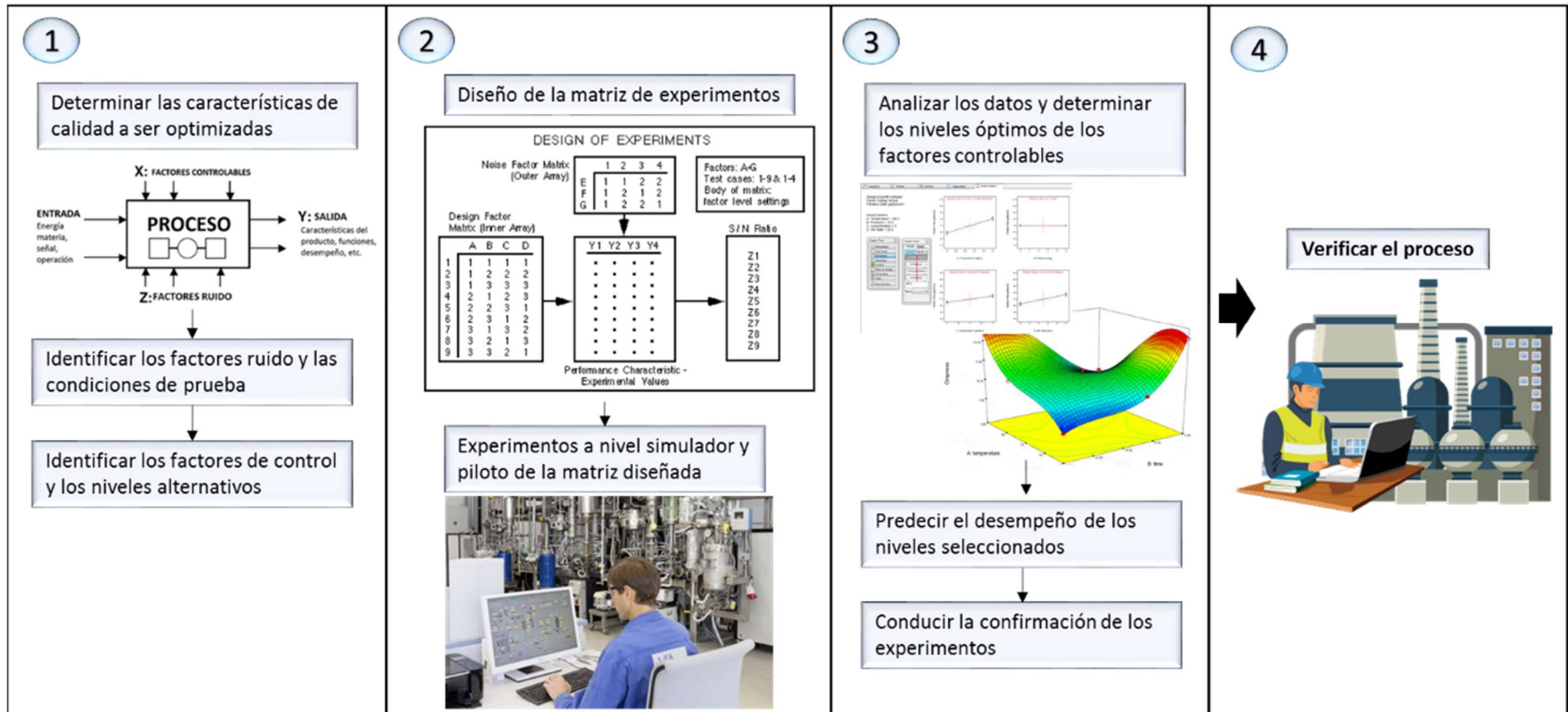


Figura 71. Desarrollo de experimentos, construido de [48, 52].



## ii. Verificar el proceso y medidas de capacidad

### 41. 2P-Preparación para la producción/validación del proceso

Del diseño de experimentos para Taguchi surgió una función objetivo, que optimizará los niveles de las variables controlables del proceso para minimizar la variación de la respuesta deseada. La resolución del punto óptimo de operación se validó por simulación, laboratorio y escala piloto. Ahora será necesario verificar que las condiciones de operación determinadas proporcionan los resultados deseados a nivel industrial, herramientas como *2P- Preparación para la producción* pueden emplearse para realizar la validación del proceso y extraer información importante en el proceso productivo donde participará toda la cadena de suministro [86]:

- Calidad de diseño establecida durante la planeación y el diseño del producto.
- Volumen necesario de producción, el ritmo de producción (takt time)
- El costo del objetivo de producción.
- Entrega en tiempo del producto al mercado.

### 42. Medidas de capacidad

Una vez ajustado el proceso y disminuido su variación se evalúa la capacidad del proceso. Un estudio de capacidad es un procedimiento ordenado de planeación, recolección y análisis de información con la finalidad de evaluar la estabilidad de un proceso y la capacidad que éste tiene para producir dentro de las especificaciones. Los estudios de capacidad miden la variación y el centrado de un proceso respecto a sus especificaciones. La figura 72, muestra los pasos del desarrollo de un estudio de capacidad del proceso.

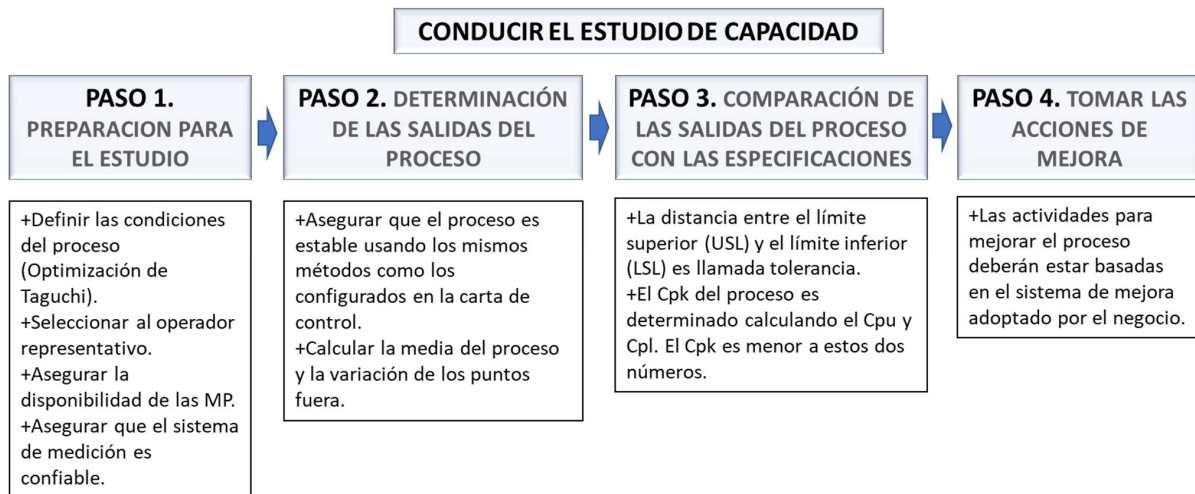


Figura 72. Desarrollo del estudio de capacidad del proceso, construido de [42].

## 3.5.2 Producción

### i. Implementación de principios Lean-Green

#### 43. Construir una filosofía laboral y desplegar las políticas del negocio

Para conseguir la implicación de todos en la mejora continua de una manera que sume hasta lograr grandes mejoras corporativas dirigidas a la eficiencia de la gestión sustentable de todos

los recursos de la cadena de valor, requiere metas y objetivos alineados y una medida constante del progreso hacia estos objetivos específicos, medibles y exigentes.

Se ocupará el *Hoshin kanri*, también conocido como *despliegue de políticas*, figura 73, que es el proceso para fijar objetivos en cascada, desde la alta dirección hasta el grupo de trabajo. Las metas agresivas se inician a nivel ejecutivo y después cada nivel, a su vez, va desarrollando sus objetivos medibles para el año, pensados para apoyar la meta del nivel ejecutivo.

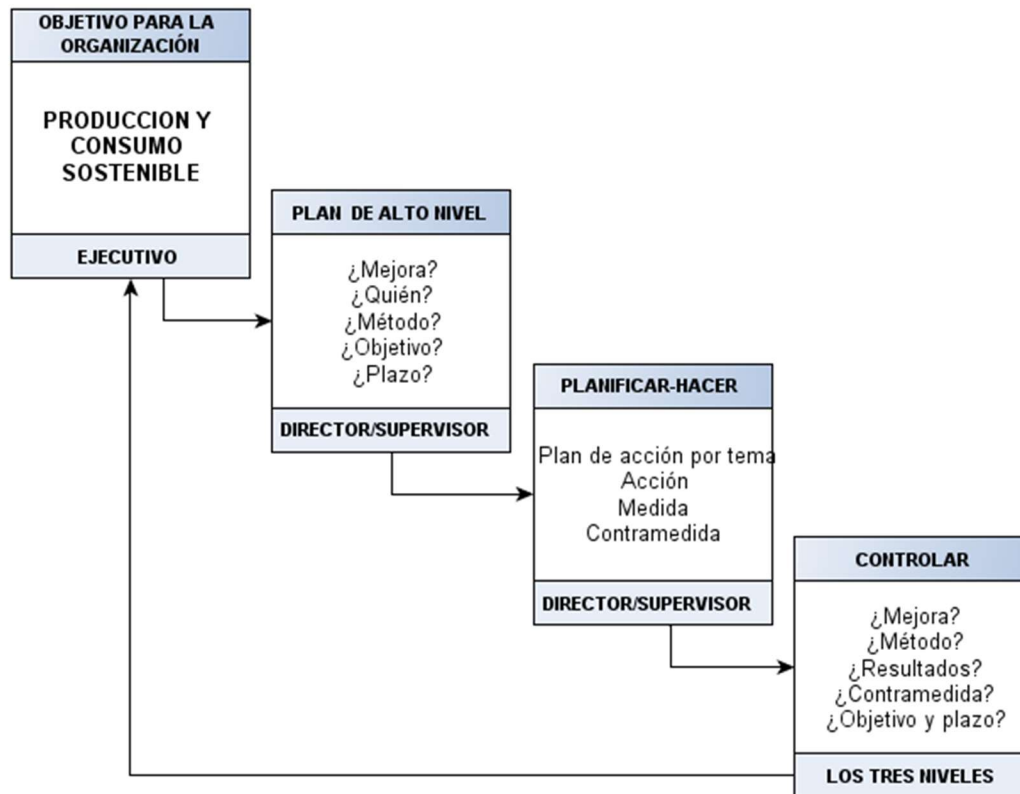


Figura 73. Despliegue de políticas en la organización, modificado de [46].

#### 44. Implementar procesos de producción

La planeación efectiva de la producción de acuerdo a la demanda del cliente (takt time) puede ser determinada en esta etapa, ya que los tiempos de cada operación son conocidos de la práctica del 2P (Preparación para la producción).

**Utilizar el sistema de jalón (pull).** Para garantizar la entrega justo a tiempo del producto al consumidor final. La planeación de la producción dependerá de la demanda del cliente y del *lead time* del producto. Parte de la mejora continua del proceso será hacer el *lead time* tan corto como sea posible. Los sistemas de *kanban* se implementarán donde el proceso así lo requiera.

**Nivelación de la carga de trabajo (heinjuka).** Desde el diseño del proceso, las unidades de procesamiento se diseñaron para satisfacer en tiempo la demanda del mercado actual y futura (MGPP). Esta nivelación deberá incluir la eliminación de las tres M: Muda (sin valor agregado); Muri (sobrecarga de trabajo del personal o de las maquinas) y Mura (desnivelado) [46].

#### 45. Transición de dueños del proceso

Crear el plan estratégico para un periodo de tiempo con objetivos, políticas y acciones que se desplegarán (*Hoshin kanri*) hasta un plan operativo anual.

El plan operativo anual es un documento formal en el que se enumeran, por parte de los responsables de una entidad facturadora (compañía, departamento, sucursal u oficina) los objetivos a conseguir durante el presente ejercicio.

El plan operativo anual debe estar perfectamente alineado con el plan estratégico de la empresa, y su especificación sirve para concretar, además de los objetivos a conseguir cada año, la manera de alcanzarlos que debe seguir cada entidad (departamento, sucursal, oficina).

Para alcanzar un ciclo constante de consumo y producción sostenible es importante hacer crecer líderes que comprendan perfectamente el trabajo, vivan la filosofía y enseñen a otros. Estos líderes tienen algunas cosas en común [46]:

- Estarán enfocados en el propósito a largo plazo para la organización, contribuyendo al *valor agregado* para la sustentabilidad.
- No se desviarán nunca de los preceptos de la organización y vivirán y se moldearán alrededor de estos y *facilitarán* para que otros puedan percibir.
- Labrarán su camino haciendo un trabajo escrupuloso y continuarán yendo a la ubicación del problema, que es el lugar donde realmente se lleva a cabo el trabajo que añade *valor*.
- Contemplantos los problemas como oportunidades para entrenar y apoyar a sus colaboradores.

Un plan detallado de capacitación y entrega debe ser elaborado en esta etapa de la transición.

## ii. Implementar e Institucionalizar el diseño, medidas y control de procesos

#### 46. Crear un cuadro de mando integral

Para alcanzar las metas estratégicas de la compañía es muy importante que todas las personas que conforman la organización tengan la claridad de la dirección a seguir para lograr estos objetivos y conozcan de qué manera desde su posición en la empresa van a colaborar en la misma.

Las figuras de medición desarrolladas en la evaluación del desempeño de calidad del diseño del proceso se ocuparán como los indicadores de desempeño del negocio en un *cuadro de mando integral* que tenga como objetivo principal fungir como una herramienta de medición y de gestión que permite direccionar los esfuerzos del talento humano para traducir la estrategia en ejecución hacia la producción y el consumo sustentable del producto. Como muestra la figura 74 muestra el cuadro de mando integral se compone de cinco perspectivas:

**Perspectiva financiera.** Es el vínculo final de los objetivos de cada unidad de negocio con la estrategia de la compañía, es decir la meta final que se persigue en la empresa, generar utilidad.

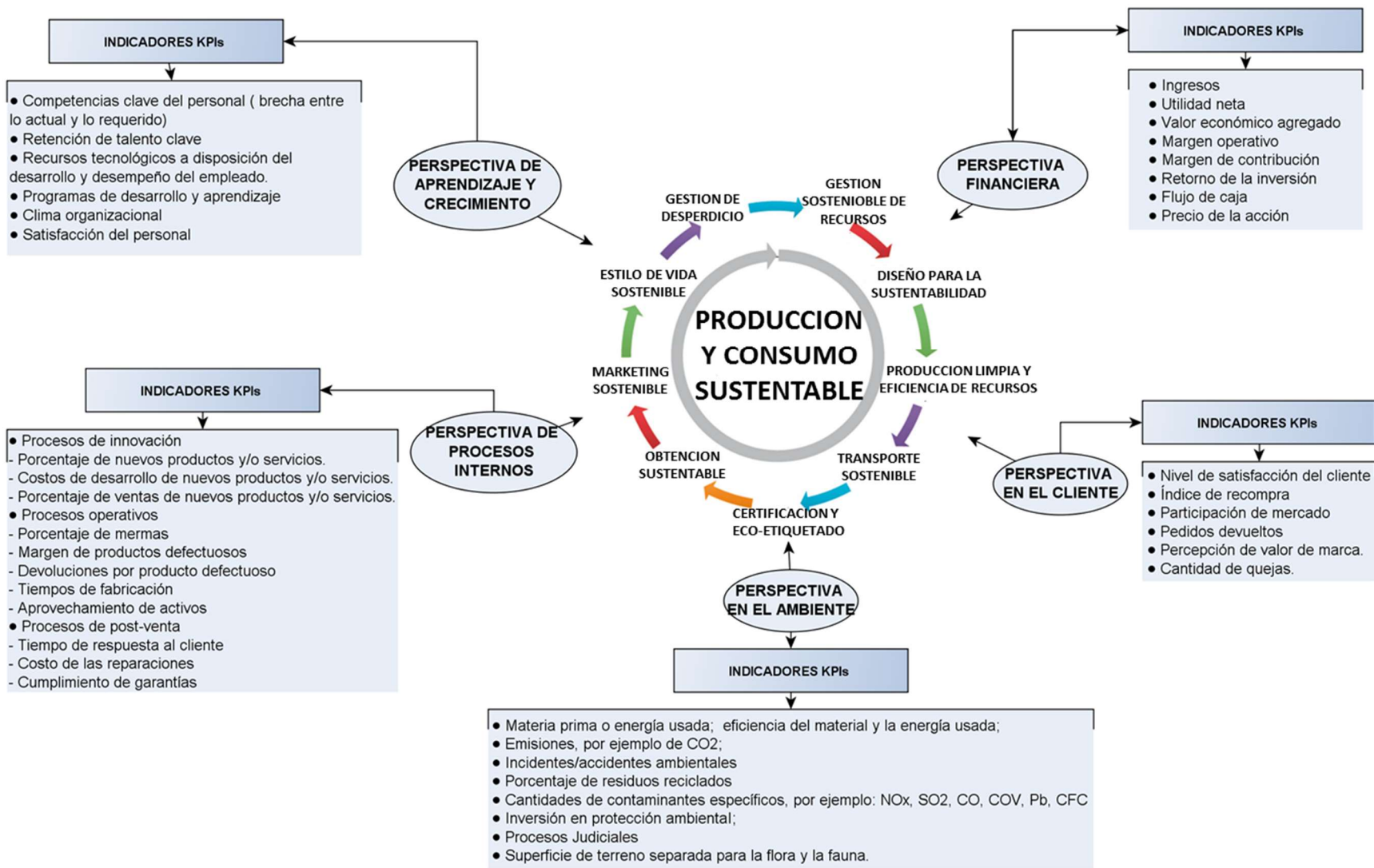


Figura 74. Cuadro integral de mando, construido de [38, 77, 99]

Por lo general este rubro incluye objetivos de índole estratégico como el incremento de los ingresos, el aumento en las utilidades, la mejora de operaciones, el ahorro de gastos, la utilización de recursos y capital [99]. Algunos indicadores de estos son los identificados en la figura 74.

**Perspectiva en el cliente.** Es importante centrarse en lo que la empresa requiere llevar a cabo para garantizar la retención del cliente y la adquisición de clientes futuros para brindar rentabilidad a la organización. De esto depende en gran parte la generación de ingresos que se verán reflejados en la perspectiva financiera [99]. Algunos indicadores de estos son los identificados en la figura 74.

**Perspectiva en el ambiente.** Los objetivos ambientales que una organización establece deberían considerarse como parte de sus objetivos de gestión global. Esta integración puede incrementar el valor no solamente del sistema de gestión ambiental sino también de otros sistemas de gestión a los cuales se aplica la integración. La organización deberá establecer indicadores de desempeño ambiental medibles [38, 99]. Algunos indicadores de estos son los identificados en la figura 74.

**Perspectiva de procesos internos.** Ésta busca la alineación de las actividades de los colaboradores con los procesos clave de la empresa para con esto establecer los objetivos estratégicos. De esta manera se pueden revisar y mejorar los procedimientos internos que conforman la cadena de valor. Es importante que esté adecuado y diseñado según las operaciones de la empresa [99]. Algunos indicadores de estos son los identificados en la figura 74.

**Perspectiva de aprendizaje y crecimiento.** Es en este rubro en que la empresa debe poner especial atención para obtener resultados a largo plazo, dentro de éste se pueden identificar tres áreas principales: **capital humano** (se refiere al conocimiento que tiene el equipo de trabajo así como su capacidad para aprender y adaptarse a los nuevos retos en el ámbito laboral); **sistemas e infraestructura** (en este apartado se incluye el apoyo tecnológico, la información y los recursos que la empresa brinda a su talento humano para llevar a cabo sus actividades de manera más efectiva) y **clima organizacional** (este factor es de gran relevancia ya que su medición indica cómo se sienten tus colaboradores trabajando para la empresa, si se identifican con sus valores y las percepciones que tienen acerca de las oportunidades de cambio que pueden ayudar a mejorar la empresa como lugar de trabajo. Esto generalmente tiene repercusiones a nivel productividad, rotación de personal etc.) [99]. Algunos indicadores de estos son los identificados en la figura 74.

#### 47. Documentación de procedimientos

Las tareas estandarizadas son el fundamento de la mejora continua y la autonomía del empleado. La tarea crítica a la hora de implantar la estandarización es encontrar el equilibrio entre suministrar a los empleados rígidos procedimientos y darles la oportunidad de innovar y ser creativo para cumplir consistentemente objetivos que sean un desafío en términos de costo, impacto ambiental, calidad, y plazo de entrega, ver figura 75.

Los estándares tienen que ser lo suficientemente específicos como para ser guías útiles, pero lo suficientemente generales como para permitir flexibilidades. En un trabajo manual repetitivo, los estándares deben ser bastante específicos. La gente que hace el trabajo tiene que mejorar esos estándares.

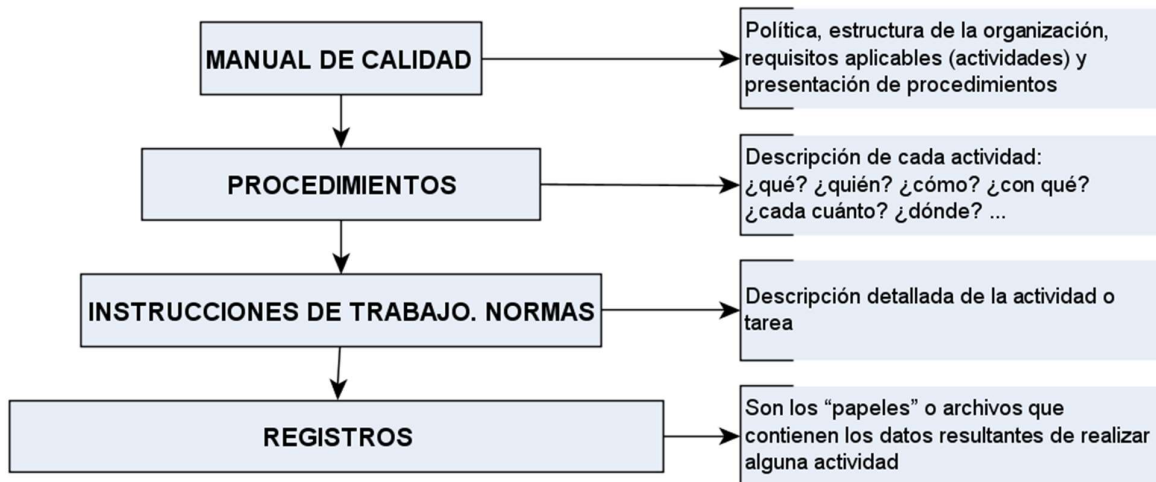


Figura 75. Sistema de documentación de procedimientos [38].

#### 48. Entrega del proceso

Es el proceso de entrega de la información a lo que se convertirán en los dueños del proceso. Las capacitaciones del personal dependerán de la correcta guía de los líderes del proceso siguiendo un plan detallado de capacitación y entrega del proceso con las siguientes características: plan anual. Sistema de medición (KPI's) actual y por los siguientes doce meses- cuadro de mando integral; oportunidades descubiertas en los análisis AMEF que no fueron atacadas; implicaciones al cambiar recursos, gestión y clientes; paquete de diseño; mejorar prácticas; aprendizajes clave para el proceso, relaciones y resultados.

Al finalizar esta etapa del DFS el proceso se entregará un plan de control del proceso productivo, el desarrollo del sistema para el estudio de capacidades, el diseño del sistema de producción y la transición completa de la operación a la cadena de valor.

### 3.6 Gestionar

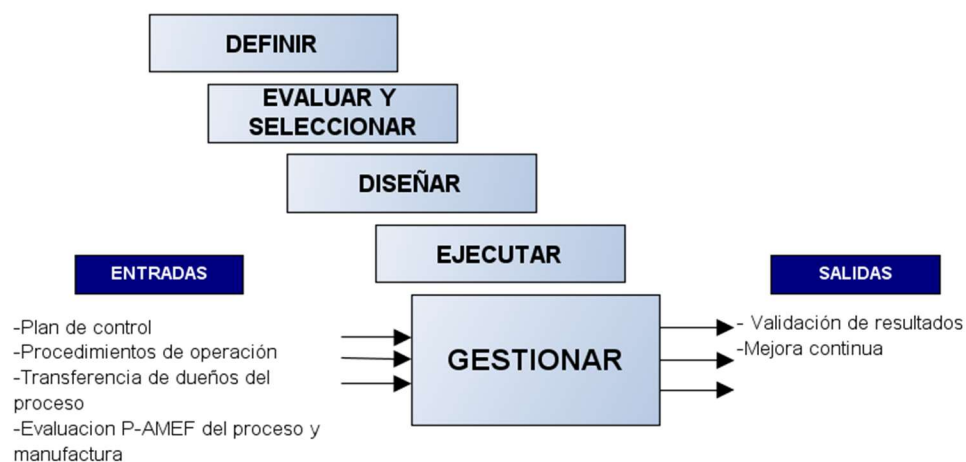


Figura 76. Entradas y salidas de GESTIONAR.

### 3.6.1 Validación de resultados

Como elemento final se tiene la preparación del material necesario para la validación de los elementos definidos. Un aspecto a tener en cuenta es que en esta fase el equipo guía debe seleccionar mecanismos, como por ejemplo un software, para el uso actualizado del *cuadro de mando integral*. En esta fase se espera que los resultados sean:

- Objetivos estratégicos detallados
- Modelo causa efecto con vectores y palancas
- Medidas (indicadores) estratégicos y responsables
- Metas por indicador
- Iniciativas estratégicas

El proceso será medido para comparar las medidas contra los valores objetivos y su variación para iniciar los eventos kaizen (mejora continua).

### 3.6.2 Mejora continua

Sostener un comportamiento organizacional requiere de un atributo esencial: la habilidad de aprender. De hecho, el mejor cumplido que se puede hacer a una empresa es que sea una ***verdadera organización que aprende***.

El proceso correcto producirá los resultados correctos, el mejoramiento continuo (kaizen) solo puede ocurrir después de un proceso estable y estandarizado. Cuando los procesos se encuentran estables y permite visualizar los despilfarros e ineficiencias se tiene la oportunidad de aprender de forma continua de las mejoras. El núcleo del kaizen y del aprendizaje es una actitud y una manera de pensar de todos los líderes y de los asociados-una actitud de autorreflexión e incluso de autocrítica, un deseo ardiente de mejora.

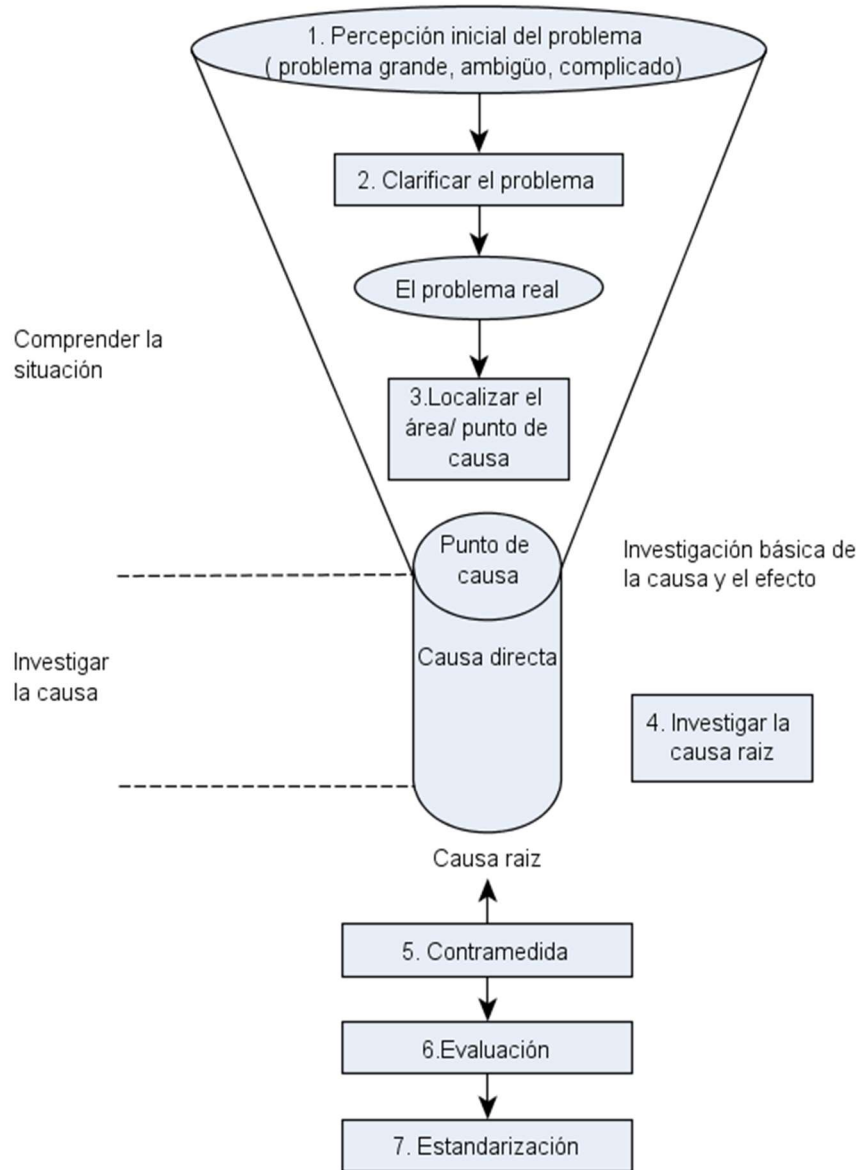
En la figura 77 se muestra el diagrama del proceso práctico para la resolución de problemas del sistema Toyota, este mismo diagrama puede ser aplicado como una guía para la mejora continua a partir de la solución de problemas. La percepción inicial del problema surge del análisis de los KPI's de la organización. Este problema debe evaluarse por su naturaleza y clarificarse antes de comenzar el proceso de análisis, es decir, comprender en detalle la situación, la forma más fácil de lograr esto es ver el problema donde se produce (genchi genbutsu).

Localizar el punto de causa permitirá comenzar el análisis de la causa raíz del problema. La herramienta más simple y poderosa para llegar al fin de este análisis son los cinco ¿por qué? En esta herramienta el equipo kaizen preguntará cinco veces ¿por qué? Esto exige un nivel de análisis y de conocimiento detallado. La integración de equipos multidisciplinarios jugará un papel importante para el logro del objetivo.

El análisis de los cinco ¿por qué? Puede ser completado con herramientas estadísticas básicas, representaciones gráficas, análisis de correlación y regresión, contraste de hipótesis entre los miembros del equipo kaizen, diseños de experimentos pueden ser aplicados en estas etapas del análisis.

Una vez identificada la causa-raíz del punto de causa. Se tomarán contramedidas y se analizarán los resultados. Sólo en este momento, si la contramedida es efectiva, se convertirá en parte de un

nuevo método estandarizado. La estandarización y el aprendizaje van de la mano y son las bases de la mejora continua.



**Figura 77. Proceso práctico para la resolución de problemas del sistema Toyota [46].**



## **CAPÍTULO IV · DEFINICIÓN DEL PROYECTO DE DISEÑO DEL PROCESO PRODUCTIVO SUSTENTABLE DE BIOTURBOSINA**

---

En México, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI-2012, el sector energético contribuyó con un 11.2 % al Producto Interno Bruto (PIB) nacional y un 30.8% del PIB industrial para el año 2011. Sin embargo, las reservas de crudo probadas se redujeron de 2006 a 2011, lo cual, aunado a los problemas ambientales actuales, indica la necesidad de buscar fuentes de energías alternativas, siendo una de ellas los biocombustibles. Con esto ha surgido la preocupación en torno a la sustentabilidad dentro de la cadena de suministro [35].

En términos de biocombustibles, la certificación es un instrumento de distinción de productos sustentables y no sustentables. Que no debe ser considerada como un fin en sí misma, si no como un mecanismo aplicable a dos planos: evaluación, revisión y eventual corrección de iniciativas, y el de requerimientos de sostenibilidad en la formulación de la producción de bioturbosina [35].

En el presente capítulo se plantea el proyecto para la producción sustentable de bioturbosina usando como herramienta de diseño la metodología desarrollada en el capítulo 3. Se propone que los resultados del uso del *Diseño para la Sustentabilidad* permitirán a un productor acceder a las acreditaciones y certificaciones aplicadas a la sostenibilidad del biocombustible.

### **4.1 Definir el proyecto**

#### **4.1.1 Evaluación de la oportunidad de negocio**

##### **i. Identificación del requerimiento del mercado, del negocio o ambiental.**

En la primera etapa del Diseño para la sustentabilidad se define el proyecto, iniciando desde el propósito del mismo. Debido a que se desea construir un nuevo servicio y producto, este debe ser justificado. Para ello se empleará un esquema en forma de diagrama, ver figura 78.

##### **¿Cuál es la oportunidad potencial del negocio del mercado? ¿Por qué?**

La industria de la aviación a nivel global produce el 2% de emisiones provocadas por el hombre [2]. Por ello, las principales autoridades aeronáuticas mundiales, IATA, reconocieron el uso de combustibles alternativos de segunda generación como una de las mejores opciones para reducir la huella de carbono a escalas considerables [32].

En nuestro país se consumen anualmente alrededor de 3 500 millones de litros de turbosina fósil, los cuales se distribuyen en 62 aeropuertos [101]. En la mayoría de éstos se cuenta con vuelos internacionales, los cuales están sujetos a políticas establecidas por otros países [1, 102]. Dichas políticas podrían afectar al mercado mexicano en caso de no disponer del biocombustible, por lo que resulta de vital importancia el impulso al establecimiento de la cadena de suministro de bioturbosina en México.

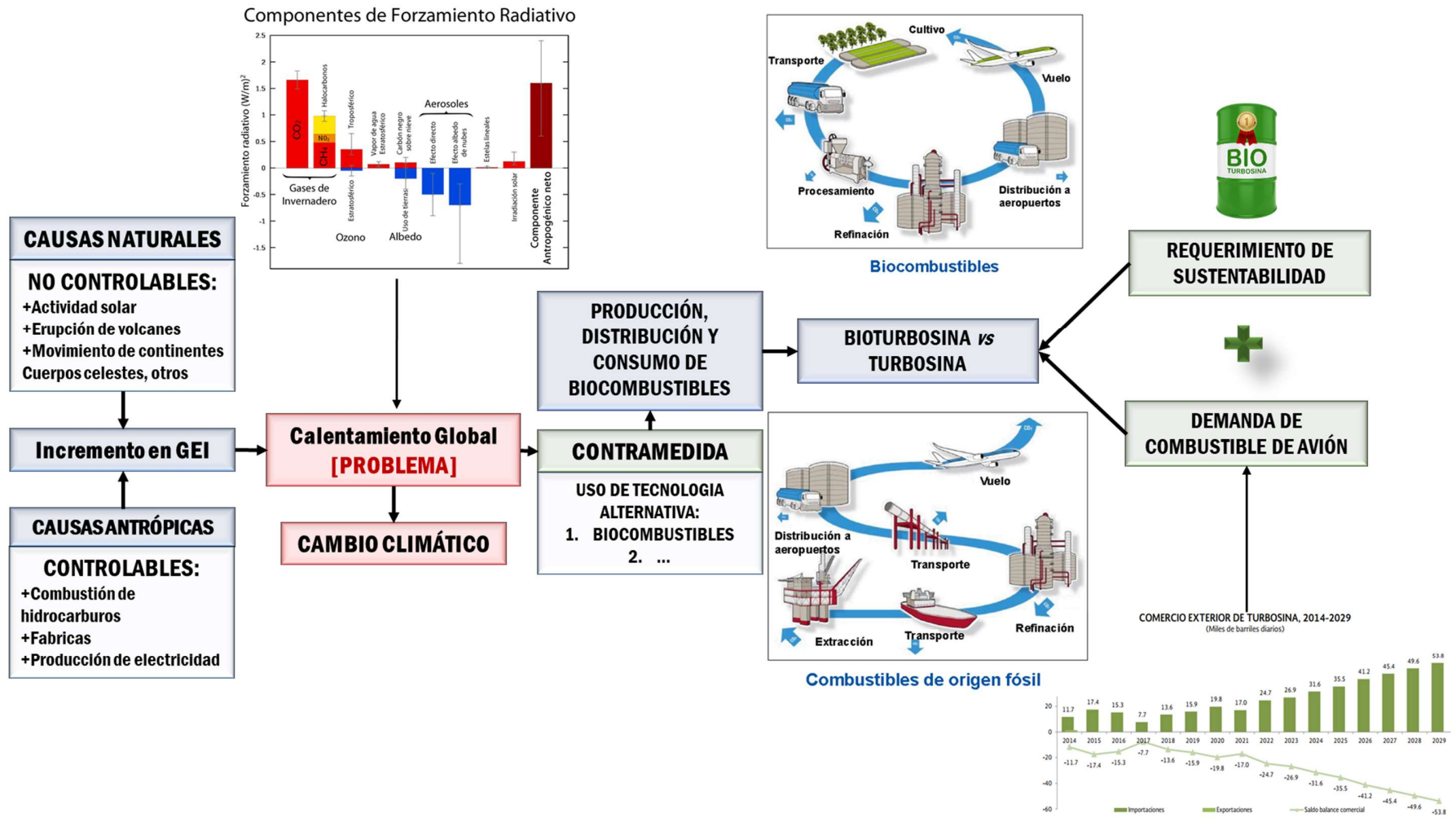


Figura 78. Definición del problema.

**¿Quiénes serán los clientes potenciales de esta propuesta? ¿El proyecto está patrocinado por los líderes de negocio?**

En todo el mundo, múltiples grupos interesados (líneas aéreas, aeropuertos, fabricantes, proveedores y productores de los gobiernos, biomasa y biocombustibles) colaboran en iniciativas para la implementación de la bioturbosina. Estos incluyen CAAFI (Estados Unidos), Ubrabio (Brasil), aireg (Alemania), Bioqueroseno (España), Bioport Holland (Países Bajos), Plan de Vuelo (México), AISAF (Australia), NISA (países nórdicos), BioFuel Net Canadá y otros proyectos están teniendo lugar en China, los Emiratos Árabes Unidos, Qatar, Israel y Japón [1].

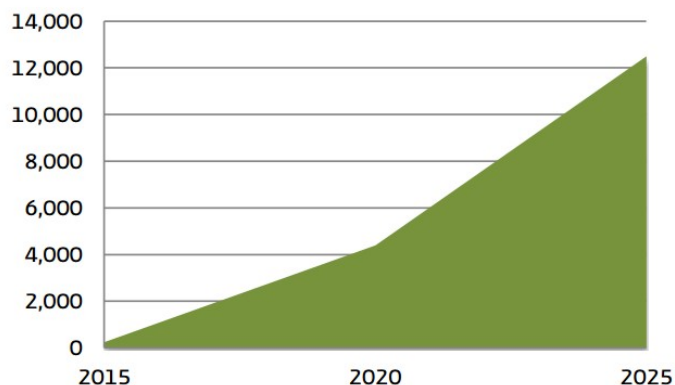
**Tabla 7. Acuerdos de abastecimiento de bioturbosina internacionales 2015 [1]**

Aerolínea	Proveedor	Volumen [t/año]	Alimentación/producto	Duración	Comienzo de abastecimiento	Fecha de contrato
<b>United</b>	Altair	17 000	HEFA	3 años	2016	2013
<b>Cathay</b>	Fulcrum	100 000	Desperdicio	10 años	2019	2014
<b>FedEx/Southwest</b>	Red Rock	10 000	Residuos forestales	8 años	2017	2014
<b>United</b>	Fulcrum	270 000+	Desperdicio	10 años	2019	2015
<b>JetBlue</b>	SG Preston	100 000	HEFA	10 años	2019	2016

Varias aerolíneas han concluido acuerdos de suministro a largo plazo con proveedores de biocombustibles, ver tabla 7, la mayoría de los cuales se reportan como competitivos en precios. Es el mercado comercial de aviación mexicana e internacional afiliada a la IATA decidieron de manera colectiva alcanzar las primeras metas del sector hacia la adaptación y mitigación del cambio climático. Las metas son [103]:

- Mejoramiento en 1.5% de la eficiencia de combustibles de 2009 a 2020.
- Crecimiento neutral en carbono a partir de 2020, con el siguiente escenario de inclusión de bioturbosina en el mercado de aviación, figura 79:

**Escenarios de demanda de bioturbosina (Miles de barriles anuales)**



**Figura 79. Gráfico de proyección de demanda de bioturbosina en México, SENER a partir de ASA.**

- Una reducción del 50% en las emisiones de carbono en 2050 relativo a la línea base establecida en 2005

**¿El proyecto se alinea con las estrategias del negocio? ¿Cuál es el entorno competitivo del mercado?**

PEMEX es el actual productor de la turbosina demandada por el transporte aéreo mexicano, sin embargo, la proyección del incremento de la demanda del 3.6% anual, alcanzará un requerimiento del 101.1 mdb para el 2027. Esta diferencia entre el incremento de la demanda nacional y la producción nacional se prevé abastecer con importaciones del combustible [104].

Sumando la iniciativa liderada por la IATA para la integración la bioturbosina al combustible de avión las consecuencias de ignorar las nuevas tendencias del mercado de aviación impactarían en la pérdida del negocio futuro.

**¿Hay una tecnología o capacidad comercial disponible para generar la solución?**

Dentro de la incorporación de la bioturbosina como combustible de aviación alternativo muchas áreas de oportunidad se encuentran para robustecer el diseño de su producción y distribución sustentable. Primeramente, es importante hallar las partes que integran la cadena de suministro e identificar las generaciones de la bioturbosina para planear su integración a la cadena de suministro del combustible de avión.

De acuerdo a lo reportado por Aeropuertos y Servicios Auxiliares algunas áreas de oportunidad se hallan en el proceso de implementación de la cadena dentro de la iniciativa “Plan de Vuelo”, entre estas la infraestructura de refinación inexistente en México. La tabla 8 presenta un resumen de las tecnologías disponibles para el desarrollo productivo de bioturbosina.

**Tabla 8. Procesos de producción de bioturbosina, modificado de [105-110].**

Desarrollador	Materia prima	Proceso	Etapas del proceso	Productos	Ventajas
North Carolina University y Diversified Energy Corporation	Aceite renovable	Centia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrólisis</li> <li>• Decarboxilación</li> <li>• Isomerización/ craqueo</li> <li>• Refinación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nafta</li> <li>• LPG</li> <li>• Bioturbosina</li> <li>• Diésel verde</li> </ul>	Bajo consumo de hidrógeno, ya que sólo se requiere para la etapa de isomerización y craqueo. Es flexible para transformar varios tipos de aceites vegetales y grasas animales.
Fraunhofer Institute for Environmental, Safety and Energy Technology	Grasas y aceites vegetales	Greasoline	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaporización/ decarboxilación</li> <li>• Refinación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LPG</li> <li>• Gasolina</li> <li>• Queroseno</li> <li>• Diésel verde</li> </ul>	Baja presión requerida para la operación, y bajo consumo de hidrógeno, catalizador de costo relativamente bajo; sin embargo, la bioturbosina no es el producto principal.
Syntroleum	Aceites vegetales y grasas	Bio-synfining	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrotratamiento</li> <li>• Craqueo</li> <li>• Refinación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nafta</li> <li>• Bioturbosina</li> <li>• Diésel verde</li> </ul>	Similar al proceso de hidrotratamiento de UOP Honeywell, pero su principal producto es el diésel verde.

Sasol	Gas natural, carbon y biomasa	Fischer-Tropsch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasificación</li> <li>• Síntesis de Fischer-Tropsch</li> <li>• Hidrotratamiento</li> <li>• Hidrocraqueo</li> <li>• Refinación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nafta</li> <li>• LPG</li> <li>• Bioturbosina</li> <li>• Diésel verde</li> </ul>	Se puede aprovechar todo tipo de biomasa. También puede ser utilizado en combinaciones de biomasa con carbón.
UOP Honeywell	Aceites vegetales y grasas	Hidrotratamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrotratamiento</li> <li>• Craqueo/isomerización</li> <li>• Refinación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nafta</li> <li>• LPG</li> <li>• Bioturbosina</li> <li>• Diésel verde</li> </ul>	El proceso tiene la flexibilidad para utilizar diferentes aceites vegetales o grasas animales. Es similar a los procesos de refinación de la industria petrolera. Es posible obtener rendimientos hacia bioturbosina de hasta 36 por ciento.

La tecnología que se seleccione para el diseño del proceso productivo dependerá de los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño de la bioturbosina en el desarrollo de materiales y la evaluación de impacto.

## ii. Objetivo del proyecto

Para evaluar la alineación del proyecto de la producción de bioturbosina de acuerdo a las estrategias del negocio se deberá realizar un análisis **SMART** en conjunto con las direcciones administrativas y de operación:

S	ESPECIFICO	Abastecimiento de turbosina para el mercado comercial nacional de fuentes alternativas que sean amigables con el medio ambiente.
M	MEDIBLE	Por medio de Indicadores de desempeño (KPIs) se podrá evaluar el avance sustentable de la integración de bioturbosina al mercado comercial de aviación en México. Los Indicadores clave se seleccionarán de acuerdo a su importancia en el <i>cuadro de mando integral</i> de tipo: financiera; cliente; ambiente; procesos internos y aprendizaje y crecimiento.
A	AGRESIVO	Es alcanzable integrar combustibles alternativos al mercado de aviación pues este está soportado por las actuales y futuras regulaciones ambientales. Adicional a esto, el ingreso de bioturbosina al mercado permitirá una salida a la dependencia de recursos no renovables.
R	REALISTA	Las actuales y futuras regulaciones ambientales forzan a adquirir iniciativas correctivas y contenedoras. Iniciar este proyecto de producción de bioturbosina a etapas tempranas de maduración del mercado nos permitirá ser competitivos en las demandas futuras.
T	TIEMPO ESPECIFICO	De acuerdo a la figura 4.2, la integración de bioturbosina en la mezcla de hidrocarburos del combustible de avión tendrá una demanda al alza a partir del 2020. Fecha de lanzamiento de la primera línea productiva de bioturbosina.

## 4.1.2 Elementos del alcance

### i. Marco del proyecto

Con una serie de preguntas se da guía a la descripción del uso de bioturbosina como oportunidad de negocio a largo plazo, tabla 9:

*Tabla 9. Definición del Proyecto.*

NECESIDAD	SATISFACTOR
<p><b>1. Idea de Producto/servicio.</b> ¿Cuál es la principal idea/concepto detrás del producto/servicio que se va a crear?</p>	Ofrecer un combustible de aviación sostenible que permita la permanencia del negocio en el mercado en las próximas generaciones.
<p><b>2. Mercado/Cliente objetivo.</b> ¿A quién está dirigido el producto/servicio: el grupo principal para el que será diseñado?</p>	Distribuidoras y comercializadoras de turbosina. Revisar premisos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE).
<p><b>3. Necesidades del Cliente generales preliminares.</b> ¿Qué fue lo que el cliente quería que es particularmente importante para nosotros desarrollar en este nuevo producto /servicio?</p>	<p>El combustible de avión debe cumplir con las regulaciones ambientales.</p> <p>Cumplir las expectativas de abastecimiento y de funcionalidad de la turbosina.</p> <p>El combustible de avión alternativo se integrará a la cadena de suministro de forma gradual, esto será por su dependencia al avance tecnológico y requerimiento del mercado.</p>
<p><b>4. Visión competitiva.</b> ¿La competencia tiene/provee este producto/servicio actualmente; estamos tratando de crear un Nuevo Mercado o capturar parte del Mercado existente?</p>	Colocarse como líderes en el abastecimiento actual y futuro del combustible de avión.
<p><b>5. Objetivos y metas preliminares.</b> ¿Qué es lo que espera la industria de este producto/servicio y para cuándo?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beneficios para el consumidor</li> <li>• Beneficios para la empresa</li> <li>• Beneficios ambientales</li> </ul>	<p><b>Beneficios para el consumidor.</b> Cumplimiento en las acreditaciones sustentables para el uso de combustibles de aviación.</p> <p><b>Beneficios para la empresa.</b> Competencia en el mercado de combustibles alternativos.</p> <p><b>Beneficios ambientales.</b> Eficiencia en el uso de recursos, reducción en la huella de carbón aportada por los combustibles de aviación</p>

El objetivo de la iniciativa mexicana es lograr la viabilidad comercial y el uso regular de biocombustibles en un mediano plazo.

Durante 2010 y 2011, ASA emprendió el proyecto “Plan de Vuelo hacia los Biocombustibles Sustentables de Aviación en México” (PdV). Paralelamente al PdV, ASA inició un primer ejercicio de producción de biocombustible. ASA se ha involucrado a lo largo de toda la cadena de producción, obteniendo semilla proveniente de productores distribuidos a lo largo de la República Mexicana,

sometiéndola al proceso de extracción a través de terceros, obteniendo también aceite vegetal usado y, enviando el aceite vegetal a refinar a Estados Unidos [111]. Dejando en evidencia la ausencia de infraestructura de refinación para la bioturbosina en México.

Los alcances del proyecto para la creación de la infraestructura de refinación para la bioturbosina se proponen en la siguiente tabla, tabla 10:

**Tabla 10. Definición de los alcances del proyecto.**

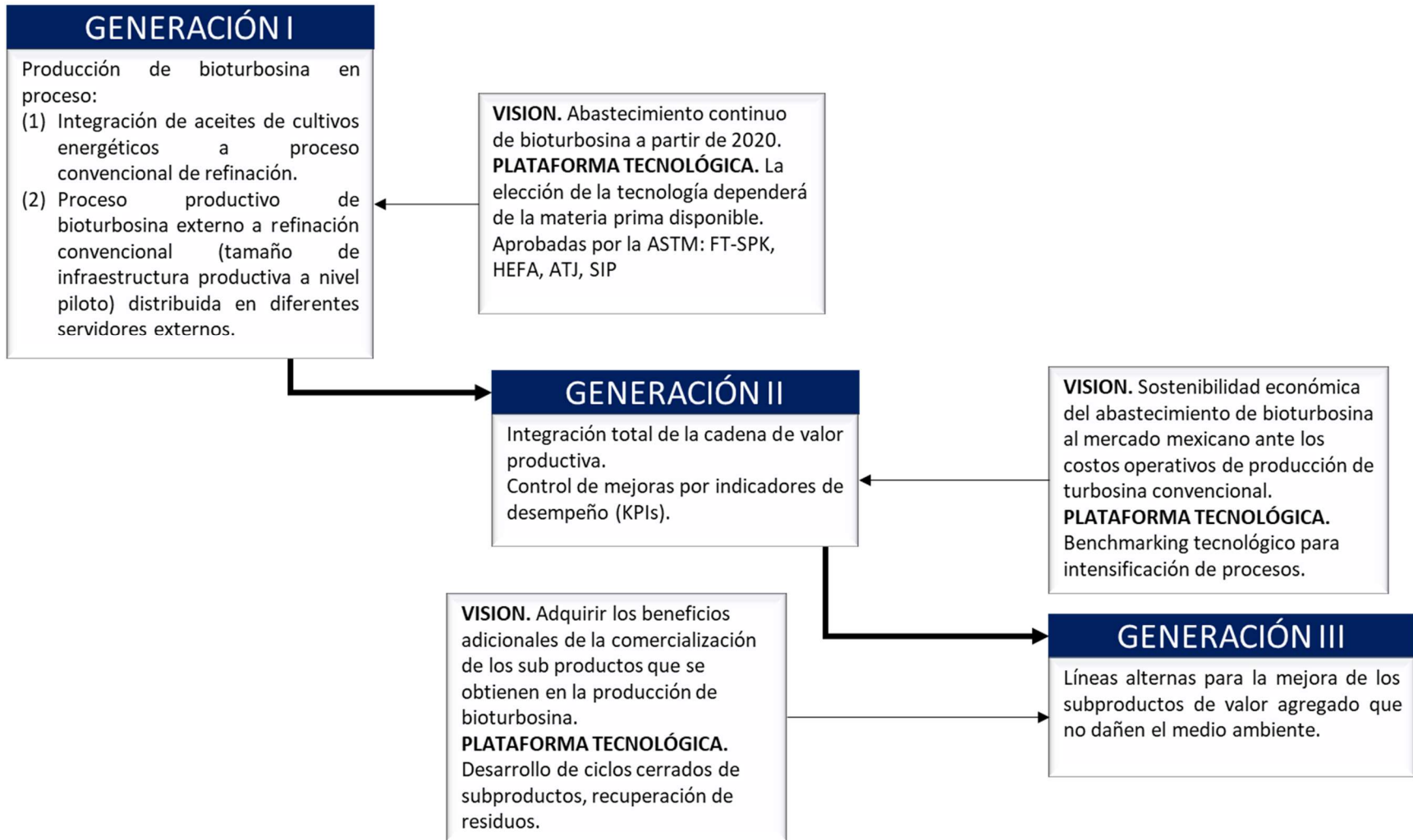
NECESIDAD	SATISFACTOR
<b>1. ¿En qué producto/proceso/servicio se enfocará el equipo?</b>	La bioturbosina como combustible alternativo de aviación, su refinación y su integración sustentable a la cadena de valor.
<b>2. ¿Cuáles son los límites del proceso que vamos a diseñar?, ¿Punto de partida?, ¿Punto final?</b>	Diseño del proceso productivo de bioturbosina alternativa para la aviación. Proceso de refinación para la producción de bioturbosina.
<b>3. ¿Qué recursos están disponibles para el equipo?</b>	Benchmarking tecnológico. Apoyo de la cadena de valor para la integración gradual del proceso productivo.
<b>4. ¿Qué queda fuera del alcance del equipo?</b> <i>*Considerar límites geográficos, límites organizacionales. Considerar clientes y procesos nuevos, existentes y futuros.</i>	Venta y logística de distribución del producto. Metodologías de procesamiento de los proveedores externos.
<b>5. ¿Bajo qué restricciones debe trabajar el equipo?</b>	Resistencia por costo de integración de combustibles alternativos al mercado de aviación.

## ii. Plan multigeneracional del proyecto

Para visualizar la incorporación de la bioturbosina en el mercado en una visión a corto, mediano y largo plazo se desarrollarán tres generaciones de producto, véase la figura 80. Para la primera generación se propone satisfacer la demanda de bioturbosina por parte de ASA, ver figura 79, usando la refinación de aceites vegetales que bien pueden integrarse al proceso de hidrotreamiento de gasóleos en la refinación convencional del petróleo, ver figura 9, o crear un proceso de bio-refinación externo a la refinación del petróleo.

En la segunda generación se planea eliminar las resistencias económicas integrando completamente las funciones de la cadena de valor, mejorando y escalando las capacidades de producción mediante la mejora continua.

Para la tercera generación se proyecta un brinco en el crecimiento económico por la incursión de otros mercados a partir de los subproductos generados en la producción de bioturbosina.



**Figura 80. Plan multigeneracional para la producción de bioturbosina**



### iii. SIPOC

La producción de bioturbosina se divide en tres principales etapas, ver figura 81: la producción de biomasa, la transformación de biomasa y la comercialización.



Figura 81. Ciclo de vida de la bioturbosina, de [33].

La producción de biomasa dependerá de la materia prima a emplear para la producción de bioturbosina. En México se proyecta generar biomasa a partir de cultivos energéticos destilados a la producción de bioturbosina.

La transformación de la biomasa requiere un pretratamiento para obtener el aceite vegetal sintético que sirve como materia prima al proceso de refinación. Las rutas de transformación dependerán de la materia prima a emplear y las tecnologías aprobadas, y disponibles[29], ver tabla 8.

El mercado de aviación se divide en la distribución de bioturbosina a las terminales de distribución y su posterior distribución y comercialización a los usuarios finales (aerolíneas).

En este esquema, el negocio pretende incursionar en el proceso de transformación efectuando la refinación para la producción de bioturbosina teniendo como clientes a los centros de distribución de bioturbosina y como proveedores a los generadores de aceite sintético.

La figura 82 muestra el SIPOC del negocio para el DPS, donde aún no puede segmentar el mercado ni seleccionar un proveedor específico, sino hasta desarrollar la evaluación y selección del concepto del proceso. Sin embargo, en este punto de definición del proyecto, el diagrama SIPOC permite que el director ejecutivo visualice la posición del negocio y las opciones de función del negocio.

Para este caso de ensayo se propone que el negocio visualice dos funciones alternativas (proceso): (A) Refinación del aceite sintético, este aceite proviene de un procesamiento anterior (proveedor) de la biomasa, donde se extrajo o refinó para obtener un aceite sintético (syncrudo) que servirá de materia prima al proceso del negocio aquí evaluado, el negocio refinará el syncrudo por la ruta tecnológica seleccionada en el desarrollo del concepto de diseño y entregará a los distribuidores de

combustible de avión (A.1) bioturbosina refinada ó (A.2) el negocio realizará la mezcla de bioturbosina en la turbosina convencional y entregará al distribuidor el combustible de avión mezclado. (B) Como se propusó en la figura 10, el syncrudo puede co-alimentarse a un hidrotrotador con los gasóleos de vacío de la refinación del petróleo y obtener como uno de los productos el combustible de avión con un porcentaje de bioturbosina.

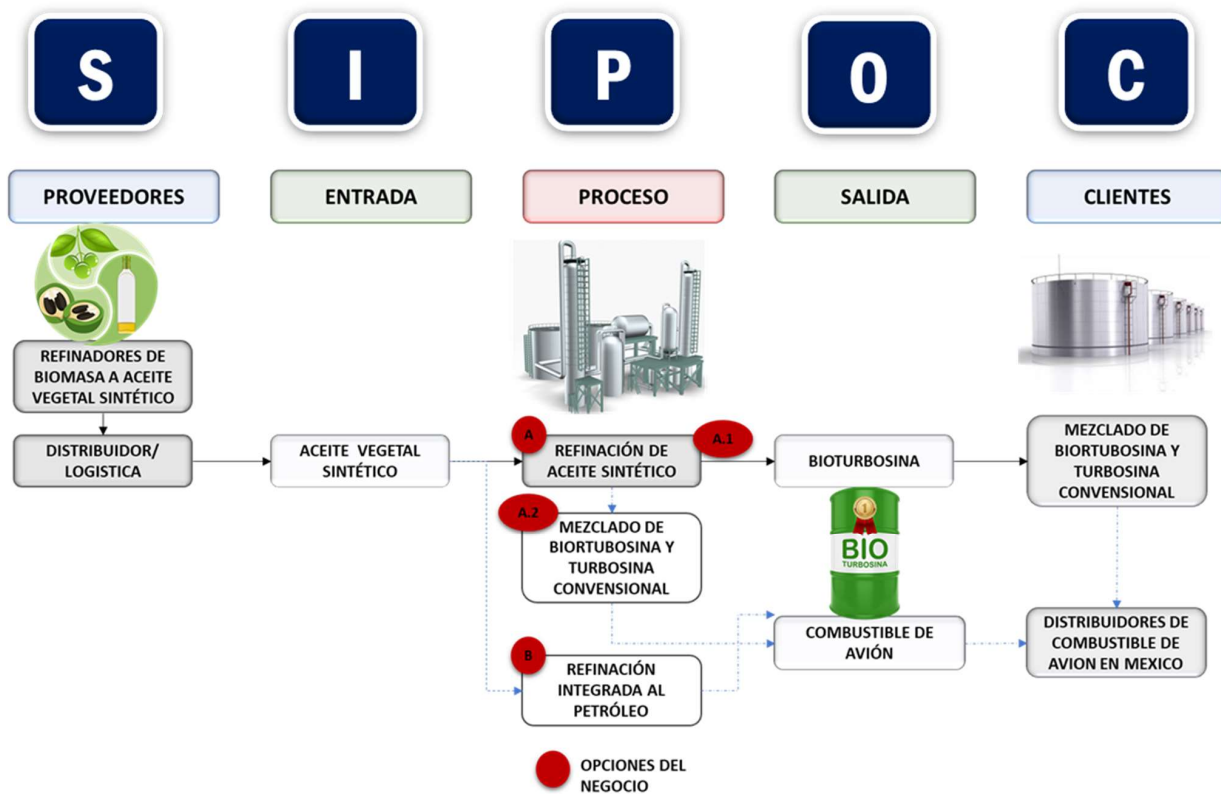


Figura 82. SIPOC del negocio

Las opciones del negocio aquí propuestas se definirán en el desarrollo del concepto de diseño y en la gestión del apoyo y resistencia de las partes involucradas en la cadena de valor.

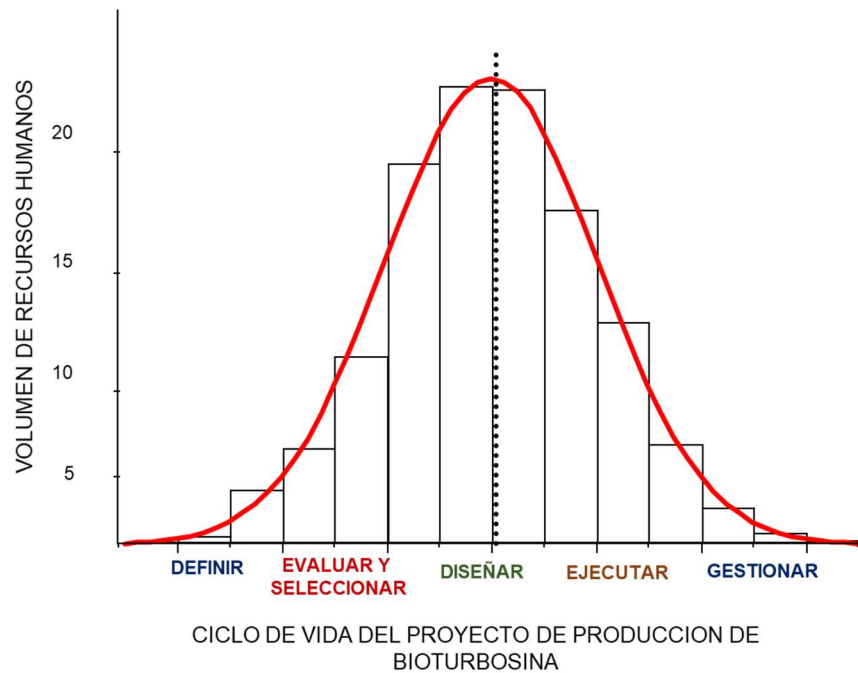
#### 4.1.3 Desarrollo del plan del proyecto

##### i. Desarrollar tareas y metas del proyecto para la producción sustentable de bioturbosina

Las tareas del proyecto de desarrollarán respetando las etapas de diseño con un límite de plazo hacia el 2020, año en que se proyecta una demanda hacia el alza de bioturbosina. En la figura 83 se presenta un Gantt que proyecta los tiempos de cada etapa de diseño, considerando que la etapa de diseñar será la etapa de mayor complejidad en el desarrollo.



cuenta hasta el momento. Para el efecto demostrativo de este trabajo dicha información no está disponible.



*Figura 85. Proyección de recursos humanos.*

#### 4.1.4 Carta del proyecto

Los patrocinadores ejecutivos presentarán la oportunidad que tiene el negocio en la incursión de la producción de bioturbosina en México presentando la carta del proyecto con la información requerida en la figura 86, el análisis de riesgos y la estimación de los recursos necesarios para la ejecución de este proyecto.

#### 4.2 Evaluar el mercado y seleccionar el concepto de diseño.

En esta etapa del DPS se segmentará el mercado, centrándose en el sector comercial de México. Como se planteó en el diagrama SIPOC de la figura 82, el negocio se incorporará en la cadena de suministro de bioturbosina centrande el proceso del negocio en la refinación de aceites sintéticos. El cliente directo del negocio serán las terminales de almacenamiento y distribuidores de turbosina actuales y futuros.

Por lo tanto, la selección del mercado puede ser por tipo de organización o autoridad de distribución; tamaño del negocio; clientes, actuales y potenciales; geográfica, región, localización o situación; posición en la cadena de valor; comportamiento de compra; bienes y utilización del negocio actual.



De acuerdo con lo reportado por la Secretaría de Energía (SENER, México) en la Prospectiva de Petróleo Crudo y Petrolíferos 2014-2029, ver figura 87. La demanda de turbosina alcanzará 124.4 mbd en 2029. Las regiones de mayor demanda serán las del centro y sur-sureste; regiones donde se encuentran los aeropuertos con mayor tráfico aéreo, Aeropuerto de la Ciudad de México y el Aeropuerto Internacional de Cancún. Se estiman tasas medias de crecimiento anual promedio de: 5.0%, para el Centro-Occidente; 4.8%, para el Centro y 4.5% para el Noroeste.

Conforme al Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018, se espera el desarrollo del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México. La primera etapa del nuevo aeropuerto comenzará a operar en 2020 y tendrá capacidad para 550,000 operaciones anuales dando servicio a 120 millones de pasajeros cada año [31, 113].

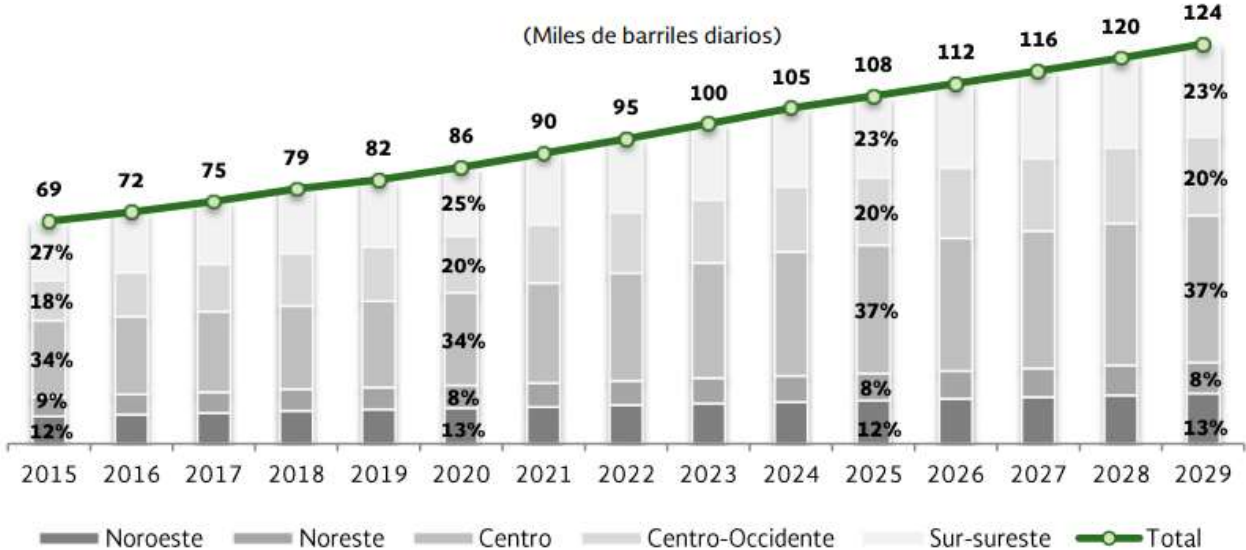


Figura 87. Demanda de turbosina por región estadística 2015-2029 [113]

Además, el estancamiento de capacidad de producción de Pemex no será suficiente para cubrir la demanda energética interna del País. Para solucionar esta problemática se aprobó la reforma energética, publicada en el Diario Oficial de la Federación en fecha 20 de diciembre de 2013, donde se abre la competencia en la industria energética, y ya no será solamente la autoridad quien pueda comercializar gasolina, Diesel y turbosina, entre otros productos [114]. Esto ofreció la oportunidad a inversiones del sector privado y convirtió a la Comisión Reguladora de Energía (CRE) en el regulador de la mayor parte de la cadena de valor de la industria energética en México [115].

En noviembre del 2017 el Senado de la República eliminó el artículo noveno transitorio del Reglamento de la Ley de Aeropuertos, esta disposición daba a ASA la venta exclusiva del combustible [116, 117]; ahora las aerolíneas del País tienen la posibilidad de comprar turbosina al comercializador que elijan y no sólo a ASA [118]. Hasta diciembre del 2017, la Secretaría de Energía (SENER) tenía 79 registros de diversas empresas, ver anexo 4, como Pemex Transformación

Industrial, Shell, Trafigura y Vitol Marketing México, entre otros, para importar el combustible, según registros de la misma dependencia [119].

Con lo anterior expuesto el equipo de proyecto en conjunto con el equipo de mercadotecnia y comercialización seleccionarán un concepto para segmentar el mercado y seleccionar a los clientes potenciales del negocio. Y una vez identificado el mercado de aviación clave, se mapeará el ciclo de vida de la bioturbosina para este consumidor y se coleccionarán la voz del cliente: Voz del consumidor (VoC) y Voz del medio ambiente (VoE).

Dentro de la VoC destacan en importancia las de funcionalidad de bioturbosina. Para esto, el equipo de diseño principal ya cuenta con la norma ASTM-D7566 (Especificación estándar de combustibles para turbinas de aviación que contienen hidrocarburos sintetizados) que especifica los parámetros de control del combustible, estos serán los factores básicos para el diseño. Otras necesidades como el volumen, tiempos de entrega, servicio entre otros serán coleccionados directamente con el cliente seleccionado. Satisfacer estas necesidades de desempeño y exaltación permitirán que el negocio se coloque como líder del mercado.

Dentro de la VoE se destaca la huella de carbón en la producción, uso y vida final de bioturbosina. Y otros como la huella hídrica, huella energética, desecho de efluentes y aprovechamiento de materiales, uso de suelos se identificarán como necesidades de clientes internos (clientes dentro del proceso).

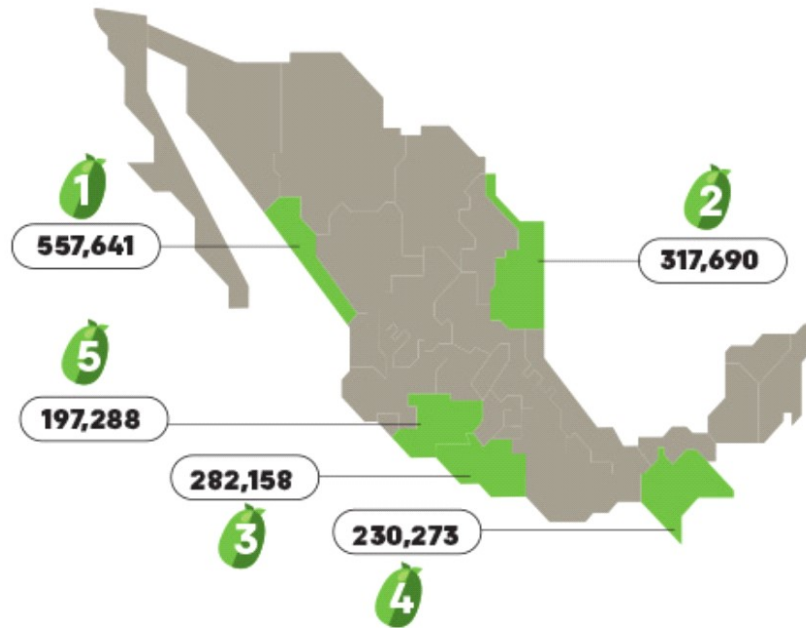
Todas estas necesidades requerirán ser coleccionadas y sintetizadas en diagramas de afinidad para su evaluación y transformación en deseos del cliente. Y se ponderarán por su importancia para el cliente, asignando medidas a aquellos que son Críticos para la Calidad (CTQ) en la casa de calidad QFD-1 como lo indica el punto 3.3.1 de este trabajo. Después, el equipo de diseñará las funciones del negocio, ver figura 54, para diferentes opciones de procesamiento dependiendo de las materias primas a emplear, ver figura 11.

El Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIE-Bio) [120], llevó a cabo comparaciones de los mapas de ruta tecnológica desarrollados hasta el momento en cada uno de sus clústers [121]; entre estos mapas están las rutas tecnológicas de la producción de bioturbosina usando fuentes de: lípidos, carbohidratos y microorganismos, ver anexo 5.

Empleando estas tres fuentes materias primas el CEMIE-Bio mapeo las funciones de la cadena de suministro de bioturbosina; el Plan Multigeneracional (MGPP) para cada ruta tecnológica, destacando las acciones de mejora tecnológica y de manejo del proceso requerida para cada generación.

El balance entre la demanda del combustible alternativo y la disposición de la biomasa da pie al desarrollo del concepto del negocio, y a la selección de la ubicación de las unidades de procesamiento que dependerán de los recursos de biomasa, infraestructura de transporte y costos de logística.

En 2010, ASA, en coordinación con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), comenzó un estudio para examinar la localización geográfica de cuadrantes ideales o regiones potenciales para el cultivo de la *Jatropha* con fines exclusivos de procesamiento de bioturbosina.



*Figura 88. Superficies óptimas para el cultivo de piñón en México en hectáreas [122].*

Se determinó que la siembra de *Jatropha* fuera un cultivo de segunda generación, con una política de no competencia directa o indirecta con alimentos para consumo humano; igualmente se estableció no reconvertir tierras que se usaran para sembrar alimentos y tampoco emplear agua dulce para su riego. Y, muy importante: que no afectara los precios de los alimentos.

El INIFAP concluyó que un cultivo exitoso de *Jatropha* requiere de climas cálidos con una altura no superior a los 1,500 metros sobre el nivel del mar. Determinó que México cuenta con una geografía de 1,926,748 hectáreas con potencial alto y 2,774,182 hectáreas con potencial medio.

Con este estudio, ver figura 88, la IFINAP estipuló que: “los estados de la República Mexicana que registraron mayor superficie óptima para el cultivo de piñón fueron Sinaloa, con 557,641 hectáreas; Tamaulipas, con 317,690; Guerrero, con 282,158; Chiapas, con 230,273 y Michoacán, con 197,288 [122].

De los resultados obtenidos de estos mapas tecnológicos, es requerido crear modelos económicos que permitan visualizar la viabilidad de cada materia prima y la predicción de los ahorros de producción a causa de las mejoras en cada generación del MGPP.

Una vez seleccionadas las rutas tecnológicas, se realizará la pre-síntesis del proceso químico, los mapas de impacto, figura 50, y los ACV, como se indica en la ISO-1440. Con estos diagramas, el negocio evaluará y actualizará los términos de alcance del proyecto para la producción de la bioturbosina en el MGPP y reprogramará el desarrollo de las tareas.

#### **4.3 Diseñar el proceso de refinación para producir bioturbosina.**

El diseño de la tecnología de proceso evolucionará conforme al MGPP. En esta etapa se desarrollará la síntesis detallada del proceso como se indica en el punto 3.4.1; para el diseño detallado del proceso químico.



La metodología propuesta permite visualizar el diseño enfocado a la intensificación de los procesos, esto quiere decir que los procesos deben ser diseñados para reducir el tamaño de los equipos incrementando la velocidad de su fabricación, transporte e instalación; integrar procesos, las unidades de procesamiento del bio-queoseno pueden integrarse convenientemente a la refinación convencional del petróleo con el fin de hacer ahorros significativos en la infraestructura de distribución futura del combustible; para maximizar la eficiencia de las unidades de proceso, esto significa que se diseñarán procesos Lean que no incluyan aquellos desperdicios de la producción y maximicen el uso de los recursos y energía mediante métodos algorítmicos para el diseño de las redes de reactores, trenes de separación, integración energética (aprovechamiento de la energía disponible del proceso para calentar o enfriar corrientes del mismo proceso) e integración de masa.

Antes de partir al diseño detallado de producción, se requiere construir el plan de control del proceso y la validación mediante un análisis de modo, efecto y riesgo del diseño (D-AMEF), este análisis permitirá visualizar las áreas de oportunidad latentes del diseño para asignar soluciones inmediatas o a un mediano plazo.

El diseño de producción consistirá en el diseño de detalle del material, tamaño de los equipos, instrumentos, tanques, intercambiadores de calor y otros servicios. Así como el diseño de tuberías, servicios eléctricos, diseño estructural, lay-out de la planta, obra civil, departamentos de servicio (edificios, oficinas, laboratorios, cuartos de control, etc.).

#### **4.4 Ejecutar el proceso productivo**

Esta etapa consiste en la puesta en marcha del proceso productivo de bioturbosina, se realizarán diseños de experimentos para optimizar el desempeño del proceso, la preparación para la producción (2P) permitirá alinear los procesos para satisfacer la demanda de bioturbosina y asegurar el costo de su manufactura. El diseño del sistema de medida de capacidad será la base para el estudio de la variación de la calidad del producto y el principio de la mejora del proceso.

En esta etapa se instaura una filosofía laboral para desplegar políticas a todos los niveles del negocio, traduciéndolas en KPIs que medirán el progreso del negocio dentro de las perspectivas financieras, del consumidor, del ambiente, los procesos internos, y de aprendizaje y crecimiento.

El detalle de las tareas que se desarrollaron desde la etapa del diseño de la producción debe de ser transmitido mediante procedimientos e instrucciones de trabajo. La documentación y registros de estas actividades permitirán el futuro análisis de los procedimientos para su mejora.

#### **4.5 Gestionar la mejora continua**

Esta etapa el equipo de trabajo validará de forma continua y controlará el proceso mediante la medición constante de los indicadores de desempeño.

La implementación previa de una cultura de colaboración y mejora continua permitirá una rápida adaptación del grupo operativo a un incremento de demanda y mejoras aceleradas en tecnología que requieran cambios inmediatos.

#### 4.6 Robustez de la metodología de Diseño para la Sustentabilidad.

En la tabla 11 se compararon tres metodologías de diseño para la sustentabilidad, la primera es la D4S (Diseño para la Sostenibilidad) de UNEP (por sus siglas en inglés, United Nations Environment Programme) [123], la segunda es el modelo estratégico de crecimiento sustentable de Lowellyne James [124], y la tercera metodología es el DPS del presente trabajo.

Las tres metodologías constan de características y pasos similares. Sin embargo, la metodología de D4S de UNEP que tiene como objeto la creación de productos ecológicos, al igual que el DPS, está dirigida a inversionistas y negocios actuales que ya cuentan con una filosofía que busca la creación de procesos de negocio sustentables. Donde, el D4S emplea un extenso estudio para la correcta selección del producto satisfactor de las necesidades del mercado con estudios de la economía en la que se incursionará y los impactos sociales a los que se dirige el producto del negocio. El diseño del producto en esta metodología cubre productos de diferentes industrias, de modo que esta sección no detalla los pasos del diseño, pero sí da guía a la construcción de los criterios de evaluación de sustentabilidad con el mapeo de la cadena de suministro y avanza hasta al paso 10 donde se crean prototipos del producto para evaluar su desempeño en el mercado. El D4S no detalla los pasos para la creación de un sistema de calidad como consecuencia de una filosofía dirigida hacia la sustentabilidad, pero cabe mencionar que la metodología D4S es solo parte de las políticas de producción y consumo sostenible a lo largo del ciclo de vida de un producto, elaborado por la UNEP en 2012 [77].

El modelo estratégico consta de pasos para la incursión de un negocio existente a una filosofía dirigida a la sustentabilidad, donde las cinco etapas del modelo aclaran a la compañía los requerimientos claves para la incorporación de factores ambientales y su uso en los procesos actuales del negocio hasta extender los indicadores de desempeño en el sistema de calidad y en el proceso de mejora continua.

Las similitudes del Modelo Estratégico de Lowellyne James con el DPS no radican en la creación de nuevos productos, sino más bien en la incorporación de una filosofía laboral dirigida hacia la sustentabilidad para desplegar las políticas y el sistema de mejora continua del negocio.

Ya que la metodología DPS consta de una estructura completa para la planeación de los procesos del negocio y su posterior gestión a largo plazo se prevé que requerirá mejoras y la extensión de las herramientas para robustecer su aplicación en la industria química.

Entre las mejoras observadas se requiere incorporar métodos sistemáticos para la pre-síntesis del concepto de diseño de la etapa dos (Evaluar y Seleccionar) y la integración total de la IV en la síntesis detallada del proceso químico en la etapa tres (Diseñar). Para crear heurísticas en la suposición de estructuras irreducibles; o emplear métodos integración de masa y energía en el proceso de integración del proceso químico, ejemplo de esto son los expuestos por M.M. El-Halwagi en el libro *Sustainability in the Design, Synthesis and Analysis of Chemical Engineering Processes* (en inglés) [125, 126].

Tabla 11. Metodologías de Diseño para la Sustentabilidad, construido del presente trabajo y [89, 124].

	1. D4S, UNEP	2. Modelo estratégico de crecimiento sustentable, Lowellyne James	3. DPS
	Dirigida a PYMES en economías en vías de desarrollo	Dirigida a emprendedores y negocios pequeños	Dirigida a negocios medianos y grandes.
<b>Objetivo</b>	El D4S tiene como objeto producir un producto ecológico que incluye satisfacer las necesidades del consumidor de la manera más sostenible a un nivel sistemático. 10 pasos para el rediseño de D4S:	El modelo de crecimiento prevé una opción para supera los cambios clave respecto a la incorporación de la sustentabilidad como estrategia del negocio. 5 etapas del Modelo estratégico de crecimiento sustentable:	La metodología DPS tiene como objeto el diseño de los procesos de negocio para crear productos y servicios orientados a satisfacer el valor ambiental y del consumidor, ver sección 3.1. 5 etapas para el DPS, ver figura 23:
<b>Estructura</b> Pasos/etapas de la metodología	<p><b>Paso 1.</b> Creación de un equipo y planeación del proyecto.</p> <p><b>Paso 2.</b> Impulsores FODA y metas para la compañía.</p> <p><b>Paso 3.</b> Selección de productos.</p> <p><b>Paso 4.</b> Impulsores de D4S para la selección del producto.</p> <p><b>Paso 5.</b> D4S evaluación de impacto.</p> <p><b>Paso 6.</b> Desarrollo de la estrategia del D4S y resumen de diseño D4S.</p> <p><b>Paso 7.</b> Generación y selección de ideas.</p> <p><b>Paso 8.</b> Desarrollo de conceptos.</p> <p><b>Paso 9.</b> Evaluación del D4S.</p> <p><b>Paso 10.</b> Implementación y seguimiento.</p>	<p><b>Etapas 1. Aprender:</b> Adquirir conocimientos; Construir capacidad.</p> <p><b>Etapas 2. Desarrollar:</b> Desarrollar política.</p> <p><b>Etapas 3. Implementar:</b> Implementar política.</p> <p><b>Etapas 4. Optimizar:</b> Adoptar la mejora continua.</p> <p><b>Etapas 5. Sostener:</b> Renovar y recompensar el compromiso hacia la sustentabilidad.</p>	<p><b>Etapas 1. Definir:</b> Objetivo y alcance del proyecto.</p> <p><b>Etapas 2. Evaluar y Seleccionar:</b> Estudio de los requerimientos del negocio, el consumidor y el medio ambiente; Desarrollo del concepto de diseño.</p> <p><b>Etapas 3. Diseñar:</b> Diseño detallado del proceso químico; Diseño del proceso de producción.</p> <p><b>Etapas 4. Ejecutar:</b> Proceso de operación, control y ajuste; Producción</p> <p><b>Etapas 5. Gestionar:</b> Validación de resultados; Mejora Continua.</p>

## CONCLUSIONES

---

Se desarrolló una metodología de diseño para la sustentabilidad (DPS) que considera los requisitos ambientales como oportunidades de negocio para el desarrollo de nuevos *procesos de negocio*. Posicionando a la perspectiva ambiental al mismo nivel de importancia que las necesidades del mercado.

De la integración de varias herramientas de diseño de procesos de negocio provenientes de la industria de manufactura y las nuevas concepciones verdes para el diseño de procesos químicos, se creó el DPS, que consta de cinco pasos sistemáticos que incluyen las tareas necesarias para que una compañía chica o mediana cree negocios sustentables.

La metodología DPS se ocupó para simular la *definición* del proyecto para la producción de bioturbosina en México, más específicamente en la refinación para la producción de biotubosina. Se consideraron las proyecciones de demanda de bioturbosina como una oportunidad de negocio sustentable; se evaluaron las oportunidades del negocio al incursionar en este nuevo mercado; se delimitaron las funciones del negocio con la ayuda del mapeo de la vida de la producción y uso de bioturbosina en un diagrama SIPOC; y se propuso un plan multigeneracional para visualizar las etapas de inclusión de la compañía en la cadena de suministro de bioturbosina, estas etapas están respaldadas por la proyección del avance tecnológico y el desarrollo del personal especializado dentro del negocio.

Para una compañía que se encuentra dentro del negocio de combustibles de aviación, la extensión de su cartera de productos hacia la producción de bioturbosina es un arriesgado negocio comparado con el precio de producción de turbosina. No obstante, las pérdidas al no incursionar en este nuevo negocio podrían propiciar la pérdida gradual del mercado. Esto aunado a la nueva apertura energética para el sector privado, crea la libre competencia donde las características del producto, servicio harán la diferencia.

Este ensayo permitió observar que estas compañías del sector energético tienen como siguiente paso recolectar los requisitos ambientales y de mercado dentro de la cadena de valor en la producción y uso de bioturbosina. Una vez conjuntados los requerimientos podrán analizarse y diseñar los *procesos del negocio* dirigidos a satisfacer estas necesidades. Al diseñar lo *procesos del negocio* orientados a satisfacer las necesidades recolectadas se evitará diseñar *desperdicio* dentro de la producción de bioturbosina. Esto abaratará costos de operación, consumo de materiales y energía.

El DPS aquí propuesto da una visión general de la vida de un proyecto para la creación de nuevos negocios sustentables. Y en efecto, la aplicación de la metodología DPS permite que el equipo de proyecto tenga claros objetivos y tareas en tiempos establecidos, generado como consecuencia avances estratégicos en el desarrollo de un proyecto de negocio. Sin embargo, el DPS en este trabajo aún carece de detalles para la ejecución de las herramientas propuestas, esto provoca que sin un

conocimiento amplio de la filosofía Lean, Six Sigma y el diseño de proceso químicos; la aplicación del DPS puede ser confusa. Esto puede considerarse como una oportunidad de mejora para la siguiente etapa del desarrollo de la metodología DPS.

En la comparación del DPS con el D4S de la UNEP y el modelo estratégico de crecimiento sustentable de Lowellyne James se destacó que el DPS tiene una mayor visión de todas las etapas necesarias para el desarrollo de *procesos de negocio* sustentables. Y que el DPS tiene la flexibilidad de incluir futuras herramientas de ingeniería verde tanto en la evaluación del concepto de negocio como en la síntesis del proceso químico.

## REFERENCIAS

---

- [1] I. A. T. Association, "IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap," 2015.
- [2] A. W. Schafer, A. D. Evans, T. G. Reynolds, and L. Dray, "Costs of mitigating CO2 emissions from passenger aircraft," *Nature Clim. Change*, Article vol. 6, no. 4, pp. 412-417, 04//print 2016.
- [3] A. W. Schäfer, "Chapter 1 - The Prospects for Biofuels in Aviation A2 - Chuck, Christopher J," in *Biofuels for Aviation*: Academic Press, 2016, pp. 3-16.
- [4] W. C. o. E. a. Development, "Our Common Future, Chapter 2: Towards Sustainable Development," in "UN Documents: Gathering a Body of Global Agreements," <http://www.un-documents.net/ocf-02.htm>.
- [5] A. C. Centro de Cambio Global y la Sustentabilidad. (2013). *¿Qué es Sustentabilidad?*
- [6] *NORMA Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-005-CRE-2015, Especificaciones de calidad de los petrolíferos.*, C. R. d. Energía., 2015.
- [7] C. P. Company, "Aviation Fuels Technical Review," ed, 2007.
- [8] I. A. T. A. (IATA), "Guidance Material for Aviation Turbine Fuels Specifications," 7 ed, 2012.
- [9] E. M. Aviation, "World Jet Fuel Specifications with Avgas Supplement," ed, 2005.
- [10] P.D.Bahukhandi, "<Global Aviation Fuel Scenario.pdf>,"
- [11] R. S. Boyás, "Sección primaria de destilación del petróleo," presented at the Valoración del petróleo, ESIQIE, IPN, 2010.
- [12] (2003 (Actualización)). *Manual de operacion planta combinada*.
- [13] R. S. Boyás, "Procesos de Hidrotratamiento," in *Química del Petróleo*, ESIQIE, IPN, 2011.
- [14] (1990). *Manual de operacion de unidad hidrosulfuradora de destilados intermedios*.
- [15] G. Liu, B. Yan, and G. Chen, "Technical review on jet fuel production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, no. Supplement C, pp. 59-70, 2013/09/01/ 2013.
- [16] J. M. P. Technologies, "FISCHER TROPSCH (FT) TECHNOLOGY," 2017.
- [17] E. Nassoy, "Obtencion de biocarburantes por sintesis de CO e H," ICAI – Universidad Pontificia Comillas., Madrid.
- [18] J. Chamberlain, "CTL (Coal to Liquids)," ed: gasNatural fenosa, 2011.
- [19] A. UPME, Unión Temporal CTL "Análisis y evaluación técnica y económica de la producción de combustibles líquidos a partir de carbón para el caso colombiano," 2007, Available: [http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/estudios\\_recientes/Informe\\_Final\\_CTL.pdf](http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/estudios_recientes/Informe_Final_CTL.pdf).
- [20] A. d. Klerk, "Gas-to-liquids conversion," ed: Department of Chemical and Materials Engineering University of Alberta, Edmonton, Canada, 2012.
- [21] L. J. R. Forero, "Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones. ," *Revista Escuela de Administración de Negocios*, pp. 216-218, 2017.
- [22] I. Q. R. Prando, "introducción a los procesos tecnologicos industriales biomasa basado en material," in *BIOMASA DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS*, I. Q. D. Huelmo, Ed., ed, 2015.
- [23] A. G. Garay, "Modelado cinético de la hidroconversión de aceites vegetales en bioturbosina," Maestria, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, 2015.
- [24] F. T.-Z. r. a. F. d. J. s. H. n.-L. Rogelio Sotelo-Boyás, "Hydroconversion of Triglycerides into Green Liquid Fuels " in *Hydrogenation*, I. Karamé, Ed. InTech, 2012.

- [25] S. K. Kim, J. Y. Han, H.-s. Lee, T. Yum, Y. Kim, and J. Kim, "Production of renewable diesel via catalytic deoxygenation of natural triglycerides: Comprehensive understanding of reaction intermediates and hydrocarbons," *Applied Energy*, vol. 116, no. Supplement C, pp. 199-205, 2014/03/01/ 2014.
- [26] L. Chen, H. Li, J. Fu, C. Miao, P. Lv, and Z. Yuan, "Catalytic hydroprocessing of fatty acid methyl esters to renewable alkane fuels over Ni/HZSM-5 catalyst," *Catalysis Today*, vol. 259, no. Part 2, pp. 266-276, 2016/01/01/ 2016.
- [27] "Copyright A2 - Chuck, Christopher J," in *Biofuels for Aviation*: Academic Press, 2016, p. iv.
- [28] T. Radich, "The Flight Paths for Biojet Fuel," ed. Washington, DC 20585: U.S. Energy Information Administration, 2015.
- [29] *Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*, 2017.
- [30] I. A. T. A. (IATA). (2015). *Total passengers set to double to 7 billion by 2034*. Available: <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2015-11-26-01.aspx>
- [31] (2015). *Prospectiva de petróleo y petrolíferos 2015-2029*
- [32] I. A. T. Association, "IATA 2015 Report on Alternative Fuels," Montreal—Geneva2015.
- [33] A. y. S. A. (ASA). (2017). *BIOturbosina*. Available: <http://biocombustibles.asa.gob.mx/>
- [34] *Básicos del Sistema de certificación de sustentabilidad para biomasa y bioenergía*, 2010.
- [35] I. C. E. M. Yéssica Yasmín Santos Equihua. (2016) Estrategia de certificación de biocombustibles para el sector energético en México. *INCEPTUM*. 43-63. Available: <http://inceptum.umich.mx/index.php/inceptum/article/view/236>
- [36] *Principios y Criterios consolidados de la RSB (EU RED) para la producción sostenible de biocombustible*, 2011.
- [37] (2013). *Biofuels and the sustainability challenge: A global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks*.
- [38] *Compendio de Normas ISO: Sistemas de gestión ambiental.*, 2000-2005.
- [39] *norma mexicana, NMX-AA-174-SCFI-2015, que establece especificaciones y requisitos para la certificación de sustentabilidad ambiental en la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal.*, SEGOB, 2015.
- [40] J. Mirsky. (2017). *Eli Whitney*. Available: <https://www.britannica.com/biography/Eli-Whitney>
- [41] D. N. M Best, "Walter A Shewhart, 1924, and the Hawthorne factory," *HEROES AND MARTYRS OF QUALITY AND SAFETY*, Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2464836/>
- [42] T. Pyzdek, *The Six Sigma Handbook*. 2003.
- [43] M. TOYOTA. (2016). *La filosofía empresarial más admirada del mundo*. Available: <http://www.toyota.com.mx/corporativo/toyota-en-el-mundo/filosofia/>
- [44] T. W. Steven Taylor, Timothy Sparks, John Imboden, "The Toyota Production System's effect on the American Automobile Manufacturing Industry," Available: <http://campus.murraystate.edu/academic/faculty/wlyle/540/2012/Team2.pdf>
- [45] M. TOYOTA. (2016). *Los pilares de un edificio muy sólido*. Available: <http://www.toyota.com.mx/corporativo/toyota-en-el-mundo/sistema-de-produccion/>
- [46] J. K. Liker, *Las claves del éxito de Toyota*.
- [47] E. O. a. N. S. Hirotaka Takeuchi, "The Contradictions That Drive Toyota's Success," *Harvard Business Review*, Available: <https://hbr.org/2008/06/the-contradictions-that-drive-toyotas-success>
- [48] K. Y. a. B. El-Haik, *Design For Six Sigma . A Roadmap For Product Development*. 2003.

- [49] *SIX SIGMA: Control de la variación*. Available: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/gesti%C3%B3n-y-control-de-calidad/six-sigma/>
- [50] N. Iracheta, "¿Qué es Six Sigma?," in *Temas de Excelencia Operacional*, ed. <http://nicoiracheta.blogspot.mx/2013/06/que-es-six-sigma.html>, 2013.
- [51] W. M. y. A. Badve, "Aplicando Design para LeanSigma® en la Industria de Dispositivos Médicos," ed: TBM Consulting Group, Inc., 2012.
- [52] R. J. a. P. Samuel, *Design for lean Six Sigma: A Holistic Approach to Design and Innovation*. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [53] G. T. a. R. Sinnott, *Chemical Engineering Design. Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*, Second Edition ed. Elsevier Ltd, 2013.
- [54] A. P. T. a. Z. J.B., "Design through the Twelve Principles of Green Engineering," *Environ. Sci. Technol*, pp. 94A–101A, March 1, 2003 2003.
- [55] D. M. A. Dean. *Green Engineering Principle #2*. Available: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-engineering/green-engineering-principle-2.html>
- [56] D. M. J. Realff. *Green Engineering Principle #3*. Available: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-engineering/green-engineering-principle-3.html>
- [57] J. J. Sirola, "Industrial Applications of Chemical Process Synthesis," in *Advances in Chemical Engineering*, vol. 23, J. L. Anderson, Ed.: Academic Press, 1996, pp. 1-62.
- [58] L. R. P. V. H. Agreda, W. H. Heise, "High-Purity Methyl Acetate via Reactive Distillation," *Chemical Engineering Progress*, pp. 40-46, 1990.
- [59] D. M. A. Gonzalez. *Green Engineering Principle #4*. Available: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-engineering/green-engineering-principle-4.html>
- [60] D. M. A. Gonzalez. *Green Engineering Principle #6*. Available: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-engineering/green-engineering-principle-6.html>
- [61] D. C. Jiménez-González. *Green Engineering Principle #10*. Available: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-engineering/green-engineering-principle-10.html>
- [62] T. A. Dickneider, "Petretec - Dupont's Technology for Polyester Regeneration.."
- [63] D. C. Jiménez-González. *Green Engineering Principle #11*. Available: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-engineering/green-engineering-principle-11.html>
- [64] D. D. Shonnard. *Green Engineering Principle #12*. Available: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-engineering/green-engineering-principle-12.html>
- [65] J. A. Garza-Reyes, "Lean and green – a systematic review of the state of the art literature," *Journal of Cleaner Production*, vol. 102, no. Supplement C, pp. 18-29, 2015/09/01/ 2015.



- [66] R. Dhingra, S. Das, and R. Kress, "Making progress towards more sustainable societies through lean and green initiatives," *Journal of Cleaner Production*, vol. 37, no. Supplement C, pp. 400-402, 2012/12/01/ 2012.
- [67] C. M. Dües, K. H. Tan, and M. Lim, "Green as the new Lean: how to use Lean practices as a catalyst to greening your supply chain," *Journal of Cleaner Production*, vol. 40, no. Supplement C, pp. 93-100, 2013/02/01/ 2013.
- [68] S. Hajmohammad, S. Vachon, R. D. Klassen, and I. Gavronski, "Lean management and supply management: their role in green practices and performance," *Journal of Cleaner Production*, vol. 39, no. Supplement C, pp. 312-320, 2013/01/01/ 2013.
- [69] R. Ng, J. S. C. Low, and B. Song, "Integrating and implementing Lean and Green practices based on proposition of Carbon-Value Efficiency metric," *Journal of Cleaner Production*, vol. 95, no. Supplement C, pp. 242-255, 2015/05/15/ 2015.
- [70] J. Maxwell, Rothenberg, S. and Schenk, B, "Does Lean Mean Green: The Implications of Lean Production for Environmental Management. ," *International Motor Vehicle Program, MIT.*, 1993.
- [71] S. Rothenberg, "Lean green and the quest for superior environmental performance," ed. Rochester Institute of Technology, 2001.
- [72] C. J. Chiappetta-Jabbour, Lopes de Sousa-Jabbour, A.B., Govindan, K., Alves-Teixeira, A., de Souza-Freitas, W.R. (2013) Environmental management and operational performance in automotive companies in Brazil: the role of human resource management and lean manufacturing. *J. Clean. Prod.*
- [73] M. A. Taubitz, "Lean, Green & Safe: Integrating Safety into the Lean, Green and Sustainability Movement," 2010/5/1/.
- [74] F. G. a. M. K., "Sustainability: the new lean frontier," *Production and Inventory Management* vol. 46, no. 1, 2010.
- [75] T. D. K. Hockerts, "Beyond the business case for corporate sustainability," *Business Strategy and the Environment*, pp. 130-141, 2002.
- [76] T. Devane, *Integrating Lean Six Sigma and High-Performance Organizations: Leading the Charge Toward Dramatic, Rapid, and Sustainable Improvement.* 2004.
- [77] J. P. a. G. Finnveden, *The Complete World of Life Cycle Assessment.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [78] R. J. H. a. A. Sohal, "A conceptual model for the successful deployment of Lean Six Sigma," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 29, no. 1, pp. 54-70, 2012.
- [79] G.-R. J. A. Lee J.H., Kumar V., Rocha-Lona L., Mishra N., A. A., Ed. *A Comparative Study of the Implementation Status of Lean Six Sigma in South Korea and the UK* (Lecture Notes in Mechanical Engineering). Springer, Heidelberg, 2013.
- [80] A. Marcus, G. Ida, and B. Kristoffer, "Multi-faceted views on a Lean Six Sigma application," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 29, no. 1, pp. 21-30, 2012/01/06 2012.
- [81] S. Souraj, R. Abdur, and A. C. Juan, "The integration of Six Sigma and lean management," *International Journal of Lean Six Sigma*, vol. 1, no. 3, pp. 249-274, 2010/08/06 2010.
- [82] K. A. Pregiwati Pusporini, and Lee Luong, "Development of Environmental Performance Model Using Design for Six Sigma (DFSS)," *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, vol. 1, no. 1, pp. 102-106, 2013.
- [83] W. C. Lucato, M. Vieira Júnior, and J. C. d. S. Santos, "Eco-Six Sigma: integration of environmental variables into the Six Sigma technique," *Production Planning & Control*, vol. 26, no. 8, pp. 605-616, 2015/06/11 2015.

- [84] J. C. V. P. a. M. A. Toman, "The Economics of Sustainability: A Review of Journal Articles," ed: Resources for the Future, 2002.
- [85] "A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)," ed: Project Management Institute, Inc., 2000.
- [86] T. C. Group, "Diseño para Lean-Sigma," in *Capacitación de personal*, Industrias Ideal, 2014.
- [87] A. J. Renata Meran , Olin Roenpage, Christian Staudter, S. Lunau, Ed. *Six Sigma+Lean Toolset*, 2 ed. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, pp. XIII,400.
- [88] C. S. B. B. S. S. y. L. Sandrine, "SIPOC – Mapa de proceso a alto nivel," in *6 Sigma, Lean y Kaizen*, ed: CALETEC.
- [89] M. Crul and J. C. Diehl, *Design for Sustainability: A Practical Approach for Developing Economies Paris*. 2006.
- [90] "CAPITULO 3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA."
- [91] J. D. S. Warren D. Seider, Daniel R. Lewin, Soemantri Widagdo, *Product and Process Design Principles. Synthesis, Analysis, and Evaluation*, Third ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [92] R. Gani, "New Vistas in Chemical Product & Process Design," in *II Semana de la Ingeniería en la ESQIE*, Mexico City, 2016.
- [93] R. Smith, *Chemical Process Design and Integration*. England: Chemical Process Design and Integration, 2005.
- [94] *Análisis del Modo y Efecto de Fallas (AMEF)*. Available: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/lean-manufacturing/analisis-del-modo-y-efecto-de-fallas-amef/>
- [95] S. Bensaid, D. Hoang, P. Bellantoni, and G. Saracco, *Green Process Synth 2013; 2: 397–406 Supercritical fluid technology in biodiesel production: pilot plant design and operation*. 2013, pp. 397-406.
- [96] A. A. Apostolakou, I. K. Kookos, C. Marazioti, and K. C. Angelopoulos, "Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils," *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no. 7, pp. 1023-1031, 2009/07/01/ 2009.
- [97] P. E. Eric Harrington, "Green=Green!," in *Excellence in Applied Chemical Engineering*, L. PROCESS ENGINEERING ASSOCIATES, Ed., ed.
- [98] M.-O. Bertran, R. Frauzem, A.-S. Sanchez-Arcilla, L. Zhang, J. M. Woodley, and R. Gani, "A generic methodology for processing route synthesis and design based on superstructure optimization," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 106, pp. 892-910, 2017/11/02/ 2017.
- [99] O. Pérez, "Las 4 perspectivas del Balanced Scorecard y su importancia," in *PeopleNext*, ed, 2015.
- [100] J. P. R. Madrid, "Implementación de Balanced Scorecard en una Empresa de Desarrollo de Software," ed, 2013.
- [101] T. B. Domínguez, "Biocombustibles Sustentables de Aviación en México," Aeropuerto y Servicios Auxiliares, ICAO ENVIRONMENT2010, Available: [https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/Env-Seminars-Lima-Mexico/Mexico/15\\_Mexico\\_SustainableBiofuels.pdf](https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/Env-Seminars-Lima-Mexico/Mexico/15_Mexico_SustainableBiofuels.pdf).
- [102] I. A. T. A. (IATA), "Guidance Material for Sustainable Aviation Fuel Management," 2 ed. Montreal—Geneva, 2015.
- [103] J. C. G. V. Myriam Adela Amezcua Allieri, Jorge Arturo Aburto Anell, "Combustibles avanzados de aviación," Instituto Mexicano del Petróleo2016.

- [104] (2013). *Prospectiva de Petróleo Crudo y Petrolíferos 2013-2027*. Available: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62951/Prospectiva de Petr leo y Petroliferos 2013-2027.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62951/Prospectiva_de_Petr_leo_y_Petroliferos_2013-2027.pdf)
- [105] A. G. D. I. C. y. C. G.-A. Araceli Romero Izquierdo. (2016) Bioturbosina: retos y oportunidades. *Ciencia*. Available: <http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/online/Bioturbosina.pdf>
- [106] greasoline. *The Greasoline Process*. Available: <https://www.greasoline.com/technology/>
- [107] U. Honeywell. (2017). *Honeywell Green Jet Fuel™*. Available: <https://www.uop.com/processing-solutions/renewables/green-jet-fuel/>
- [108] Sasol. (2008). *Sasol achieves approval for 100% synthetic jet fuel*. Available: <http://www.sasol.com/media-centre/media-releases/sasol-achieves-approval-100-synthetic-jet-fuel>
- [109] J. Ebert. (2008) Diversified Energy announces Centia process, DoD contract. *BIOMASS*. Available: <http://biomassmagazine.com/articles/1464/>
- [110] S. Limited, "Value-Based Growth on a Robust Foundation," Sasol30 June 2017 2017, Available: [http://www.sasol.com/sites/sasol/files/financial\\_reports/Integrated%20Report%2C%2030%20June%202017.pdf](http://www.sasol.com/sites/sasol/files/financial_reports/Integrated%20Report%2C%2030%20June%202017.pdf).
- [111] A. y. S. Auxiliares, "Informe de actividades 2009-2013," ASA, Biocombustibles Sustentables de Aviación en México2013.
- [112] K. FERRY. Available: <https://www.kornferry.com/about-us/about-us>
- [113] S. d. E. (SENER), "Diagnóstico de la Industria de Petrolíferos en México," ed. <https://www.gob.mx/sener/articulos/diagnostico-de-la-industria-de-petroliferos-en-mexico>: gob.mx, 2016.
- [114] C. R. d. E. (CRE), "¿Qué hacemos?," gob.mx, Ed., ed. <https://www.gob.mx/cre/que-hacemos>.
- [115] M. R. Ximénez, "Mercado de líquidos en México," ed. <http://www.cre.gob.mx/documento/5597.pdf>: Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2015.
- [116] (2017). *Ley de Hidrocarburos con respecto a los permisos a particulares en esta actividad, derogue el Artículo Noveno Transitorio del Reglamento de la Ley de Aeropuertos*.
- [117] M. Alavez. (2017) ASA y los nuevos señores de la turbosina. *MANUFACTURA*.
- [118] N. Zúñiga, "Abre CRE mercado de turbosina," in *REFORMA*, ed. <http://www.reforma.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?id=1262597&v=2&fuente=md&urlredirect=http://www.reforma.com/aplicaciones/articulo/default.aspx?id=1262597&v=2&Fuente=MD>, 2017.
- [119] (2017). *Relación de permisos de importación de turbosina vigentes al 20 de diciembre de 2017*.
- [120] M. FLORES, "CEMIE-BIO: los frutos de la biomasa," in *PROYECTO FSE*, ed. <http://proyectofse.mx/2016/02/03/cemie-bio-los-frutos-la-biomasa/>, 2016.
- [121] I. P. H. M. Ana Paulina Castañeda Alvarez, Fernando Rodríguez Cano, "Análisis de la situación actual de los biocombustibles en México: "Enfoque CEMIE-BIO", " ed. [http://rtbioenergia.org.mx/wp-content/uploads/2016/12/FODA\\_MAPAS\\_RUTA.pdf](http://rtbioenergia.org.mx/wp-content/uploads/2016/12/FODA_MAPAS_RUTA.pdf): Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIE-Bio), 2016.
- [122] W. Bruciaga. (2016). *La industria de la aviación y la bioturbosina en México*. Available: <http://proyectofse.mx/2016/03/09/bioturbosina-en-mexico/>
- [123] J. C. Diehl and M. Crul, *Design for Sustainability (D4S): Manual and Tools for Developing Countries*. 2008.

- [124] L. James, *Sustainability Footprints*. 2014, pp. 61-83.
- [125] M. M. El-Halwagi, "Chapter Four - Process Integration for Sustainable Design," in *Sustainability in the Design, Synthesis and Analysis of Chemical Engineering Processes* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 87-113.
- [126] "Front Matter," in *Sustainability in the Design, Synthesis and Analysis of Chemical Engineering Processes* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016, p. iii.

**ANEXO 1. Especificaciones de la turbosina (Jet Fuel A1) en México, de norma NOM-EM-005-CRE-2015.**

Propiedad	Unidad	Método de prueba	Valor límite
Densidad a 20 °C	kg/l	ASTM D 1298, Densidad, densidad relativa (gravedad específica) o gravedad de petróleo crudo y productos líquidos de petróleo por el método del hidrómetro. ASTM D 4052 Densidad y densidad relativa de líquidos por medio de densitómetro digital	0.7720 a 0.8370
Gravedad	°API	ASTM D 287, Gravedad API de petróleo crudo y productos de petróleo (Método por hidrómetro) ASTM D 4052, Densidad y densidad relativa de líquidos por medio de densitómetro digital	37 a 51
Apariencia	Adimensional	Visual	Brillante y clara
Temperatura de destilación: Temperatura de destilación del 10 % Temperatura de destilación del 50 % Temperatura de destilación del 90 % Temperatura final de ebullición Residuo de la destilación Pérdida de la destilación	°C °C °C °C mL mL	ASTM D 86, Destilación de productos del petróleo a presión atmosférica ASTM D 2887, Distribución de rangos de ebullición en fracciones del petróleo por cromatografía de gases ASTM D 7345, Destilación de productos derivados del petróleo y combustibles líquidos a presión atmosférica (Método de micro destilación)	205.0 máximo Informar Informar 300.0 máximo 1.5 máximo 1.5 máximo
Temperatura de inflamación <sup>(1)</sup>	°C	ASTM D 56, Temperatura de inflamación por analizador TAG de copa cerrada	38.0 mínimo
Temperatura de congelación	°C	ASTM D 2386, Temperatura de congelación para combustibles de aviación ASTM D 5972, Temperatura de congelación para combustibles de aviación (Método Automático por Transición de Fases) ASTM D 7153, Temperatura de congelación para combustibles de aviación (Método Automático de Laser) ASTM D 7154, Temperatura de congelación para combustibles de aviación (Método Automático de Fibra Óptica)	-47.0 máximo

Poder calorífico (2)	MJ/kg	ASTM D 4529, Poder calorífico para combustibles para aviación ASTM D 3338, Poder calorífico para combustibles para aviación ASTM D 4809, Poder calorífico de combustibles fósiles líquidos por calorímetro de bomba (Método de precisión)	42.800 mínimo
Acidez total	mg KOH/g	ASTM D 3242, Acidez en combustibles para turbinas de aviación	0.1 máximo
Aromáticos	% vol.	ASTM D1319, Tipos de hidrocarburos en productos líquidos de petróleo por indicador fluorescente de absorción ASTM D 5186, Determinación del contenido de compuestos aromáticos polinucleares y contenido aromático de combustibles diésel y combustibles de turbinas de aviación por cromatografía de fluidos supercríticos	25.0 máximo
Azufre Total	mg/kg	ASTM D 4294, Determinación de azufre en productos de petróleo por espectroscopía de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía ASTM D 5453, Determinación de Azufre total en hidrocarburos ligeros, combustible para motores de ignición por chispa, combustible para motores a diésel y aceite para motor, por Fluorescencia ultravioleta ASTM D 2622, Azufre en productos del petróleo por medio de Espectrometría Fluorescente de energía dispersiva de Rayos X ASTM D7039 Azufre en gasolina y diésel por medio de espectrometría por fluorescencia dispersiva de rayos X de longitud de onda monocromática ASTM D7220 Azufre en combustibles automotrices, para calentamiento y turbosinas por fluorescencia dispersiva de rayos X de energía monocromática	3000 máximo
Azufre mercaptánico	mg/kg	ASTM D 3227, Azufre mercaptánico en gasolina, queroseno,	30 máximo

		combustibles para turbinas de aviación y combustibles destilados (Método potenciométrico)	
Viscosidad cinemática a -20 °C	cSt	ASTM D 445, Viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (Cálculo de viscosidad dinámica) ASTM D 7042, Viscosidad dinámica y densidad de líquidos, por medio del viscosímetro Stabinger (y el cálculo de la viscosidad cinemática).	8.0 máximo
Estabilidad térmica (2.5 h a temperatura controlada de 260 °C, mínimo)(3)	kPa (mm Hg) Adimensional	ASTM D 3241 Estabilidad de la oxidación térmica de combustibles para turbinas de aviación	
Caída de presión del filtro			3.3 máximo (25) máximo
Depósitos en tubo precalentador. Evaluado con VTR	I	Visual Código de color VTR	<3 Sin arcoiris, ni depósitos de color anormal
valuación con ITR o Evaluación con ETR	nm	Método Interferométrico Método Elipsométrico	85 máximo
Aditivos: Inhibidor antioxidante(4) Desactivador metálico(5)	mg/L mg/L		24 máximo 5.7 máximo
Punto de humo, o Punto de humo y Naftalenos(6)	mm mm, % vol	ASTM D 1322, Punto de humo en querosenos y combustibles para turbinas de aviación ASTM D 1840, Determinación de naftalenos en combustibles para turbinas de aviación por espectrofotometría ultravioleta	25.0 mínimo o 18.0 mínimo y 3.0 máximo
Partículas contaminantes	mg/L mg/gal	ASTM D 2276, Partículas contaminantes en combustibles de aviación por muestreo por líneas. ASTM D 5452, Partículas contaminantes en combustibles de aviación por filtración en laboratorio	0.8 máximo 3.0 máximo
Corrosión al Cu, 2 horas a 100 °C	Adimensional	ASTM D 130, Detección de corrosión al cobre de productos de petróleo por prueba de mancha en tira de cobre	Estándar 1, máximo
Contenido de goma	mg/100mL	ASTM D 381, Gomas existentes en combustibles por evaporación por chorro.	7.0 máximo
Calificación por microseparómetro: Sin aditivo de conductividad eléctrica Con aditivo de conductividad eléctrica	Adimensional	ASTM D 3948, Determinación de las características de separación de agua en combustibles para turbinas de aviación mediante separador portátil	85 mínimo 70 mínimo

**OBSERVACIONES:**

- (1)** La temperatura de inflamación será 42 °C mínimo, para clientes de exportación que así lo soliciten.
- (2)** El poder calorífico se calcula en MJ/kg, usando las tablas y las ecuaciones descritas en el Método de Prueba Estimación del poder calorífico para combustibles para aviación.
- (3)** La prueba de estabilidad térmica (ASTM D 3241) debe efectuarse a 260 °C durante 2.5 horas. Es conveniente pero no obligatoria, la determinación del depósito en el tubo precalentador por el método de densidad óptica.
- (4)** Solamente se podrán usar los siguientes antioxidantes: a) N,N-diisopropil-parafenilen-diamina; b) 75 % mínimo 2-6-diterbutil-fenol más 25 % máximo de ter y triterbutil-fenol; c) 72 % mínimo 2-4-dimetil-6-terbutil-fenol más 28 % máximo de mono-metil y dimetil-terbutilfenol; d) 55 % mínimo 2-4-dimetil- 6-terbutil-fenol más 45 % máximo de ter y diterbutuilfenol.
- (5)** Se puede adicionar Aditivo Desactivador de Metales (MDA), en el punto de refinación para mejorar la estabilidad a la oxidación térmica, sólo sujetándose a las siguientes limitaciones:
  - a.** Considerando la producción de lotes de combustible en un periodo de 12 meses, máximo el 5 % de ellos pueden ser adicionados con MDA para cumplir los requisitos de la prueba de estabilidad térmica a 260 °C
  - b.** El lote de combustible debe pasar la prueba de estabilidad térmica a una temperatura de 245 °C, antes de adicionar el MDA
  - c.** El lote de combustible debe pasar la prueba de estabilidad térmica a una temperatura de 275 °C, después de haber adicionado el MDA.
  - d.** El certificado de calidad del lote debe contener el resultado de la prueba de estabilidad térmica desarrollado a 245 °C (antes de la adición de MDA), a la temperatura de 260 °C y el obtenido a 275 °C (después de la adición de MDA)
  - e.** Se puede adicionar MDA en los sistemas de distribución de combustible, para recuperar el desempeño perdido de la estabilidad a la oxidación térmica durante la distribución (después de la liberación en refinería). El certificado de calidad debe mostrar el resultado inicial de la prueba de estabilidad térmica, el resultado después de la adición de MDA y la concentración agregada de MDA.
  - f.** La cantidad debe ser declarada por el proveedor del combustible y aceptada por el cliente.
- (6)** Si el punto de humo tiene un valor entre 20 y 18 mm y el contenido de naftalenos es menor de 3 %, se puede comercializar el producto notificando al comprador dentro de los 90 días a partir de la fecha de envío, a no ser que se acuerden otras condiciones.



## ANEXO 2. Pasos para desarrollar un análisis AMEF

Desarrollar un mapa del proceso (Representación gráfica de las operaciones). Este mapeo ya fue seleccionado de la *Matriz Pugh* y complementado con el mapa de proceso de alto nivel (SIPOC), pueden usarse diagramas en bloques representando unidades de procesamiento, para facilitar su uso.

1. Formar un equipo de trabajo, documentar el proceso, el producto, etc.
2. Determinar los pasos críticos del proceso. Las funciones críticas del proceso (FR) y los pasos críticos del proceso se evaluarán en las casas del despliegue de calidad uno y dos (QFD1 y 2).
3. Determinar las fallas potenciales de cada paso del proceso, determinar sus efectos y evaluar su nivel de gravedad (severidad).

**Modo de falla.** Un modo de falla es la forma en que el producto o proceso puede afectar el cumplimiento de las especificaciones, afectando al cliente, al colaborador, al ambiente o al proceso siguiente.

**Efecto.** El impacto en el cliente, en el proceso siguiente cuando el modo de falla se hace real.

Para la calificación de la severidad del de los efectos potenciales puede usarse como ayuda la guía siguiente:

### *Calificación de efectos en análisis AMEF [94].*

CALIFICACIÓN		CRITERIO	
Cuantitativa	Cualitativa	Efecto en el cliente	Efecto en el proceso
1	Ninguno	Sin efecto perceptible	Ligero inconveniente para la operación u operador
2	Muy menor	No se cumple con el ajuste, acabados o presenta ruidos. Defecto notado por los clientes críticos (25%)	Una parte del producto puede tener que ser reprocesado, sin desechos.
3	Menor	No se cumple con el ajuste, acabados o presencia de ruidos. Defecto notado por el 50% de los clientes.	Una parte del producto puede tener que ser reprocesado. Sin desechos.
4	Muy bajo	No se cumple con el ajuste, acabados o presenta ruidos. Defecto notado por el 75% de los clientes.	El producto debe ser seleccionado y una parte reprocesada. Sin desechos.
5	Bajo	Producto con especificaciones de calidad o niveles de desempeño bajos. Operable o usable.	El 100% del producto debe ser reprocesado o reparado fuera de línea.
6	Moderado	Producto con especificaciones de calidad o niveles de desempeño bajos. Operable o usable.	Una parte del producto puede tener que ser desechado sin selección o reparado con tiempo y costo alto.
7	Alto	Producto operable o usable pero el cliente estará insatisfecho.	El producto tiene que ser seleccionado y una parte reparada con un tiempo y costo alto.

8	Muy alto	El producto es inoperable o inusable.	El 100% del producto debe ser desechado o puede ser reparado a un costo inviable.
9-10	Peligroso	En modo potencial afecta la operación segura del producto y/o involucra un no cumplimiento con alguna regulación gubernamental.	Puede exponer al peligro al operador o al equipo.

4. Indicar las causas de cada falla y evaluar la ocurrencia de las fallas.

En este paso se deben relacionar las causas asociadas a cada falla identificada en el paso anterior. Además, se debe evaluar la ocurrencia de las fallas.

**Probabilidad de falla en análisis AMEF [94].**

CALIFICACIÓN	
Cuantitativa	Probabilidad
1	Remota: falla improbable
2	Baja: pocas fallas
3	
4	
5	Moderada: fallas ocasionales
6	
7	
8	Alta: fallas frecuentes
9	Muy alta: Fallas persistentes
10	

5. Indicar los controles (medidas de detección) que se tienen para detectar fallas y evaluarlas.

En este paso se debe describir el tipo de control que se tiene para detectar cada falla. Además, se debe evaluar, en una escala del 1 al 10, la capacidad de detección de la misma; entre mayor sea la posibilidad de detectar la falla, menor será la calificación. Puede utilizarse la siguiente escala como guía:

**Calificación de efectos en análisis AMEF.**

CALIFICACIÓN		TIPOS DE INSPECCION		
Cuantitativa	Cualitativa	A	B	C
1	Controles seguros para detectar: El ítem ha pasado a prueba de errores. Es casi improbable el hecho de realizar partes no conformes.	X		
2	Controles casi seguros para detectar: el ítem ha pasado por medición automática. No puede pasar la parte no conforme.	X	X	
3	Controles con buena oportunidad de detectar: Detección inmediata del error en la estación o en la estación siguiente. No pasa la unidad no conforme.	X	X	

4	Controles con buena oportunidad de detectar: Detección del error en la estación siguiente. No pasa la unidad no conforme.	X	X	
5	Controles que pueden detectar: mediciones “pasa” o “no pasa” realizando en el 100% de las partes después de dejar la estación.		X	
6	Controles que pueden detectar: control en menos del 100% de las partes; puede estar apoyado en métodos estadísticos.		X	X
7	Controles con poca oportunidad de detectar: control logrado con doble inspección visual.			X
8	Controles con poca oportunidad de detectar: control efectuado con una inspección visual.			X
9	Controles que probablemente no detectarán: control logrado con verificaciones indirectas o al azar			X
10	Certeza absoluta de no detección: no se controla, no se detecta.			

A= Prueba de error  
B=Medición automatizada  
C=Inspección visual/manual

6. Obtener el número de prioridad de riesgo para cada falla y tomar decisiones.

El número de prioridad de riesgo, también conocido como RPN, por sus siglas en inglés Risk Priority Number, es el producto de multiplicar la severidad, la ocurrencia, y la detección o detectabilidad. El RPN es un número entre 1 y 1000 que nos indica la prioridad que se le debe dar a cada falla para eliminarla.

7. Ejecutar acciones preventivas, correctivas o de mejora.

Una vez se ha establecido la prioridad de los modos de falla, se procede a ejecutar acciones preventivas, correctivas o de mejora. Ya en esta etapa se cuenta con una información relevante relacionada con el proceso, las fallas, las causas y los controles de detección. El equipo AMEF deberá entonces establecer:

- Acciones recomendadas por falla.
- Asignar los responsables por acción, relacionando la fecha de ejecución.
- Establecer una fecha de revisión.
- Registrar las acciones ejecutadas hasta la fecha de revisión.
- Calcular nuevamente el RPN.

### ANEXO 3. Heurísticas para la síntesis del proceso químico

Se conjuntaron heurísticas de las tres siguientes fuentes:

1. LIBRO: Product and Process Design Principles. Synthesis, Analysis and Evaluation. Seider, Seader, Lewin, Widagdo, tercera edición [91].
2. PRESENTACIÓN: Green = Green! Eric Harrington, P.E. PROCESS ENGINEERING ASSOCIATES, LLC [97].
3. Principios de Ingeniería Verde (IV) desarrollada por Paul Anastas y Julie Zimmerman [54].

La tabla aquí presentada puede mejorarse al evolucionar en la aplicación de la IV en la síntesis de procesos químicos.

Concepto	No.	Heurística
<b>Operaciones de reacción</b>	<b>1</b>	Eliminar el uso de materias primas tóxicas, así como la formación de sustancias tóxicas intermedias.
	<b>2</b>	Usar preferiblemente rutas de síntesis que empleen métodos de reacción o catalizadores biológicos.
	<b>3</b>	Prevenir la contaminación modificando los parámetros de reacción: cinéticos, regímenes de mezclado, temperatura, presión, elección de procesos continuos o batch y los esquemas de control.
<b>Distribución de químicos</b>	<b>4</b>	Cuando se requieren productos cercanos al original, remover las especies inertes antes de las operaciones de reacción cuando la separación puede completarse fácilmente y cuando el catalizador es afectado negativamente por el inerte, pero no cuando una reacción altamente exotérmica debe ser desplazada.
	<b>5</b>	No hacer purgas para especies valiosas, incluso en bajas concentraciones. Agregar separadores para recuperar dichas especies.
	<b>6</b>	Subproductos que se generan en reacciones reversibles, en pequeñas cantidades no son usualmente recuperados en separadores o purgas. Son reciclados para su consumo total.
	<b>7</b>	Proveer reactores separados para reciclar corrientes que permitan la optimización de las conversiones.
	<b>8</b>	Para reacciones en competencia, ambas en serie o paralelas, ajustar la temperatura, presión y catalizador para obtener una alta conversión del producto deseado. En la distribución inicial de los químicos, asumir que estas son las condiciones que pueden ser satisfechas. Antes de desarrollar el diseño del caso base obtener datos cinéticos y revisar las suposiciones hechas.

	<b>9</b>	Especialmente para reacciones reversibles, considerar conducirlos a un dispositivo separador capaz de remover los productos y por lo tanto conducir la reacción hacia la derecha.
<b>Operaciones de separación: Para mezclas líquido-líquido</b>	<b>10</b>	Diseñar los procesos de separación aprovechando las propiedades físico/químicamente intrínsecas de los efluentes de cada unidad de proceso. Esto facilitará su separación y la optimización de energía.
	<b>11</b>	Separar mezclas líquidas usando destilación, arrastre con vapor, destilación mejorada (extractiva, azeotrópica, reactiva), extracción líquido-líquido, cristalización, y/o adsorción.
	<b>12</b>	Separar las mezclas de vapor usando condensación parcial, criogénica, destilación, absorción, adsorción, separación por membrana y/o de sublimación.
	<b>13</b>	Considerar el uso de columnas empacadas altamente eficientes en lugar de columnas de platos de burbujeo.
	<b>14</b>	Eliminar separadores por adsorción cuando las camas del adsorbedor no pueden ser fácilmente regeneradas.
<b>Para mezclas que envuelven partículas sólidas</b>	<b>15</b>	Cristalizar químicos inorgánicos de soluciones acuosas por enfriamiento cuando la solubilidad decrece significativamente con el decrecimiento de la temperatura. Mantener la solución al menos 1-2°F debajo de la temperatura de saturación a la concentración prevaleciente. Usar cristalización por evaporación antes que enfriamiento, cuando la solubilidad no cambia de modo significativo con la temperatura.
	<b>16</b>	La velocidad de formación de cristales es aproximadamente la misma en todas las direcciones, pero los cristales jamás tendrán esférica. La velocidad de cristalización y el tamaño de los cristales se hace limitando la extensión de la supersaturación, donde la velocidad de crecimiento está influenciada mayormente por la presencia de impurezas y aditivos esféricos que varían de caso en caso.
	<b>17</b>	Separar químicos orgánicos por cristalización en función con el enfriamiento, usando cristalización suspendida, seguida de su remoción de los cristales por filtración o centrifugación.
	<b>18</b>	En el uso de evaporadores múltiples en series, el calor latente de evaporación del agua debe ser recuperado y reusado.
	<b>19</b>	Para pastas y lodos, usar un secador de tambor con calentamiento indirecto. Para un líquido o lodo de pulpa, usar un spray con calentamiento directo.
<b>Remoción y adición de calor</b>	<b>20</b>	Para remover el calor de reacciones altamente exotérmicas, considerar el uso de reactantes en exceso, una dilución de inertes, o enfriamientos rápidos (golpes de enfriamiento). Esto afecta la distribución de químicos y debe ser insertado tempranamente en el proceso de síntesis.

	<b>21</b>	Para calores de reacción menos exotérmicas, circular el fluido del reactor por un enfriador externo, usar un enchaquetado o enfriamiento por serpentín.
	<b>22</b>	Para controlar temperaturas del calor en reacciones altamente endotérmicas, considerar el uso de reactantes en exceso, una dilución de inertes, o calentamientos rápidos. Esto afecta la distribución de químicos y debe ser insertado tempranamente en el proceso de síntesis.
	<b>23</b>	Para calores de reacción menos endotérmicos, circular el fluido del reactor por un calentador externo, usar un enchaquetado o calentamiento por serpentín. Además, considerar el uso de calentadores intermediarios entre etapas de reacciones adiabáticas.
	<b>24</b>	Considerar el uso de intercambiadores de calor y evaporadores de pared raspada para materiales altamente viscosos y eliminar la degradación térmica del producto.
<b><i>Intercambiadores de calor y hornos.</i></b>	<b>25</b>	Aprovechar los efluentes calientes de las unidades de procesamiento para enfriar otras corrientes que ingresen y que requieren ser calentadas antes de emplear servicios externos. Pero si la corriente requiere ser calentada alrededor de los 750°F emplear un horno, cuando el material no está sujeto a descomposición química.
	<b>26</b>	Cuando se usa agua de enfriamiento para enfriar o condensar una corriente de proceso, asumir que la temperatura de entrada es de 90°F (proveniente de una torre de enfriamiento) y una temperatura máxima de salida de 120°F.
	<b>27</b>	Cuando se enfría y condensa una corriente en un intercambiador de calor, es recomendado hacer un análisis de zona para estar seguro de que las diferencias entre la temperatura de la corriente caliente y la corriente fría es igual o más fría que las temperaturas mínimas de aprovechamiento en todas las localizaciones del intercambiador de calor. Un simulador de procesos logra convenientemente el análisis de zona.
	<b>28</b>	Ajustar la temperatura de los gases de chimenea del horno a 650 -950°F para prevenir la condensación de componentes corrosivos del gas de combustión.
	<b>29</b>	Estimar las caídas de presión de los intercambiadores de calor como sigue: 1.5 psi para evaporado y condensado 3 psi para un gas 5 psi para líquidos de baja viscosidad 7.9 psi para líquidos de alta viscosidad 20 psi para fluidos de proceso que pasan a través de un quemador.

	<b>30</b>	Apagar una corriente de proceso muy caliente al menos hasta 1,102°F antes de enviarla a un intercambiador de calor para enfriamiento o condensación adicional.
	<b>31</b>	Si es posible, calentar o enfriar una corriente de partículas sólidas directamente en contacto con el gas caliente o gas frío respectivamente. Usando un horno rotatorio, una cama fluidizada, etc.
<b><i>Integración del proceso</i></b>	<b>32</b>	Preferir procesos continuos cuando la limpieza de desperdicios es significativa.
	<b>33</b>	Buscar minimizar el número de etapas del proceso.
	<b>34</b>	Minimizar el potencial de fugas.
	<b>35</b>	Maximizar la selectividad de cada unidad de operación.
	<b>36</b>	Minimizar el requerimiento de servicios
	<b>37</b>	Diseñar para la operación.

## ANEXO 4. Relación de permisos de importación de turbosina vigentes al 20 de diciembre de 2017

No.	Razón social	Producto	Cantidad*	Unidad	Fecha de otorgamiento	Fecha de Vencimiento	No. de Permiso
1	VITOL MARKETING MEXICO S DE RL DE CV	turbosina	9,500,000,000.00	Litros	9 de enero de 2017	9 de enero de 2018	1701C117000301
2	GULFPORT TRADING SA DE CV	turbosina	905,289,060.00	Litros	11 de enero de 2017	11 de enero de 2018	1701C117000761
3	TURBORREACTORES SA DE CV	turbosina	1.00	Litros	12 de enero de 2017	12 de enero de 2018	1701C617000592
4	MOLYMEX SA DE CV	turbosina	3,120.00	Litros	19 de enero de 2017	19 de enero de 2018	1701C117001166
5	SUNBEAM MEXICANA SA DE CV	turbosina	3,000.00	Litros	24 de enero de 2017	24 de enero de 2018	1701C117001245
6	ALTOS HORNOS DE MEXICO S A B DE CV	turbosina	1,000,000.00	Litros	26 de enero de 2017	26 de enero de 2018	1701C117001625
7	GLENCORE ENERGY MX SA DE CV	turbosina	1,740,910,059.00	Litros	2 de febrero de 2017	2 de febrero de 2018	1701C117001967
8	CFENERGIA SA DE CV	Turbosina	2,120,000,000.00	Litros	7 de febrero de 2017	7 de febrero de 2018	1701C117002282
9	HYBRID TRUST ENGINEERING & CO S A P I B DE CV	Turbosina	5,600,000.00	Litros	10 de febrero de 2017	10 de febrero de 2018	1701C117002768
10	CYTEC DE MEXICO SA DE CV	Turbosina	100,000.00	Litros	13 de febrero de 2017	13 de febrero de 2018	1701C117002786
11	PROPANGOL SA DE CV	Turbosina	100,000,000.00	Litros	13 de febrero de 2017	13 de febrero de 2018	1701C117002779
12	TEXMEXGAS SA DE CV	Turbosina	100,000,000.00	Litros	14 de febrero de 2017	14 de febrero de 2018	1701C117002775
13	PARAGON MIDSTREAM S A P I DE CV	Turbosina	500,000,000.00	Litros	14 de febrero de 2017	14 de febrero de 2018	1701C117003005
14	TOTAL MEXICO SA DE CV	Turbosina	580,000,000.00	litros	16 de febrero de 2017	16 de febrero de 2018	1701C117003147
15	TESORO MEXICO SUPPLY & MARKETING S DE RL DE CV	turbosina	580,240,500.00	Litros	22 de febrero de 2017	22 de febrero de 2018	1701C117003138
16	BIOURJA MEXICO GAS S DE RL DE CV	turbosina	499,200,000.00	Litros	27 de febrero de 2017	27 de febrero de 2018	1701C117003742
17	RC ENERGY S DE RL DE CV	turbosina	56,781,176.00	Litros	14 de marzo de 2017	14 de marzo de 2018	1701C117004676
18	WESTERN REFINING DE MEXICO S DE RL DE CV	turbosina	173,995,500.00	Litros	17 de marzo de 2017	17 de marzo de 2018	1701C117004677
19	PETROVIM SA DE CV	turbosina	30,000,000.00	Litros	27 de marzo de 2017	27 de marzo de 2018	1701C117005799
20	TOTAL MEXICO SA DE CV	turbosina	8,400,000.00	Litros	5 de abril de 2017	5 de abril de 2018	1701C117005798
21	COSEDYTH SA DE CV	turbosina	300,000,000.00	Litros	6 de abril de 2017	6 de abril de 2018	1701C117005983
22	TRAFIGURA MEXICO SA DE CV	turbosina	1,160,700,000.00	Litros	10 de abril de 2017	10 de abril de 2018	1701C117006655
23	TRAFIGURA MEXICO SA DE CV	turbosina	1,160,700,000.00	Litros	19 de abril de 2017	19 de abril de 2018	1701C117006658
24	DICODEC DEL GOLFO SA DE CV	turbosina	171,771,870.00	Litros	20 de abril de 2017	20 de abril de 2018	1701C117006780
25	EW S S DE RL DE CV	turbosina	56.78	Litros	26 de abril de 2017	26 de abril de 2018	1701C117007162
26	P.M.I. TRADING MEXICO SA DE CV	turbosina	2,528,505,798.00	Litros	28 de abril de 2017	28 de abril de 2018	1701C117007285
27	CARROCERIAS JAUJA S DE RL DE CV	turbosina	80,000,000.00	Litros	2 de mayo de 2017	2 de mayo de 2018	1701C117007352
28	DURANDCO TRADING SA DE CV	turbosina	1,430,885,736.00	Litros	2 de mayo de 2017	2 de mayo de 2018	1701C117007490
29	NOBLE PETROLEO DE MEXICO SA DE CV	turbosina	276,000,000.00	Litros	16 de mayo de 2017	16 de mayo de 2018	1701C117008469
30	MASA CAPITAL SA DE CV	turbosina	15,898,720.00	Litros	17 de mayo de 2017	17 de mayo de 2018	1701C117008589
31	AMERIGAS PROPANE LP SA DE CV	turbosina	100,000,000.00	Litros	31 de mayo de 2017	31 de mayo de 2018	1701C117009343
32	HIGH LEVEL ENERGY S A P I DE CV	turbosina	500,000,000.00	Litros	1 de junio de 2017	1 de junio de 2018	1701C117009404
33	COMBUSTIBLES RIMAN SA DE CV	turbosina	100,000,000.00	Litros	1 de junio de 2017	1 de junio de 2018	1701C117009400
34	VISCAYA HOLDING GROUP SA DE CV	turbosina	40,000,000.00	Litros	7 de junio de 2017	7 de junio de 2018	1701C117010215
35	COMBUSTIBLES RIMAN SA DE CV	turbosina	200,000,000.00	Litros	8 de junio de 2017	8 de junio de 2018	1701C117009833
36	NOVUM MEXICO TRADING S DE RL DE CV	turbosina	953,820,000.00	Litros	8 de junio de 2017	8 de junio de 2018	1701C117010204
37	GASPROSERV SC	turbosina	40,000,000.00	Litros	14 de junio de 2017	14 de junio de 2018	1701C117010817
38	PORTEADORES DEL NOROESTE SA DE CV	turbosina	10,000,000.00	Litros	14 de junio de 2017	14 de junio de 2018	1701C617010476
39	WP SOLUCIONES INDUSTRIALES SA DE CV	turbosina	400,000,000.00	Litros	26 de junio de 2017	26 de junio de 2018	1701C117011527
40	OPERADORA DE MINAS DE NACUZARI SA DE CV	turbosina	5,000,000.00	Litros	5 de julio de 2017	5 de julio de 2018	1701C117011773



No.	Razón social	Producto	Cantidad*	Unidad	Fecha de otorgamiento	Fecha de Vencimiento	No. de Permiso
41	DRILLING SERVICES XPECTRUM SA DE CV	turbosina	100,000,000.00	Litros	10 de julio de 2017	10 de julio de 2018	1701C117012239
42	COMERCIALIZADORA INTERNACIONAL PETCOM SA DE CV	turbosina	564,000,000.00	Litros	11 de julio de 2017	11 de julio de 2018	1701C117012421
43	PEMEX TRANSFORMACION INDUSTRIAL EPS	turbosina	2,000,000,000.00	Litros	18 de julio de 2017	18 de julio de 2018	1701C117012426
44	TAUBER OIL MEXICO S DE RL DE CV	turbosina	190,784,160.00	Litros	20 de julio de 2017	20 de julio de 2018	1701C117012918
45	INMOBILIARIA DAMORA - CRANE SA DE CV	turbosina	100,000,000.00	Litros	20 de julio de 2017	21 de julio de 2018	1701C117013027
46	PROYECTOS ARMONT SA DE CV	turbosina	200,000,000.00	Litros	26 de julio de 2017	26 de julio de 2018	1701C117013376
47	PROYECTOS ARMONT SA DE CV	turbosina	200,000,000.00	Litros	26 de julio de 2017	26 de julio de 2018	1701C117013379
48	IF VERTICAL 2 S A P I DE CV	turbosina	954,000,000.00	Litros	27 de julio de 2017	27 de julio de 2018	1701C117013032
49	VALERO MARKETING AND SUPPLY DE MEXICO SA DE CV	turbosina	1,910,000,000.00	litros	28 de julio de 2017	28 de julio de 2018	1701C117013508
50	JUAN CARLOS VERA NORIEGA	turbosina	500,000,000.00	litros	31 de julio de 2017	31 de julio de 2018	1701C117013519
51	OKLAHOMA OIL COMPANY MEXICO SA DE CV	turbosina	477,000,000.00	Litros	9 de agosto de 2017	9 de agosto de 2018	1701C117013525
52	UNIVAR DE MEXICO SA DE CV	turbosina	2,477.00	Litros	14 de agosto de 2017	7 de agosto de 2018	1701C117013535
53	DISTRIBUIDORA DE HIDROCARBUROS BJRR SA DE CV	turbosina	204,000,000.00	Litros	14 de agosto de 2017	14 de agosto de 2018	1701C117013545
54	NORD STORM ENERGY GROUP S A P I DE CV	turbosina	15,000,900.00	Litros	15 de agosto de 2017	15 de agosto de 2018	1701C117013557
55	TOTAL MEXICO SA DE CV	turbosina	49,518,193.00	Litros	16 de agosto de 2017	16 de agosto de 2018	1701C117013552
56	PARKER INDUSTRIAL S DE RL DE CV	turbosina	18.90	Litros	21 de agosto de 2017	21 de agosto de 2018	1701C117013578
57	TRICHEM DE MEXICO SA DE CV	turbosina	95,400,000.00	Litros	6 de septiembre de 2017	6 de septiembre de 2018	1701C117013604
58	KOCH SUPPLY & TRADING MEXICO S DE RL DE CV	turbosina	1,068,278,400.00	Litros	8 de septiembre de 2017	8 de septiembre de 2017	1701C117013616
59	VALERO TERMINALING AND DISTRIBUTION DE MEXICO SA DE CV	turbosina	464,243,696.00	Litros	13 de septiembre de 2017	13 de septiembre de 2018	1701C117013636
60	NAVITAS INTELIGENCIA EN MIDSTREAM SA DE CV	turbosina	90,000,000.00	litros	21 de septiembre de 2017	21 de septiembre de 2018	1701C117013641
61	SHELL MEXICO SA DE CV	turbosina	1,717,200,000.00	Litros	25 de septiembre de 2017	25 de septiembre de 2018	1701C117013655
62	RERUMXTS SA DE CV	turbosina	51,000,000.00	Litros	25 de septiembre de 2017	25 de septiembre de 2018	1701C117013660
63	COMBUSTIBLES DE ORIENTE SA DE CV	turbosina	150,000,000.00	Litros	6 de octubre de 2017	6 de octubre de 2018	1701C117013678
64	BAJAGAS MARKETPLACE S A P I DE CV	turbosina	28,620,000.00	Litros	9 de octubre de 2017	9 de octubre de 2018	1701C117013692
65	CREEK FUELS DE MEXICO SA DE CV	turbosina	200,000,000.00	Litros	9 de octubre de 2017	9 de octubre de 2018	1701C117013694
66	MAQUILAS TETA KAWI SA DE CV	turbosina	800.00	Litros	11 de octubre de 2016	11 de octubre de 2018	1701C117013699
67	BLUE ENERGY AND ELECTRICITY S A P I DE CV	turbosina	800,000,000.00	Litros	16 de octubre de 2017	16 de octubre de 2018	1701C117013704
68	JZ-LINK SA DE CV	turbosina	60,000,000.00	litros	30 de octubre de 2017	30 de octubre de 2018	1701C117013737
69	COGENT ENERGY SOLUTIONS MEXICO S DE RL DE CV	turbosina	2,432,275,231.00	litros	31 de octubre de 2017	31 de octubre de 2018	1701C117013744
70	WORLD FUEL SERVICES MEXICO S DE RL DE CV	Turbosina	4,500,000,000.00	Litros	7 de noviembre de 2017	7 de noviembre de 2018	1701C117013753
71	BP ESTACIONES Y SERVICIOS ENERGETICOS SA DE CV	Turbosina	1,000,000,000.00	Litros	7 de noviembre de 2017	7 de noviembre de 2018	1701C117013754
72	LUBRIQUEM DEL PITIC SA DE CV	Keroseno	60,000,000.00	Litros	7 de noviembre de 2017	7 de noviembre de 2018	1701C117013756
73	SANTA FE ENERGY GROUP S A P I DE CV	Turbosina	730,000,000.00	litros	7 de noviembre de 2017	7 de noviembre de 2018	1701C117013764
74	TOTAL ATLANTIC TRADING MEXICO SA DE CV	Turbosina	42,666,666.00	litros	23 de noviembre de 2017	23 de noviembre de 2018	1701C117013796
75	COMBUSTIBLES Y SERVICIOS PBB S A P I DE CV	Turbosina	28,620,000.00	litros	28 de noviembre de 2017	28 de noviembre de 2018	1701C117013809
76	DOBLE ERRE CONTINENTALES SA DE CV	turbosina	50,000,000.00	litros	14 de diciembre de 2017	14 de diciembre de 2018	1701C117013875
77	GRUPO GASOLOGISTICS SA DE CV	Turbosina	1,200,000,000.00	litros	14 de diciembre de 2017	14 de diciembre de 2018	1701C117013884
78	BALLMAN SERVICIOS DE AVIACION S A P I DE CV	Turbosina	28,620,000.00	litros	14 de diciembre de 2017	14 de diciembre de 2018	1701C117013827
79	VITOL MARKETING MEXICO S DE RL DE CV	Turbosina	9,500,000,000.00	litros	18 de diciembre de 2017	18 de diciembre de 2018	1701C117013899
<b>MONTO TOTAL AUTORIZADO*</b>			<b>58,136,035,139</b>				

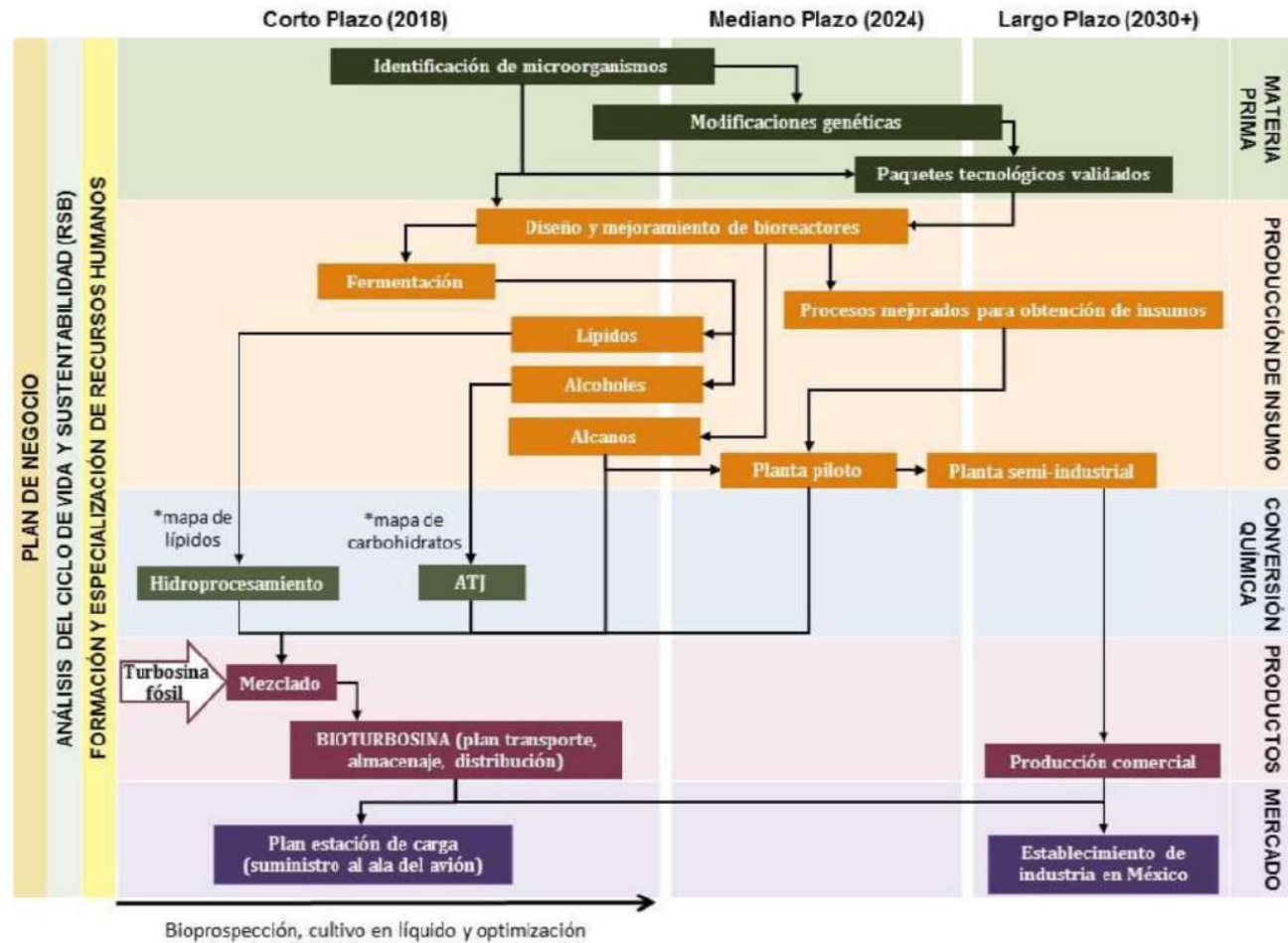
La fuente es la dirección general de petrolíferos

\*Los montos autorizados son indicativos.

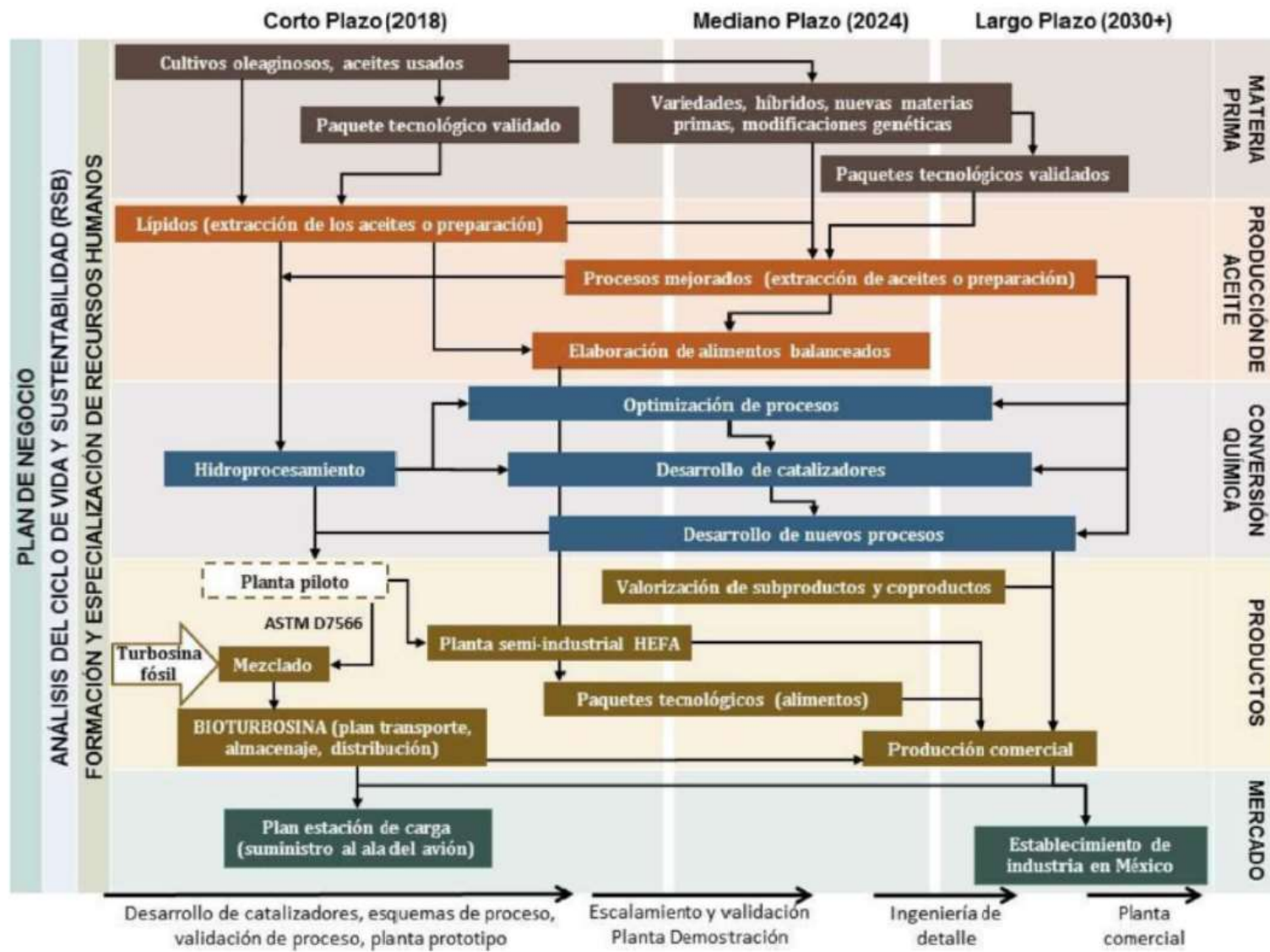
## ANEXO 5. Mapas de ruta tecnológicas de CEMIE-Bio

El CEMIE-Bio generó mapas de análisis de similitudes y diferencias entre las funciones de cada ruta tecnológica:

Con microorganismos [Cervantes Carrillo & Col., 2014] [121]:



A partir de lípidos [Cervantes Carrillo & Col., 2014] [121]:



A partir de carbohidratos [Cervantes Carrillo & Col., 2014] [121]:

