

ACADEMIA JOURNALS



OPUS PRO SCIENTIA ET STUDIUM

Humanidades, Ciencia, Tecnología e Innovación en Puebla

ISSN 2644-0903 online

Vol. 4. No. 1, 2022

www.academiajournals.com

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN AUSPICIADO POR EL
CONVENIO CONCYTEP-ACADEMIA JOURNALS



Gobierno de Puebla

Hacer historia. Hacer futuro.



Secretaría
de Educación
Gobierno de Puebla

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

Carlos Sánchez Pérez

Modelación del Proceso de Combustión Interna Empleando Mezclas Biodiesel de Ricino - Diésel Fósil

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Director de Tesis: Dra. Mayra Ruiz Reyes

Comité revisor

Presidente: Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre

Secretario: Dr. Alberto Eduardo Campos Reales Pineda

Vocal: Dra. Mayra Ruiz Reyes



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**MODELACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN INTERNA EMPLEANDO
MEZCLAS BIODIESEL DE RICINO - DIÉSEL FOSIL**

Tesis para obtener el grado de:
Licenciatura en Ingeniería Química

Presenta:
Carlos Sánchez Pérez

Director de Tesis:
Dra. Mayra Ruiz Reyes

Comité revisor:
Presidente: Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre
Secretario: Dr. Alberto Eduardo Campos Reales Pineda
Vocal: Dra. Mayra Ruiz Reyes

Puebla, Pue. Aprobada el 30 de junio del 2021

MODELACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN INTERNA EMPLEANDO MEZCLAS BIODIESEL DE RICINO-DIESEL FOSIL

Carlos Sánchez Pérez

Resumen

Como una alternativa a la problemática ambiental derivada del uso de combustibles para la generación de energía, aunado a la preocupación por el suministro a largo plazo de combustibles convencionales, se han generado líneas de investigación dirigidas al desarrollar combustibles alternativos. Entre los combustibles alternativos, el biodiesel derivado de aceite vegetal obtenido de fuentes no comestibles se considera una alternativa prometedora para motores de encendido por compresión (CI). Si bien existe un amplio número de investigaciones dedicadas al desarrollo y caracterización de biodiesel, el trabajo dirigido al análisis del rendimiento energético obtenido en motores es limitado debido a los altos costos que implica. Ante esto, es evidente la necesidad de realizar investigación dirigida a la modelación y simulación del desempeño de un motor sujeto al uso de biodiesel o mezclas diesel-biodiesel.

Por lo que, en este trabajo de tesis se desarrolló un modelo de simulación en Aspen Plus V8.8 del proceso termodinámico del ciclo diésel, para su uso en el análisis energético y viabilidad técnica de mezclas biodiesel - diésel fósil en diferentes proporciones. El modelo de simulación consiste en un diagrama de flujo de proceso conformado por equipos que simulan cada una de las etapas que el ciclo diésel conlleva. Con la finalidad de comprobar la viabilidad técnica del uso del simulador para modelar el sistema en base a la fenomenología del proceso, se realizó la validación del modelo comparando los resultados de diferentes escenarios con lo reportado por la literatura, tomando en consideración las condiciones a las que se realizaron los experimentos se obtuvo un factor de correlación de 92.5% a 98%. El caso base empleado para la validación comprende mezclas de biodiesel de de ricino-diesel fosil. Para fines comparativos del desempeño energético del motor de combustión, se analizaron las mezclas: 1) biodiesel de ricino-biodiesel de girasol-diésel y 2) biodiesel de ricino-aceite de ricino-pentanol-diésel fósil. Los parámetros evaluados fueron: 1) Tasa de consumo total de combustible, 2) Potencia generada, 2) Potencia generada por consumo de combustible, 3) Eficiencia energética por consumo de combustible, 4) Capacidad del motor para convertir energía del combustible a energía mecánica, 5) Temperatura de los gases de combustión y 6) Emisión de CO₂.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todas las personas que hicieron posible el desarrollo y elaboración de este proyecto de tesis, al Dr. Francisco Pacheco Aguirre, al Dr. Alberto Campos Reales y principalmente y de manera especial a la Dra. Mayra Ruiz Reyes a quien agradezco, más allá de su asesoría y dirección de este proyecto, su apoyo, tiempo, dedicación y paciencia; ya que sin su colaboración el desarrollo de esta tesis no hubiese sido posible; agradezco también que allá aceptado mi propuesta de realizar mi tesis bajo su dirección, por lo que le reitero mi enorme agradecimiento, ya que a pesar de las circunstancias y problemáticas que se presentaron usted siempre estuvo con la mejor disposición para seguir adelante en este proyecto de tesis. ¡¡¡Muchas gracias!!!

Agradezco también a mis hermanos Karina Sánchez, Israel Sánchez y belén Sánchez por todo su apoyo y solidaridad durante esta magnífica travesía, les agradezco por estar siempre atentos y al pendiente de mí, gracias por todo su cariño y por formar parte de este de este logro. Gracias por su infinito cariño y amor, ya que son y han sido los mejores hermanos, los mejores amigos y los mejores confidentes, por lo que les reitero plenamente mi cariño, mi amor y mi apoyo hacia ustedes de manera incondicional; en definitiva son lo mejor que me ha pasado y quiero decirles que cada uno de ustedes es muy especial he importante en mi vida, gracias por compartir su alegría y felicidad con migo, los amo.

Quiero agradecer de manera especial a mi madre Sofía Pérez Hernández, por todo el apoyo que me ha brindado de manera incondicional, por ser el pilar de la familia y por apoyarme plenamente en las decisiones que he tomado; gracias madre por estar siempre con nosotros alentándonos a seguir adelante a pesar de la adversidad, gracias por todo lo que has hecho por nosotros ya que, aunque nunca lo mencione, soy consciente del enorme sacrificio que hiciste para mantener la familia unida, renunciando a tu convicción y sacrificando en gran medida tus sueños y anhelos; sé que a pesar de que traicionaran tu confianza dejaste de pensar incluso en ti misma, para garantizar el desarrollo de mí y de mis hermanos dentro de un seno familiar, por lo cual te reitero mi enorme agradecimiento, sé que no hay manera de retribuirte tu enorme sacrificio, por lo que te dedico de manera especial este gran logro en mi vida “la conclusión de mi carrera profesional” y quiero reafirmarte mi lealtad hacia ti, además de mi enorme amor y mi admiración ya que tú en conjunto con mie hermanos son el amor de mi vida.

Agradezco a la vida por permitirme vivir todas y cada una de las experiencias que se presentaron durante la universidad, donde además tuve la oportunidad de conocer a grandes amigos y compañeros como a mi mejor amiga Erika Gabriela Nolasco Hickman, con quien pase momentos muy divertidos he inolvidables, la cual además me motivo todo el tiempo a seguir adelante, también tuve la oportunidad de conocer a grandes amigos como a Marco Antonio Ortiz Gil, Julio Rodolfo Ortega, Moisés Carbajal, Emanuel Cuecuecha, Daniela Meneses, Anahí Echeverría, Alan Martínez entre otros; amigos que recordare siempre con mucho cariño.

Quiero Agradecer y al mismo tiempo felicitar a la persona más importante en esta travesía, por no ceder ante la adversidad y siempre mantenerse a flote a pesar de las circunstancias, por ser perseverante y por confiar en sí mismo ante los retos que se han presentado en cualquier ámbito; a mí mismo, ¡FELICIDADES!.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.4 HIPÓTESIS	5
2. ANTECEDENTES	6
2.1 DIÉSEL FÓSIL	7
2.2 BIODIESEL	7
2.2.1 TRANSESTERIFICACIÓN.....	8
2.2.2 PLANTA HIGUERILLA O RICINO.....	10
2.2.3 BIODIESEL DE RICINO	11
2.2.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BIODIESEL DE RICINO Y DEL DIÉSEL FÓSIL	12
2.2.5 PROPIEDADES DEL BIODIESEL DE RICINO, ACEITE DE RICINO Y DIÉSEL FÓSIL	12
2.2.6 VENTAJAS DEL BIODIESEL DE RICINO	13
2.2.7 ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL BIODIESEL DE RICINO – DIÉSEL FÓSIL	13
2.3 CICLO DIÉSEL	14
2.3.1 PROCESO DE COMBUSTIÓN	16
2.3.2 DESCRIPCIÓN GLOBAL DE COMBUSTIÓN DIÉSEL	17
2.3.3 DESCRIPCIÓN FENOMENOLÓGICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DIÉSEL	18
2.4 GASES DE COMBUSTIÓN	19
3. METODOLOGÍA	20
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA	23
3.1.1 CASO DE ESTUDIO EXPERIMENTAL.	23
3.1.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE REACCIÓN	25
3.1.3 MECANISMO DE REACCIÓN	26
3.1.4 DETERMINACIÓN DE LOS FLUJOS DE COMBUSTIBLE DIÉSEL - BIODIESEL.....	27
3.1.5 DETERMINACIÓN DE LOS FLUJOS DE AIRE DE ALIMENTACIÓN	31
3.2 MODELO TERMODINÁMICO Y MODELO CINÉTICO.....	33
3.2.1 SELECCIÓN DEL MODELO TERMODINÁMICO.....	33

3.2.2	MODELO CINÉTICO.....	36
3.3	MODELACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DEL MOTOR DIÉSEL	37
3.3.1	CONCEPTUALIZACIÓN DE LAS ETAPAS DEL CICLO DIÉSEL EN ASPEN PLUS.....	37
3.3.2	VALIDACIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIÓN.....	48
3.4	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA TERMODINÁMICA A DIFERENTES COMPOSICIONES DE MEZCLA 53	
3.4.1	ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN BIODIESEL/RICINO – DIÉSEL FÓSIL SOBRE EL RENDIMIENTO.....	53
3.4.2	ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE BIODIESEL/RICINO-BIODIESEL/GIRASOL-DIÉSEL	54
3.4.3	MEZCLA BIODIESEL DE RICINO-ACEITE DE RICINO-PENTANOL-DIÉSEL FÓSIL	56
4	. RESULTADOS	61
5	. CONCLUSIONES	73
6	. BIBLIOGRAFÍA	76
	APÉNDICE I	80
	Apéndice I A	80
	Apéndice I B	82
	Apéndice I C	84
	APÉNDICE II	86
	Apéndice II A	86
	Apéndice II B	89
	Apéndice II C	90
	Apéndice II D.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Rendimiento de producción de metil ésteres para diferentes materias primas.....	9
Tabla 2.2. Producción de ricino a nivel nacional en México (SIAP, 2019).....	10
Tabla 2.3 Composición química de diferentes aceites vegetales.....	11
Tabla 2.4. Componentes del biodiesel de ricino y su composición (Pérez, 2013).	12
Tabla 2.5 Propiedades del diésel aceite de castor y biodiesel de castor.	12
Tabla 2.6. Investigaciones por distintos investigadores sobre el comportamiento y rendimiento térmico de mezclas biodiesel de ricino – diésel fósil.	14
Tabla 2.7. Principales productos de la combustión (CONUEE, 2017).	19
Tabla 3.1 Instrumentación del equipo experimental (Arunkumar, 2018).	23
Tabla 3.2 Especificaciones técnicas del motor Kirloskar AV1-NW2+ (Kirloskar).....	26
Tabla 3.3 Valores numéricos para la gráfica de BSFC obtenidos por Arunkumar, (2018)	27
Tabla 3.4 Flujo másico TFC utilizado por Arunkumar, (2018) y Panwar, (2009).	28
Tabla 3.5 Valores numéricos para la gráfica de BSFC obtenidos por Arunkumar, (2018).	29
Tabla 3.6 Valores numéricos para la gráfica de BTE obtenidos por Arunkumar, (2018).	30
Tabla 3.7 Valores numéricos para la gráfica de ExGT obtenidos por Arunkumar, (2018).	30
Tabla 3.8 Parámetros y condiciones climáticas de la Ciudad de Puebla (METEORED, 2020).....	31
Tabla 3.9 Oxígeno estequiométrico para cada especie.	31
Tabla 3.10 Tabla de Aire total y humedad para el caso B20 para régimen de funcionamiento, ver APÉNDICE IA.	32
Tabla 3.11 Factor acéntrico y solubilidad en agua para los componentes de interés (Aspen, 2006) y (NIST, 2020).	34
Tabla 3.12 Tabla de dispositivos implementados en el diagrama de flujo de Aspen Plus.....	38
Tabla 3.13. Propiedades determinadas, valores escalares obtenidos de Aspen.	42
Tabla 3.14. Presión de vapor dependiente de la temperatura valores obtenidos por Aspen Plus.	42
Tabla 3.15 Análisis de sensibilidad generados en la simulación.	43
Tabla 3.16 Datos de la corriente OUTRX generados por la simulación.....	47
Tabla 3.17 Ajuste promedio de los datos de Aspen Plus con respecto a los reportados.	51
Tabla 3.18 Flujo de diésel B0.....	53
Tabla 3.19 variables generadas por el análisis de sensibilidad y el calculador.....	53
Tabla 3.20. Flujos másicos B20 Para biodiesel de ricino- biodiesel de girasol- diésel.	54
Tabla 3.21 Datos de la corriente OUTRX generados por la simulación para biodiesel de ricino y girasol.	55
Tabla 3.22 Flujos másicos B20 Para biodiesel-ricino-Aceite de ricino-Pentanol / diésel –fósil.	57

Tabla 3.23. Propiedades determinadas de valor escalar.	58
Tabla 3.24. Presión de vapor dependiente de la temperatura.	59
Tabla 3.25a Datos de la corriente OUTRX generados por la simulación para Biodiesel/ricino- Aceite/ricino-Pentanol-Diésel en Aspen Plus v8.8.....	60
Tabla 3.25b Datos de la corriente OUTRX generados por la simulación para Biodiesel/ricino- Aceite/ricino-Pentanol-Diésel en Aspen Plus v8.8.....	60
Tabla 4.1 Comparativa del BP en kW para B0, B20, B40.....	71
Tabla 4.2 Comparativa del BP en kW para B60, B80, B100.....	71
Tabla 4.3 Comparativa del BSFC en kg/kWh para B0, B20, B40.....	71
Tabla 4.4 Comparativa del BSFC en kg/kWh para B60, B80, B100.....	72
Tabla 4.5 Comparativa del ExGT en °C para B0, B20, B40.....	72
Tabla 4.6 Comparativa del ExGT en °C para B60, B80, B100.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Proceso general de producción de biodiesel (Raman, 2019).....	9
Figura 2.2. Fases que modelan el comportamiento del motor diésel.	15
Figura 2.3 Diagrama P-V (Cengel, 2011).....	16
Figura 3.1. Esquema general de la metodología.....	22
Figura 3.2 Diagrama de bloques de la configuración experimental desarrollado (Arunkumar, 2018)..	23
Figura 3.3 Dimensiones del motor Kirloskar AV1-NW2+ (Arunkumar, 2018) y área de enfoque.	25
Figura 3.4 Gráfica del BSFC, obtenida a partir de la reproducción de la gráfica original obtenida por Arunkumar (2018), donde se pueden observar los puntos tomados como referencia.....	27
Figura 3.5 Gráfica del BSEC, obtenida a partir de la reproducción de la gráfica original obtenida por Arunkumar (2018), donde se pueden observar los puntos tomados como referencia.....	28
Figura 3.6 Gráfica del BTE, obtenida a partir de la reproducción de la gráfica original obtenida por Arunkumar (2018), donde se pueden observar los puntos tomados como referencia.....	29
Figura 3.7 Gráfica del ExGT, obtenida a partir de la reproducción de la gráfica original obtenida por Arunkumar (2018), donde se pueden observar los puntos tomados como referencia.....	30
Figura 3.8 Árbol de decisiones para el método termodinámico (Carlson, 1996).	35
Figura 3.9 Diagrama del ciclo diésel y diagrama de Aspen Plus, enmarcado en azul proceso de admisión, en rojo combustión/expansión y en verde escape.	38
Figura 3.10 Ricinolato de metilo (NIST, 2020).....	41
Figura 3.11 Eicoseonato de metilo (NIST, 2020).	41
Figura 3.12 Gráfica Flujo de reactivos a la salida del reactor vs Presión en Aspen Plus v8.8	44
Figura 3.13 Gráfica Flujo de aire vs T en Aspen Plus v8.8.	44
Figura 3.14 Gráfica flujo de aire vs flujo de reactivos en la corriente OUTRX Aspen Plus v8.8.	45
Figura 3.15 Gráfica flujo de aire vs flujo de reactivos en la corriente OUTRX con ZOOM a 2.5e-08 en Aspen Plus v8.8	45
Figura 3.16 Gráfica flujo de aire vs DUTY neto del reactor CSTR en Aspen Plus v8.8.....	46
Figura 3.17 Diagrama de flujo del sistema de reacción Biodiesel de ricino-Diésel en Aspen Plus v8.8	47
Figura 3.18. Esquema de la metodología para la obtención de las curvas de BSFC en Aspen Plus.	48
Figura 3.19 Gráfica BTE vs BP por (Arunkumar, 2018).	48
Figura 3.20 Gráfica CO ₂ en la corriente de salida del reactor CSTR vs BP por (Arunkumar, 2018).....	49
Figura 3.21 Gráfica BP_Aspen Plus (eje Y) vs escala de BP por (Arunkumar, 2018) (eje x).	49
Figura 3.22 Gráfica BSFC_Aruncumar/BSFC_Aspen Plus vs BP por	50
Figura 3.23 Gráfica BSEC_Aruncumar/BSEC_Aspen Plus vs BP por (Arunkumar, 2018).....	50
Figura 3.24 Gráfica CO ₂ en la corriente de salida del reactor CSTR vs BP por (Arunkumar, 2018).....	51

Figura 3.25 Gráfica BTE_Aspen Plus vs BTE por (Arunkumar, 2018).	52
Figura 3.26 Gráfica BSFC_Aspen Plus vs BSFC por (Arunkumar, 2018).....	52
Figura 3.27. Diagrama de flujo del sistema de reacción Biodiesel de ricino-Biodiesel de Girasol-Diésel en Aspen Plus v8.8	55
Figura 3.28 Ácido ricinoleico (NIST, 2020).	57
Figura 3.29 Ácido eicoseanoico (NIST, 2020).	58
Figura 3.30 Diagrama de flujo del sistema de reacción Biodiesel/ricino- Aceite/ricino-Pentanol-Diésel en Aspen Plus v8.8	60
Figura 4.1 Gráfica BP vs concentración de mezcla, Aspen Plus.	62
Figura 4.2a Gráfica BSFC a flujo constante de B0 (kg/h) vs concentración de mezcla, Aspen Plus.	63
Figura 4.2b Gráfica BSFC a flujo constante de B0 (kg/h) con mezcla de B100-B0 vs BP generado, Aspen Plus.	63
Figura 4.3 Gráfica EXGT vs Concentración de mezcla, Aspen Plus.	64
Figura 4.4 Gráfica BP_Aspen Plus (eje Y) vs escala de BP por Arunkumar, (2018), (eje x), para biodiesel ricino-girasol-diésel	65
Figura 4.5 Gráfica BSFC_Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).....	66
Figura 4.6 Gráfica BSFC_Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).....	66
Figura 4.7 Gráfica CO ₂ _Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).....	67
Figura 4.8 Gráfica BP_Aspen Plus (eje Y) vs escala de BP por Arunkumar, (2018), (eje x), para biodiesel ricino-Aceite de ricino – Pentano –diésel	68
Figura 4.9 Gráfica BSFC_Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).....	68
Figura 4.10 Gráfica BSFC_Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).....	69
Figura 4.11 Gráfica CO ₂ _Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).	69
Figura 4.12 Gráfica del BSFC para los casos Biodiesel de ricino, Biodiesel de Girasol y La mezcla Biodiesel de ricino con Aceite de ricino y Pentanol.	70

1. INTRODUCCIÓN

Debido al amplio y continuo aumento de la demanda energética a nivel mundial y a la disminución sustancial de las reservas de petróleo y regulaciones ambientales cada vez más estrictas (Parag Saxena, 2013), se ha generado un gran interés en la búsqueda y desarrollo de recursos energéticos alternativos que puedan suplir los recursos fósiles actuales, los cuales deben ser renovables, sostenibles, de fácil acceso, amigables con el medio ambiente y además técnica y económicamente viables para un reemplazo fácil y adecuado, aprovechando de esa manera la infraestructura y tecnología ya existentes.

Actualmente la mayor parte del consumo energético está ligado a la combustión del carbón, gas natural, petróleo y sus derivados, siendo estos últimos los más demandados, ya que entre los combustibles más importantes empleados para la generación de calor o trabajo, se encuentra el diésel, que según el informe anual de British Petroleum (Statistical Review of World Energy 2016), el consumo mundial de diésel ha aumentado de 3.93 mil millones de toneladas en 2005 a 4.33 mil millones de toneladas en 2015 (Das, 2017). Razón por la cual el desarrollo de tecnología relacionada con motores diésel en los últimos años ha ganado mayor interés, debido a que los motores diésel de inyección directa son motores primarios favorables para una amplia gama de aplicaciones, como lo son en los sectores industrial, de transporte, construcción, y en la generación de energía en general, debido a su buen rendimiento térmico. Sin embargo las emisiones de contaminantes de este combustible tales como óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, bióxido de carbono y partículas de hollín entre otros, representan un gran problema para el medio ambiente; es por ello que la necesidad de encontrar combustibles alternativos es de suma importancia, no solo por la reserva limitada del combustible fósil, sino que además para mitigar o reducir al máximo los contaminantes generados por la combustión.

Entre las diversas opciones de biocombustibles disponibles, el biodiesel a base de ricino constituye una fuente energética renovable y prometedora para ser utilizado a gran escala como combustible para motores diésel convencionales, y así sustituir en gran medida el combustible diésel, ya que además de su alto poder calorífico 38 MJ/kg (Sadegh Azizzadeh Hajlari, 2019), cercano al del diésel fósil, el biodiesel de ricino tiene cualidades que le otorgan ciertas ventajas con respecto al diésel fósil, de las cuales podemos destacar: (1) Mayor eficiencia de combustión, (2) Reducción de contaminantes como óxidos de azufre y bióxido de carbono, (3) Su producción a nivel industrial no representa una fuente que genere sustancias nocivas para el medio ambiente y (4) Menor costo de producción en comparación con otras fuentes de biodiesel, además su implementación no requiere de modificaciones en los motores ya existentes o al menos no una modificación sustancial (Tamilselvan, 2017).

Por otro lado el ricino es una planta de carácter no comestible e inclusive venenoso para el consumo humano y animal, además puede proliferar en climas áridos y semiáridos con baja precipitación pluvial y en áreas pobres en nutrientes, con lo cual su producción no tendría repercusiones en el equilibrio alimenticio y agrícola. Así mismo la búsqueda de alternativas energéticas, además de cuidar aspectos tales como la viabilidad técnica, económica y ambiental, debe cuidar el no comprometer el equilibrio de otras áreas o biosferas.

Actualmente una de las principales líneas de investigación está dirigida al estudio del comportamiento y rendimiento del biodiesel de ricino y sus mezclas en motores diésel, en donde la

investigación empírica ha sido la base de estos estudios cuyo principal objetivo es la determinación experimental del rendimiento de motores diésel convencionales alimentados con diésel, biodiesel y sus mezclas.

Es por ello que el análisis del rendimiento y el comportamiento termodinámico que se presenta durante la combustión del biodiesel de ricino ayudará a determinar las características de las mezclas óptimas para un mejor rendimiento térmico en los motores y reducir así el uso paulatino del diésel fósil, además el uso a gran escala permitirá un equilibrio entre la agricultura, el desarrollo económico y el medio ambiente (Zareh, 2017).

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con la revisión de la literatura se ha encontrado que existe un amplio número de investigaciones dedicadas al diseño y desarrollo de procesos de producción de biodiesel de diferentes aceites vegetales, sin embargo algo contradictorio a esto, es que existe un número muy limitado de investigaciones enfocadas en analizar el rendimiento energético del biodiesel en motores de combustión interna, y en cuanto a investigaciones específicamente del biodiesel de ricino, las investigaciones son aún más escasas, además las pocas investigaciones que se han realizado son, en su mayoría de forma experimental, sin embargo, los experimentos requieren un enorme esfuerzo, tiempo y dinero. Debido a esto, es evidente la necesidad de realizar investigaciones enfocadas en analizar el rendimiento térmico de sistemas Biodiesel-Diésel desde un punto de vista no experimental, es decir a través de la implementación de herramientas como los simuladores que permitan estudiar las propiedades, características y comportamientos del proceso de combustión interna desde un punto de vista termodinámico.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El uso del simulador Aspen Plus representa una gran alternativa ya que, a diferencia del análisis experimental, con el simulador se facilita en gran medida el análisis termodinámico del proceso de combustión interna a diferentes condiciones de operación, reduciendo en gran medida el tiempo, dinero y esfuerzo para llevar a cabo dichos análisis, por lo que el estudio de las condiciones de operación que optimicen el rendimiento energético en los sistemas de combustión interna contribuirá en el desarrollo y optimización de tecnología para el uso de biodiesel de ricino en la generación de energía. Al respecto, el desarrollo de modelos de simulación así como la implementación y la validación de la viabilidad técnica del simulador generará información valiosa para el entendimiento de la fenomenología del proceso en la búsqueda del desarrollo tecnológico que permitirá finalmente la implementación de mezclas biodiesel – diésel.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo en ASPEN PLUS del proceso de combustión interna con mezclas biodiesel de ricino – diésel fósil como combustible para el análisis termodinámico basado en simulación.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Caracterización del sistema.
- 2) Selección del modelo termodinámico y modelo cinético.
- 3) Realizar la modelación y validación del proceso de combustión.
- 4) Evaluar la eficiencia termodinámica a diferentes composiciones de mezcla biodiesel-diésel y relación aire-combustible a través del modelo de simulación.

1.4 HIPÓTESIS

La eficiencia termodinámica de un motor diésel, alimentado con mezclas de biodiesel de ricino y diésel fósil, se puede predecir mediante la simulación del ciclo Diésel incorporando el modelo de combustión basado en la termodinámica del proceso.

2. ANTECEDENTES

2.1 DIÉSEL FÓSIL

El crecimiento en la demanda de energéticos en México como el diésel fósil es notoria, ya que en 2016 alcanzó los 385 mdb en los diferentes sectores, 87 % en transporte, 7 % en industrial, 5% en petrolero y 1 % en eléctrico. Además se estima que la demanda de diésel en general aumentará en un 3.5 % cada año según la secretaria de energía, lo cual implicaría un aumento anual de 12.11 mdb (CONUEE, 2017). Esto proyecta un aumento constante y por ende el aumento de emisiones contaminantes, lo cual evidencia la importancia de implementar otras alternativas como lo del biodiésel para coadyuvar con la demanda energética.

El diésel, también conocido como gasóleo o gasoil, es un hidrocarburo compuesto de 35% de aromáticos y un 65 % de hidrocarburos saturados (principalmente parafinas) y azufre en diferentes proporciones dependiendo de la aplicación, por ejemplo 15 mg/kg para uso automotriz, que se obtiene principalmente de la destilación del petróleo a una temperatura de entre los 200 °C a los 380°C (PEMEX, 2015).

Para el caso del diésel fósil se consideró como molécula representativa el n-hexadecano, dado que se encuentra en mayor proporción en el diésel y además por poseer un PCI similar al del diésel fósil reportado por PEMEX, además Cedeño-Caero (2005) y Pérez Armando (2013) realizaron investigaciones sobre la combustión diésel tomando esta molécula como representativa del diésel, obteniendo excelentes resultados.

2.2 BIODIESEL

En base a la literatura desarrollada por Tamilselvan (2017), Arunkumar (2018), Panwar (2009), Zareh (2017) y Paula Berman (2011), se encontró que los investigadores han analizado una gran variedad de combustibles alternativos, entre los cuales se encuentra el biodiésel obtenido a partir de aceites vegetales transesterificados, estos representan una alternativa viable para suplir al diésel a base de petróleo. Además debido a su producción a base de aceites vegetales es considerado como una alternativa renovable, biodegradable y no abrasivo para los motores diésel existentes. Sin embargo muchas de las materias primas que se han analizado para la producción de biodiésel son de carácter comestible e inclusive son alimentos básicos en la dieta humana y animal, tales como el girasol, la soja, la colza, el maíz, el algodón, la palma entre otros; lo cual lejos de ayudar a la demanda energética podría representar un problema muy grave, debido a que podría afectar gravemente al equilibrio alimenticio, considerando que además de producir escases de alimento implicaría un impacto significativo en la alza de los precios de productos comestibles que tienen como materia prima estos granos y semillas (Sadegh Azizzadeh Hajlari, 2019).

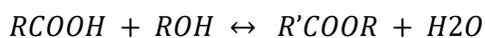
El biodiésel es un compuesto orgánico de ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga y corta que se obtiene a partir de aceites, ya sean animales o vegetales, y se utiliza como sustituto total o parcial mezclado con diésel fósil para su implementación en motores diésel de combustión

interna. Debido a sus propiedades similares con las del diésel fósil es posible mezclarlo en diferentes proporciones, para lo cual se utiliza generalmente una notación abreviada de una letra B, que hace referencia al biodiésel y de un número del 0-100, el cual está en función del porcentaje en volumen del biodiésel en la mezcla, B0 – B100 (Panwar, 2009). Denotando así con B0 la ausencia de biodiésel, es decir diésel fósil puro y, biodiésel puro para el caso de B100. Además el biodiésel tiene propiedades que mejoran el proceso de combustión como: mejor índice de lubricidad, un mayor número de cetano, ausencia de azufre en su composición, la cual se ve reflejado en una combustión más limpia, es decir, sin generación de óxidos de azufre entre otros contaminantes.

Aunque parece que el uso de aceites vegetales implementados en los motores diésel es una innovación reciente no es así, ya que el mismo Rudolf Diésel (1858-1913), creador de los motores de ciclo diésel, cuyo ciclo lleva su nombre en su honor, utilizó aceite vegetal de cacahuate para demostrar su invención en París en 1900; y en 1912 dijo *“El uso de aceites vegetales como combustible de motor puede parecer despreciable hoy en día. Sin embargo, tales aceites pueden llegar a ser, en el transcurso de los años, tan importantes como el petróleo y el alquitrán de hulla en la actualidad”* Rudolf Diésel (Panwar, 2009).

2.2.1 TRANSESTERIFICACIÓN

Existen distintos métodos para la producción de biodiésel tales como el uso directo en mezclas, micro emulsificación, pirolisis y transesterificación, siendo esta última la más viable y ampliamente utilizada, ya que con esta última se disminuye la viscosidad del aceite vegetal y con ello se evitan problemas de flujo a través de los inyectores del motor. En general la transesterificación consiste en la reacción de triglicéridos y alcohol con un catalizador, el cual puede ser ácido o básico; este proceso se lleva a cabo en condiciones normales, es decir a 1 atm de presión y a una temperatura entre 25 – 70 °C dependiendo el tipo de ácidos grasos que se utilicen como materia prima, obteniendo como productos finales: glicerol, éster y agua; durante esta reacción el ácido graso se transforma en biodiésel (metil éster) y en glicerol como subproducto. La reacción general de la transesterificación está representada por la ecuación general (Panwar, 2009).



Para el caso particular de la producción de biodiésel de aceite de ricino se produce a través de la transesterificación alcalina, la cual convierte los ácidos grasos del aceite de ricino en ésteres metílicos, en este proceso se utiliza un 1% de hidróxido de potasio como catalizador y un 30% de metanol (Tamilselvan, 2017). El proceso general de transesterificación se muestra en la figura 2.1 (Raman, 2019).

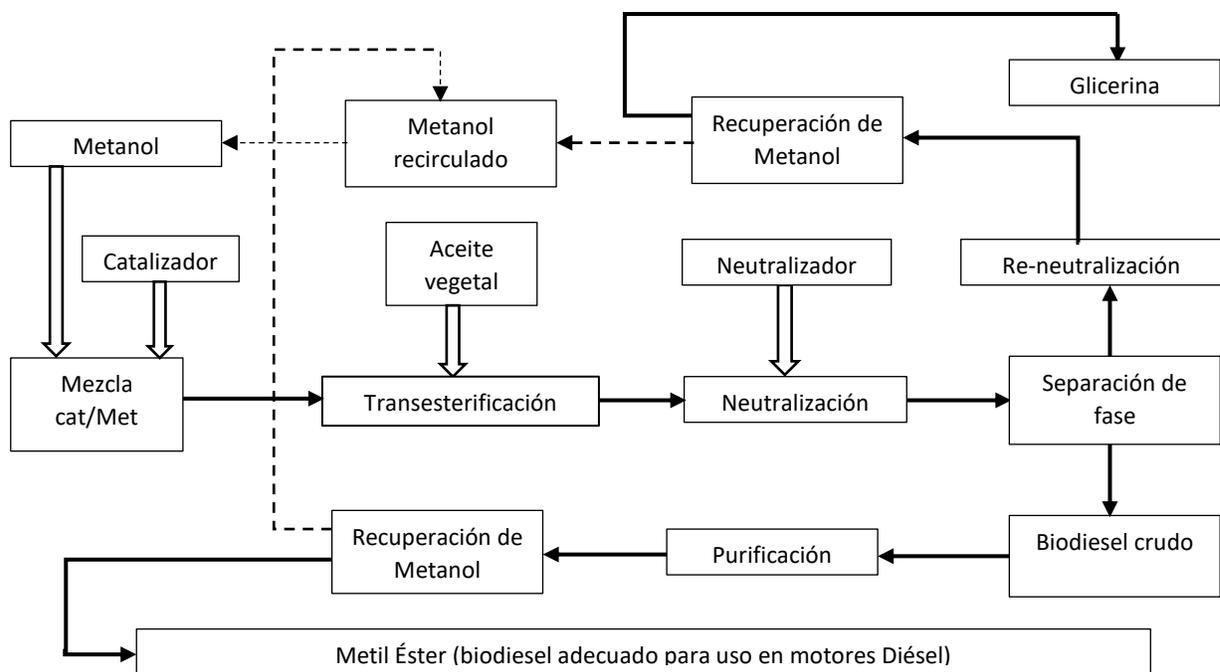


Figura 2.1 Proceso general de producción de biodiesel (Raman, 2019).

En la tabla 2.1 se muestran los procesos de transesterificación para el aceite de ricino y algunos aceites vegetales, así como los rendimientos que se obtiene en función del contenido de ácidos grasos. También se muestra el rendimiento por tonelada producida en México en 2018 (SIAP, 2019). Así mismo se puede observar una ventaja técnica en cuanto al proceso de transesterificación del ricino particularmente en el rendimiento y duración de la reacción, así como la temperatura de operación.

Tabla 2.1 Rendimiento de producción de metil ésteres para diferentes materias primas.

Aceite	Alcohol	Catalizador	Taza alcohol/catalizador	T Reacción (°C)	Tiempo reacción (h)	Rendimiento (%)	Rendimiento ^a (m ³ /t)	Fuente
ricino	Metanol	KOH	30 % peso	60	0.5	94	0.380	(Paula Berman, 2011)
palma	Metanol	NaOH	6:1	65	3	87	0.261	(El-Araby, 2017)
soja	Metanol	KOH	9:1	60	1	93.2	0.196	(Santos, 2010)
girasol	Metanol	NaOH	6:1	60	2	97.1	0.478	(Tamilselvan, 2017)
cocina usado	Metanol	KOH	6:1	60	0.5	----	----	(Tamilselvan, 2017)
Mahua	Etanol	H ₂ SO ₄	20:1	75	5	----	----	(Tamilselvan, 2017)
algodón	Metanol	Lipasa	15:1	37	4	80	----	(Santos, 2010)

(a) Rendimiento de aceite de cultivos oleaginosos en México (SAGARPA).

2.2.2 PLANTA HIGUERILLA O RICINO

La planta de higuera o ricino, cuyo nombre científico es *Ricinus communis*, pertenece a la familia de las Euphorbiaceae. También conocido comúnmente con el nombre de "aceite de castor", cuyo nombre deriva de su uso como un repuesto para el "castoreum", una secreción de las glándulas perineo y de orina del castor olorosa y oleosa, que este animal usa para acicalar su pelaje, este aceite de castor, al igual que el aceite de ricino, tiene la propiedad de curar heridas y dolencias (Panwar, 2009). Aunque su origen no se sabe con exactitud, se especula que es originaria de la cuenca mediterránea del sureste de India y África, y está muy extendida en todas las regiones tropicales del mundo (Tamilselvan, 2017). Además la planta de ricino tiene una resistencia al estrés hídrico, atributos que le permiten proliferar en tierras marginales con climas áridos y semiáridos de varios países, lo cual la hace accesible; por otro lado, debido a que se puede cosechar en tierras marginales y pobres en nutrientes, su producción no representa una afectación por el uso de suelos dedicados a la producción de cultivos con fin alimenticio, ni a la deforestación de biosferas (Tamilselvan, 2017).

Como se mencionó, el aceite de ricino es una opción tanto técnica como económicamente viable, para la producción de biodiesel, ya que el biodiesel de ricino es perfectamente miscible con el biodiesel fósil, e inclusive forma mezclas estables, tiene bajos costos de producción y de implementación, ya que el aceite extraído del ricino tiene un rendimiento aproximado del 40-60% y contiene aproximadamente entre el 85-90% de ácido ricinoleico (ácido 12-hidroxi-9-cis-octadecenoico). Además de la producción de biodiesel, el aceite de ricino tiene una gran variedad de aplicaciones en el sector industrial (Bueno, 2017). En todo el mundo se cultivan 12600 km² con una producción anual de 1140 Gt y un rendimiento promedio de 902 kg/hectárea. Siendo los principales productores a nivel mundial India y Brasil (Paula Berman, 2011).

Aunque la producción e investigación a nivel mundial es considerable e incluso existe una organización dedicada a la investigación, desarrollo e implementación de esta planta, en México su investigación y desarrollo es muy escaso, ya que solo se reporta un programa por parte de SAGARPA orientado a la producción de ricino, que de acuerdo con cifras del SIAP (organismo de SAGARPA) la producción de higuera en 2018 en México fue de apenas 281.64 toneladas en distintos estados del país, como se observa en la tabla 2.2 (SIAP, 2019). En las modalidades de ciclos perennes de riego y temporal. Esta escasez de investigaciones representan una gran área de oportunidad en el desarrollo tanto de producción como en su implementación a nivel nacional (SAGARPA, 2016).

Tabla 2.2. Producción de ricino a nivel nacional en México (SIAP, 2019).

Entidad federativa	Superficie			Producción (Toneladas)	Rendimiento (udm/ha)	PMR (\$/udm)	Valor producción
	sembrada	Cosechada	Siniestrada				
Baja California	35.00	53.00	00.00	80.34	1.52	7500.00	602 550
Nayarit	20.00	20.00	00.00	93.60	4.68	10000.0	936 000
Sonora	248.50	28.50	00.00	107.70	3.78	5237.35	564060
	321.5	101.5	00.00	281.64	2.77	2102.61	2,10260

2.2.3 BIODIESEL DE RICINO

En general el biodiesel producido a partir de aceites vegetales varía en cuanto a contenido y proporción de los diferentes ácidos grasos saturados e insaturados presentes en el aceite del cual se produce el biodiesel, inclusive de la presencia de ácidos grasos exclusivos de algunas plantas, como es el caso del ácido ricinoleico, exclusivo de la planta de ricino. Ver Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Composición química de diferentes aceites vegetales.

Ácido graso	Estructura	Formula	Aceite de Ricino (%)	Aceite de girasol (%)	Aceite de cocina usado (%)	Aceite de palma (%)	Aceite de soja (%)	Aceite de colza (%)
Fuente			(Paula Berman, 2011)	(Sánchez-Borroto, 2012)	(Zareh, 2017)	(El-Araby, 2017)	(Santos, 2010)	(Raman, 2019)
Palmítico	16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	1.01	5.7	13.62	38.88	10.58	4.6
Esteárico	18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	1.10	4.1	5.72	4.07	4.76	3.2
Oleico	18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	3.3	20.5	43.36	42.4	22.52	60.7
Linoleico	18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	4.61	67.3	36.63	----	52.34	20.5
Linolénico	18:3	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	0.48	0.6	----	----	8.19	9.3
Araquídico	20:0	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	----	----	----	----	0.36	0.6
Eicosanoico	20:1	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	0.34	----	----	----	----	----
Ricinoleico	18:1-OH	C ₁₈ H ₃₄ O ₃	89.1	----	----	----	----	----
Mirístico	14:0	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	----	----	1.01	1.01	----	----
Caprílico	8:0	C ₈ H ₁₆ O ₂	----	----	----	----	----	----
Capríco	10:0	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	----	----	----	----	----	----
Láurico	12:0	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	----	----	----	0.190	----	----
OTROS	----	----	----	1.8	----	----	0.67	1.1

Como se puede observar en la tabla 2.3 para el caso del biodiesel producido a partir del aceite de ricino contiene siete tipos de ácidos grasos, (1) ácido ricinoleico (exclusivo del aceite de ricino), (2) ácido linoleico, (3) ácido linolénico, (4) ácido oleico, (5) ácido esteárico, (6) ácido palmítico y (7) ácido eicosanoico, en diferentes proporciones. También se puede observar que el ácido ricinoleico se encuentra en mayor proporción con un 89.1 % y además es un ácido graso hidróxilado insaturado, atributo que favorece la combustión del biodiesel, presentándose así una combustión completa (Bueno, 2017). Debido a la alta concentración del ricinolato de metilo es de esperarse que el biodiesel producido a partir del aceite de ricino tenga propiedades específicas y particulares similares a las del ácido ricinoleico transesterificado (ricinolato de metilo), como lo son viscosidad, número de cetano y gravedad específica, lo cual lo hace único en comparación con el biodiesel de otros aceites vegetales (Sadegh Azzadeh Hajlari, 2019).

2.2.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BIODIESEL DE RICINO Y DEL DIÉSEL FÓSIL

En la Tabla 2.4 se muestra la composición del biodiesel de ricino y biodiesel de girasol, resultantes de la transesterificación, así como el poder calorífico inferior (PCI) de cada éster metílico.

Tabla 2.4. Componentes del biodiesel de ricino y su composición (Pérez, 2013).

Éster metílico	Estructura	Formula	PM (kg/kmol)	PCI (MJ/kg)	Ricino (Pérez, 2013)	Girasol (Sánchez- Borroto, 2012)
Ricinolato de metilo	19:1-OH	C ₁₉ H ₃₆ O ₃	312.5	38.16	88.81	----
Oleato de metilo	19:1	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	296.5	37.43	3.860	24.3
Linoleato de metilo	19:2	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	294.5	40.13	4.286	65.6
Estearato de metilo	19:0	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	298.5	42.82	1.086	4.1
Palmitato de metilo	17:0	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	290.5	39.12	1.086	5.5
Eicoseonato de metilo	21:1	C ₂₁ H ₄₀ O ₂	324.5	40.84	0.436	----
Linelonato de metilo	19:3	C ₁₉ H ₃₂ O ₂	292.5	37.51	0.436	0.6
Diésel fósil ^a	16:0	C ₁₆ H ₃₄	226.4	42.57	----	----

a) Se tomo como molecula representativa del diesel fosil mexicano el N-exadecano (Cedeño-Caero, 2005)

2.2.5 PROPIEDADES DEL BIODIESEL DE RICINO, ACEITE DE RICINO Y DIÉSEL FÓSIL

Las propiedades fisicoquímicas del diésel y biodiesel se presentan en la Tabla 2.5, así como las propiedades del aceite de ricino en la cual se puede ver la disminución drástica de la viscosidad del aceite de ricino con el proceso de transesterificación.

Tabla 2.5 Propiedades del diésel aceite de castor y biodiesel de castor.

Propiedades	Aceite de castor	Biodiesel de castor	Diésel	B80	B60	B40	B20
Poder Calorífico (MJ/kg)	-----	34.450	44.250	35.9	38	39.05	41.4
Viscosidad dinámica (cp)	-----	12.59	2.21	-----	-----	-----	-----
Viscosidad cinemática (cst)	239.39	13.75	3.2	8.02	5.97	3.08	2.73
Azufre (%)	0.0	0.0001	0.0015				
Densidad (kg/cm ³ 25°C)	0.9537	0.9279	0.79	0.876	0.864	0.847	0.650
Punto flash (°C)	310	168	56	102	94	79	73
Fuente	(Conceicao, 2007)	(Pérez Ármando, 2013) (Arunkumar, 2018)	(Raman, 2019) (Pérez Ármando, 2013)	(Arunkumar, 2018)	(Arunkumar, 2018)	(Arunkumar, 2018)	(Arunkumar, 2018)

2.2.6 VENTAJAS DEL BIODIESEL DE RICINO

Entre las ventajas de la implementación del biodiesel de ricino se encuentran: (1) Tiene mejor calidad de ignición debido a su mayor contenido de O₂ en su composición, (2) Ausencia de contenido de azufres ni aromáticos (no genera SO_x), (3) Por su carácter de producción agrícola constante se considera renovable y biodegradable, (4) Entre 30-70% menores emisiones de efecto invernadero, (5) Debido a sus propiedades y característica similares con el diésel fósil es posible una implementación directa en motores convencionales, (6) Alta miscibilidad con el diésel fósil sin la necesidad de aditivos, (7) Excelente lubricidad, lo cual ayuda a reducir el desgaste y por ende aumenta la vida útil de los motores, (8) Almacenamiento seguro y de fácil transportar (Tamilselvan, 2017).

2.2.7 ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL BIODIESEL DE RICINO – DIÉSEL FÓSIL

Como se mencionó anteriormente, la cantidad de investigación enfocada al estudio de la combustión del biodiesel es escasa e inclusive inexistente en comparación con la información disponible para la producción de biodiesel y aún más en el caso específico del biodiesel de ricino; además los pocos estudios de combustión que se han encontrado son, en su mayoría desarrollados en motores diésel de forma práctica, lo cual representa un alto costo de investigación, tiempo y además la necesidad de laboratorios con equipos especializados para un análisis exhaustivo y aceptable. Debido a esto es evidente la gran área de oportunidad que existe en cuanto al uso de simuladores para predecir el comportamiento y emisiones que surgen por el fenómeno de combustión. En la tabla 2.6 se muestra un resumen de investigaciones que anteceden en el estudio de estos fenómenos bajo algunas variables de operación como; (1) rpm, (2) presión, (3) Temperatura en la cámara de combustión y (4) mezclas de combustible biodiesel de ricino- diésel fósil; asimismo se presentan los resultados obtenidos por cada investigador bajo las condiciones óptimas para cada uno de sus procesos.

Tabla 2.6. Investigaciones por distintos investigadores sobre el comportamiento y rendimiento térmico de mezclas biodiesel de ricino – diésel fósil.

Investigador	(Panwar, 2009)	(Das, 2017)	(Bueno, 2017)	(Pérez Armando, 2013)
Biodiesel	Castor seed oil metil éster	Castor oil	Castor oil and soybean	Aceite de castor
Tipo de motor	1-cilindro, 4tiempos	1-cilindro, 4 tiempos motor diésel	6-cilindros, 4 tiempos motor diésel	3-cilindros, 4-tiempos motor diésel
Condiciones de trabajo	Alimentación variable, velocidad constante 1500 rpm	Alimentación variable, velocidad 1500-1800 rpm	Variable alimentación Velocidad 1800-2500 rpm	16.5 Hp
Efecto en el rendimiento	B10 un menor consumo de combustible específico, Una mayor eficiencia térmica	Menor emisión de Hc Ligeramente aumento en la emisión de NO _x Consumo de combustible específico similar al diésel puro	Rendimiento óptimo con mezclas B10-B20	Rendimiento B05, B10, B20 representan una disminución % del PCI 2.57, 1.27, 0.54 respectivamente.
Tipo de combustión	Compresión	Compresión	Compresión	Compresión
Emisiones	Aumento en la emisión de NO _x	Emisiones similares al diésel puro	Incremento en emisiones de NO _x Emisiones de CO, CO ₂ iguales	Disminución de emisiones CO ₂

2.3 CICLO DIÉSEL

El ciclo diésel de combustión interna funciona bajo los principios básicos de cualquier motor a cuatro tiempos, sin embargo a diferencia de lo que ocurre en un motor a gasolina, la ignición del combustible no se produce a través de una chispa al interior de la cámara de combustión; en su lugar, el aire es comprimido por el pistón, elevando la temperatura del aire hasta una temperatura superior a la de auto ignición del diésel, momento en el cual el combustible es inyectado a alta presión mezclándose con el aire caliente y a alta presión provocando así la autoignición del combustible, de esta manera se aprovechan las propiedades termodinámicas del combustible diésel sin la necesidad de una chispa (Goering, 2003).

Este ciclo se denomina de 4 tiempos debido a las cuatro fases que se requieren para llevar a cabo el ciclo de combustión, 1) admisión 2) compresión 3) combustión- expansión 4) escape (Goering, 2003). puesto que en el ciclo diésel solo se comprime aire, la relación de compresión puede ser mucho más alta en comparación con el de gasolina, la cual tiene un límite de compresión ya que la autoignición de la mezcla gasolina- aire es indeseable, debido a que la combustión deja de comportarse como un gas en expansión y se comporta como una detonación, provocando daños estructurales en los equipos, por lo cual los motores que funcionan bajo el régimen del ciclo diésel tienen una mayor entrega de torque, dado que la combustión del diésel se comporta como un gas en expansión aun con presiones mayores a la de auto ignición del biodiesel. El proceso básico del motor diésel se muestra en la Figura 2.2.

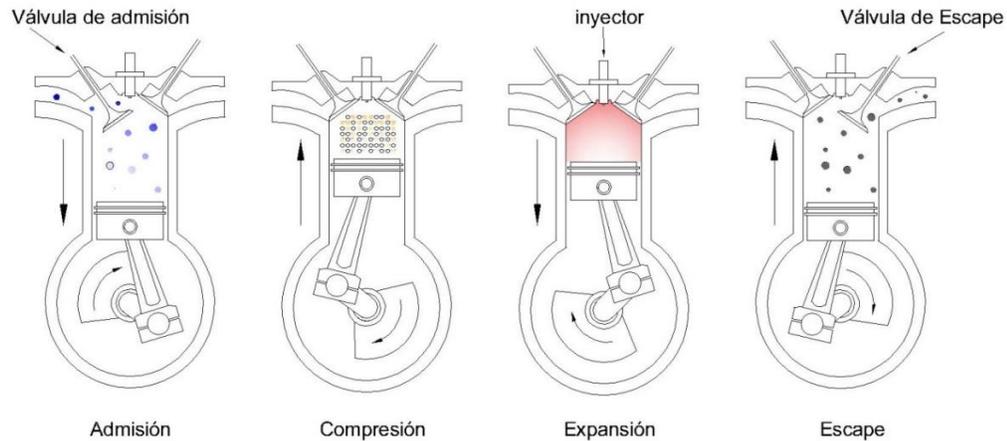


Figura 2.2. Fases que modelan el comportamiento del motor diésel.

Las cuatro fases que modelan el comportamiento del motor diésel desde un punto de vista termodinámico se describen a continuación.

Admisión.

El proceso comienza con la apertura de la válvula de admisión permitiendo el ingreso del aire debido a la succión generada por el descenso del pistón hasta llegar al punto muerto inferior y la válvula de admisión se cierra. En el diagrama P vs V (Figura 2.3) se modela como una expansión a presión constante variando solo el volumen, siendo así un proceso isobárico lo cual está representado por la línea recta A-B.

Compresión.

En esta fase el pistón se eleva desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior comprimiendo el aire y aumentando su temperatura en un proceso adiabático. En el diagrama P vs V (Figura 2.3) se modela como una compresión adiabática y está representada por la curva B-C, disminuyendo el volumen y aumentando la presión.

Combustión- expansión.

En esta fase se inyecta el diésel a alta presión por medio de una bomba provocando la combustión de la mezcla y por ende la expansión del gas, obligando al pistón a descender hasta el punto muerto inferior. En el diagrama P vs V (Figura 2.3) la ignición está representada por la línea C-D con un ligero aumento en el volumen debido a la inyección del combustible a T constante es decir en un proceso isotérmico. En tanto que la expansión está representada por la curva D-E, reduciendo la presión y aumentando el volumen.

Escape.

En esta última fase se abre la válvula de escape liberando la presión en la cámara del pistón seguido de la expulsión de los gases de combustión debido a la elevación del pistón hasta el punto muerto superior terminando así el ciclo de combustión y listo para comenzar un ciclo nuevo. En el diagrama P vs V (Figura 2.3) la liberación de presión está representado por E-B a volumen constante, es decir a en un proceso isocórico. En tanto que el proceso de expulsión de gases está representado por la línea B-A cerrando el ciclo, reduciendo el volumen a presión constante es decir en un proceso isobárico. El proceso termodinámico de la combustión también puede ser representado en un diagrama T-S.

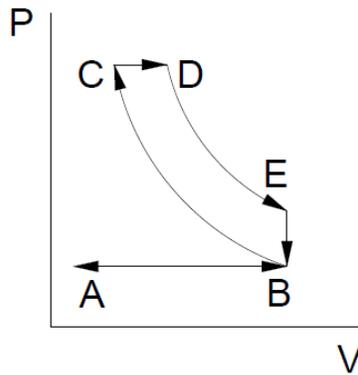


Figura 2.3 Diagrama P-V (Cengel, 2011)

2.3.1 PROCESO DE COMBUSTIÓN

“Un proceso de combustión es una reacción química de oxidación muy rápida acompañada de un flujo de calor exotérmico grande y de un flujo de sustancias que desaparecen “reactivos” y de sustancias que aparecen “productos” (Naranjo, 2011) . En general siempre se asocia la existencia de llama con un proceso de combustión. La llama es una superficie muy delgada en la que tiene lugar las reacciones químicas. Estos procesos se clasifican en combustión con llamas de remezcla y en combustión con llamas de difusión (LLUECA, 2015). En las llamas de remezcla los reactivos se encuentran mezclados de forma estequiometría antes de la combustión. En las llamas por difusión los reactivos se encuentran separados siendo la llama el lugar donde se lleva a cabo la mezcla y la reacción de combustión, como en el caso de la combustión del diésel. En ambos lados de la llama existe un gradiente másico de cada uno de los reactivos y de los productos produciéndose un flujo másico por difusión, de ahí el nombre de llama por difusión. Ambos procesos pueden ser laminares o turbulentos (Naranjo, 2011).

2.3.2 DESCRIPCIÓN GLOBAL DE COMBUSTIÓN DIÉSEL

Como se mencionó anteriormente el tipo de combustión que se presenta en el ciclo diésel es la combustión por difusión, siendo el análisis de esta última, el objetivo del presente proyecto; la combustión por difusión se presenta mayoritariamente en los motores de encendido por compresión, en el cual al ingresar el combustible atomizado por la alta presión a la que se inyecta de aproximadamente unos 150 bares, se encuentra con aire caliente entre los 600 – 800 °C, provocando un fenómeno de evaporación y generando una mezcla más homogénea. A diferencia de un motor encendido por chispa, en el que la combustión inicia por un agente externo y centralizado, en este caso la bujía, en el motor diésel encendido por compresión la ignición del combustible tiene la aparición de varios frentes de llama difusiva simultáneamente por toda la cámara de combustión (LLUECA, 2015).

Una vez el combustible ha sido inyectado a muy alta presión por el inyector en la cámara de combustión ocurren las siguientes etapas:

Fase 1: Tiempo de retraso. Es la fase entre el inicio de la inyección y previa a la combustión, durante la cual se presentan los fenómenos de atomización y evaporación, y culminando con el englobamiento de las moléculas de combustible por el aire caliente de la cámara de combustión. En este punto debido a la presencia de oxígeno y a la alta temperatura del entorno, la mezcla formada comienza a ser inestable dando lugar a la combustión premezclada (Collado, 2007).

Fase 2: Combustión premezclada: Esta fase es de carácter altamente no estacionaria y ocurre casi de forma instantánea, durante esta etapa se lleva a cabo la homogenización de la mezcla, dando lugar a la combustión por difusión (LLUECA, 2015).

Fase 3: Combustión por difusión. Generalmente se asume la hipótesis de que la combustión durante esta fase tiene lugar en condiciones homogéneas y estequiometrias o al menos bastante próximas a ellas, durante esta fase la combustión alcanza un estado estacionario. Esta es la fase de mayor importancia para nuestro objetivo, en la que además generalmente se centran las investigaciones en motores bajo este régimen (Collado, 2007).

Fase 4: Combustión por difusión tardía. Finalmente en esta etapa la combustión adopta un carácter aleatorio y va perdiendo intensidad hasta que culmina, normalmente durante el descenso del pistón hacia el punto muerto inferior (Collado, 2007).

2.3.3 DESCRIPCIÓN FENOMENOLÓGICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DIÉSEL

Hasta este punto como ya es sabido, la mayor parte de calor se libera durante la fase de combustión por difusión, que para fines prácticos en este proyecto se analizará el proceso como etapas simultáneas ya que se llevan a cabo prácticamente de forma instantánea.

Conceptualmente el primer fenómeno que se presenta es la atomización, donde el combustible es inyectado de forma líquida, generalmente a 25°C, disgregándose en gotas de tamaño diminuto y cada vez más pequeñas al alejarse del inyector, formando una especie de niebla; al respecto cuanto menor sea el diámetro de las gotas mejor será el fenómeno que le precede, la evaporización, ya que mientras más pequeñas sean las gotas de la atomización, el calor del aire circundante se transfiere más eficientemente, debido a la relación superficie/volumen, en este punto las diminutas gotas al encontrarse en un entorno de aire a alta presión y alta temperatura, la cual está por encima de la temperatura de burbuja de la mezcla, comienzan a evaporarse a través de un fenómeno de difusión térmica y másica entre la gota y el gas circundante (Goering, 2003).

Una vez la mezcla al interior de la cámara de combustión está formada por aire caliente y combustible evaporado, esta alcanza la homogeneidad y por ende la condición estequiométrica, además en este punto se encuentra en los límites de inflamabilidad, por lo cual dicha mezcla reacciona en un proceso de combustión débilmente exotérico localizado en distintos puntos de la cámara de combustión de forma aleatoria, durante este proceso se libera entre un 10 a 15 % de la energía del combustible (Collado, 2007).

Finalmente el proceso de combustión exotérico ocurre en el frente de llama, donde se libera el resto del contenido energético del combustible, es decir entre el 85 a 90 % por medio de un proceso de convección y difusión de llama, generando así los productos de la reacción para ser expulsados finalmente de la cámara de combustión (Collado, 2007).

VARIABLES EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN

- Temperatura
- Presión
- Tiempo de residencia
- Tiempo de auto ignición
- Tiempo de retardo de la ignición

FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO

- Velocidad de propagación de la llama
- Composición de la mezcla combustible-comburente
- Catalizadores

2.4 GASES DE COMBUSTIÓN

Durante el proceso de combustión se generan grandes cantidades de energía además de la formación y emisión de productos que pueden ser contaminantes para el medio ambiente produciendo su deterioro de forma paulatina, en la Tabla 2.7 se muestran los principales productos de la combustión.

Tabla 2.7. Principales productos de la combustión (CONUEE, 2017).

Nombre	Formula	Propiedades	Tipo de contaminación
Óxidos de nitrógeno	NO _x	Gas marrón o naranja	Componente de la formación fotoquímica de smog; tóxico a alta concentración
	N ₂ O	Incoloro; utilizado como gas portador de aerosoles	Relativamente inerte no es un producto de combustión
Monóxido de carbono	CO	Incoloro e inodoro	Producto de combustión incompleta; tóxico a alta concentración
Bióxido de carbono	CO ₂	Incoloro e inodoro	Producto de combustión completa de compuestos orgánicos; implicado en el cambio climático
Hidrocarburos	C _x H _y	Diferentes compuestos	Emitido desde el cárter y escape del automóvil

3. METODOLOGÍA

En el presente apartado se presenta el procedimiento detallado para llevar a cabo este proyecto de tesis y alcanzar los objetivos planteados al inicio. Dicho procedimiento se divide en cuatro etapas, en la primer etapa se recabo información relacionada con el biodiesel de ricino, además se llevó a cabo una exhaustiva investigación sobre el proceso de combustión del ciclo diésel, variables de interés e investigaciones previas sobre la implementación del biodiesel mezclado con diésel fósil en motores diésel reales, de esta forma fue posible caracterizar el sistema correctamente. La etapa dos se enfocó en la determinación del modelo termodinámico y cinético de la reacción. En la etapa tres se llevó a cabo la modelación del ciclo diésel con ayuda del simulador Aspen Plus, representando de esta forma la fenomenología del proceso, es decir, sin tomar en cuenta aspectos mecánicos sobre el funcionamiento del motor y, posteriormente se compararon los datos de salida del simulador con los reportados en la literatura, con la finalidad de validar el sistema de simulación y así garantizar la viabilidad técnica del uso de simuladores en este tipo de procesos. Finalmente en la cuarta etapa, con el proceso ya validado, se llevó a cabo una evaluación del desempeño termodinámico de diferentes composiciones de mezcla, determinando así la concentración de mezcla más viable para su implementación.

Para el alcance de los objetivos se realizaron diferentes actividades, propias de cada objetivo, las cuales se plantean de manera consecutiva en el esquema de la figura 3.1, que se presenta a continuación:

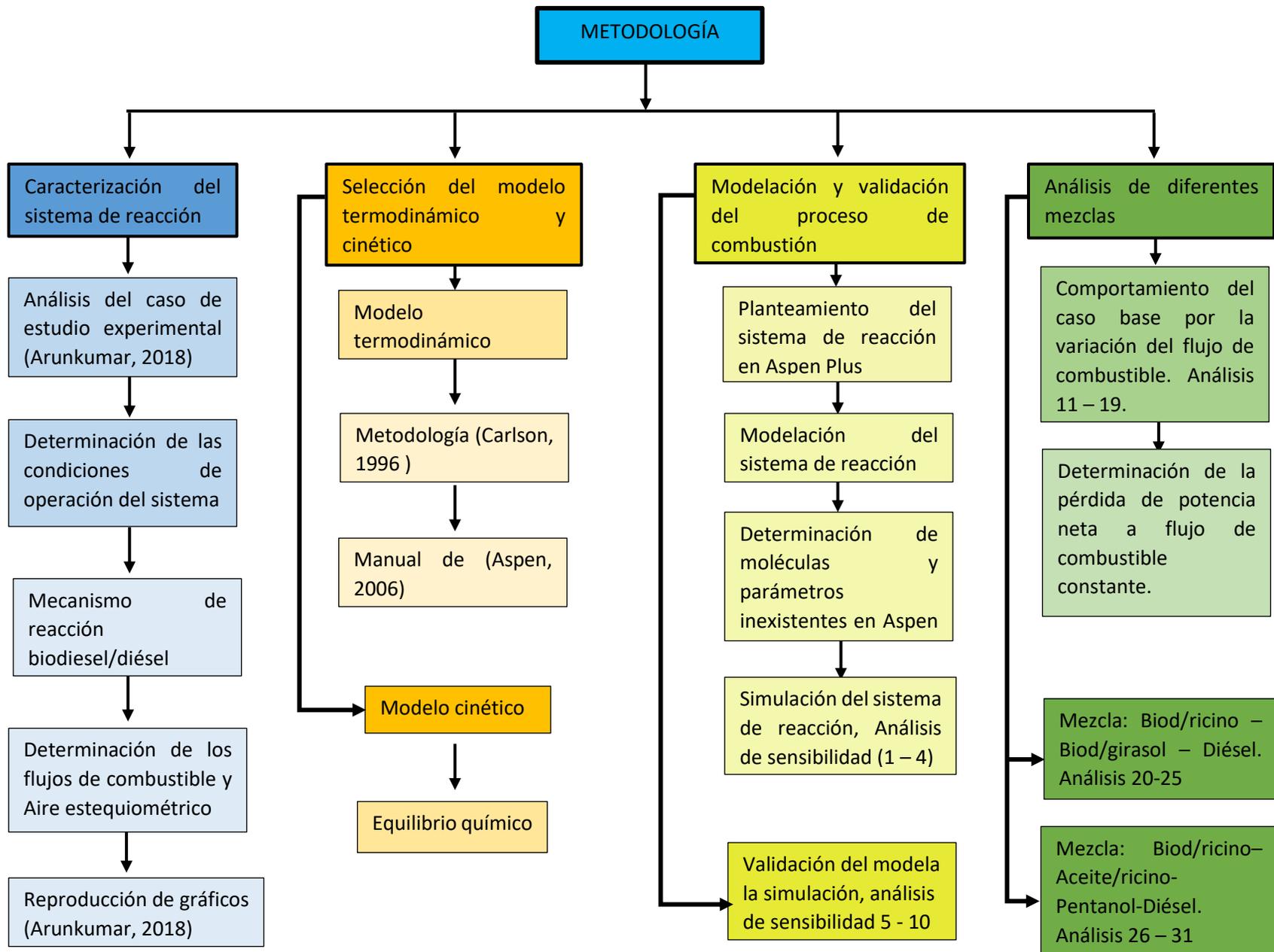


Figura 3.1. Esquema general de la metodología

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

3.1.1 CASO DE ESTUDIO EXPERIMENTAL.

Tanto Panwar, (2009) como Arunkumar, (2018), realizaron estudios enfocados en analizar el rendimiento energético, específicamente de mezclas biodiesel/ricino - diésel/fósil de manera practica en un motor diésel de inyección directa de la marca Kirloskar modelo AV1-NW2+ (Ver figura 3.2), acoplado al mismo diferentes dispositivos como un dinamómetro y un analizador de gases para evaluar el Brake Power generado por el motor y la temperatura y composición del fluido a la salida del escape respectivamente, además de los parámetros de operación a distintas cargas de funcionamiento. Ver figura 3.2 y tabla 3.1.

Caso de estudio: *Análisis experimental del rendimiento energético de mezclas biodiesel-ricino/diésel Arunkumar (2018) y Panwar (2009).*

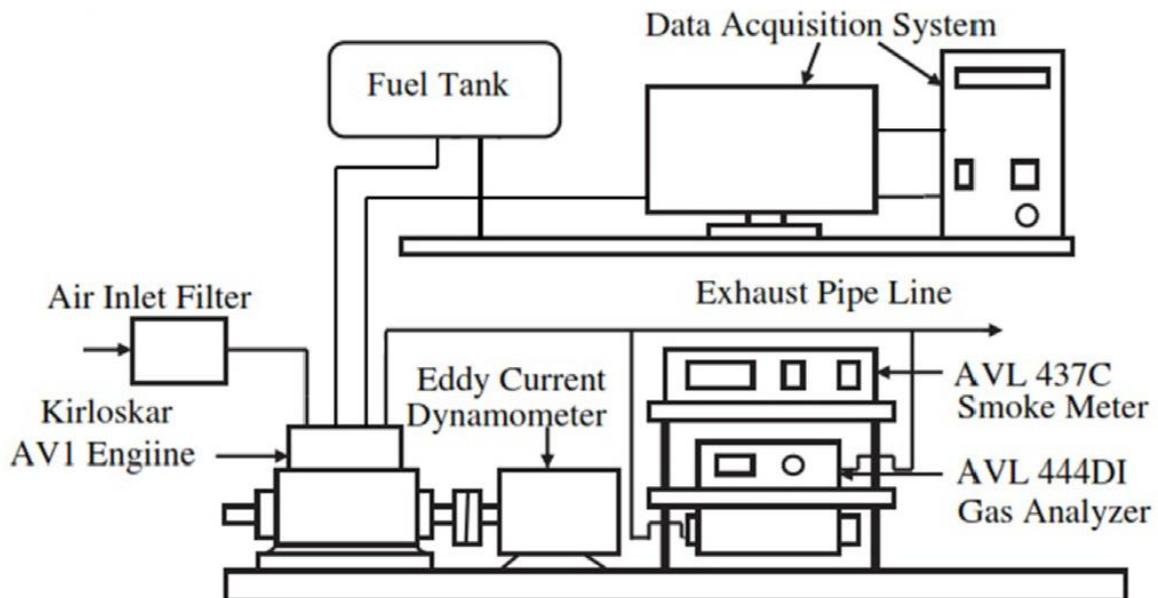


Figura 3.2 Diagrama de bloques de la configuración experimental desarrollado (Arunkumar, 2018).

Tabla 3.1 Instrumentación del equipo experimental (Arunkumar, 2018).

Dispositivos	
AVL 437C smoke meter	Cantidad de smoke y Temperatura de salida
AVL 444-DI analizador de gases	HC,O ₂ ,CO,CO ₂ y NO _x
Dinamómetro	Dinamómetro de corrientes inducidas
Par nominal	2.4kg-m

Finalmente los autores evaluaron parámetros que se utilizan para el análisis del rendimiento energético de cualquier motor en general, tales como: Total fuel consumption (TFC), Brake power (BP), Brake specific fuel consumption (BSFC), Brake specific energy consumption (BSEC), Brake thermal efficiency (BTE) y Exhaust gas temperature (ExGT) por sus siglas en inglés, mismos que se describen a continuación.

- TFC: Es la tasa del consumo total de combustible consumido por un motor de combustión interna en kg/h.
- BP: Es la potencia generada por un motor primario de combustión interna en kW.
- BSFC: En general todos los motores de combustión interna se analizan en base a su consumo específico de combustible o por sus siglas en Inglés BSFC (Brake specific fuel consumption). Este parámetro es la tasa de consumo total de combustible dividida por la potencia producida y se mide en kg/kWh. También se puede considerar como un consumo de combustible específico de la potencia, por esta razón el BSFC permite comparar directamente la eficiencia de combustible de diferentes motores; normalmente se utiliza para comparar la eficiencia de los motores de combustión interna y por tanto es posible saber qué equipo y que combustible tiene mayor rendimiento con respecto al consumo de combustible y la potencia generada, se determina a través de la siguiente ecuación.

$$BSFC = TFC/BP \quad \text{Ec. 1}$$

- BSEC: Se determina como la eficiencia de obtener energía a partir de un combustible específico dado y se calcula por el producto del BSFC y el poder calorífico (CP) del combustible utilizado, medido en kJ/kWh.

$$BSEC = CP * BSFC \quad \text{Ec. 2}$$

- BTE: Se define como la capacidad de un motor de combustión interna para convertir la energía potencial del combustible en energía mecánica medida en %.

$$\eta = \frac{BP_{real}}{BP_{neto}} * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

- ExGT: Es la temperatura de los gases de combustión expulsados por el escape de cualquier motor de combustión interna en °C.

3.1.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE REACCIÓN

Dado que los experimentos se realizaron en un motor diésel Kirloskar AV1-NW2+, se tomó como referencia la información técnica del motor diésel Kirloskar AV1-NW2+, obtenidos de: *Kirloskar Oil Engines Limited Agri Business Product Catalogue* (Kirloskar). Ver Figura 3.3.

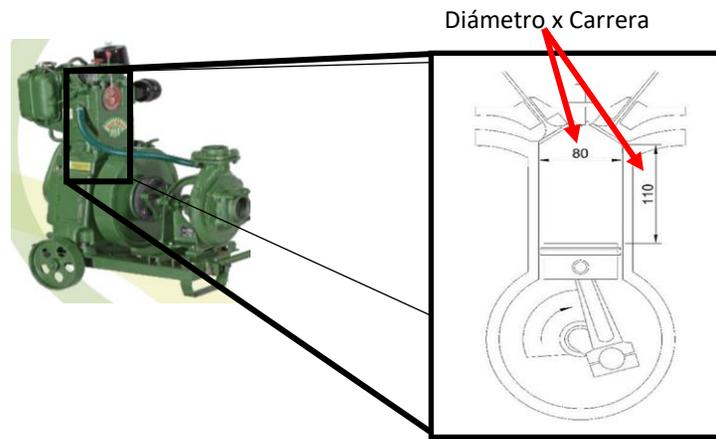


Figura 3.3 Dimensiones del motor Kirloskar AV1-NW2+ (Arunkumar, 2018) y área de enfoque.

El motor Kirloskar AV1-NW2+ es un motor mono cilíndrico de 4 tiempos que funciona a un régimen constante de revoluciones en cada prueba, aunque este motor está acoplado a una bomba de agua, el motor fue utilizado sin realizar ningún tipo de trabajo, por tanto, al igual que los investigadores, el proyecto se centró en la evaluación del rendimiento térmico y de la combustión, centrándose el análisis específicamente en la cámara de combustión como se observa en la Figura 3.3. En tanto para la selección de la presión y temperatura dentro del cilindro se tomó en consideración el estudio de Das (2017), enfocado en evaluar la presión dentro del cilindro con respecto a la apertura de la válvula, por otro lado también se consideró el análisis desarrollado por Pérez (2013) quien realizó su estudio basado en simulación con reacciones de biodiésel de ricino/diésel fósil, finalmente ambos proponen un máximo en la presión dentro del cilindro de 45 y 46 bares respectivamente, por lo cual finalmente se definió una presión de 45 bares. Por otro lado, dado que la temperatura dentro del cilindro está en función de la presión del aire alcanzada durante la compresión, se definió la temperatura en 600 °C. Además en cuanto a la velocidad de funcionamiento del motor se tomó un rango de 800 – 1800 rpm, tomadas del estudio de Gogoi (2009) enfocado en evaluar el BP con respecto a las RPM del motor Kirloskar. Los detalles técnicos del motor así como los parámetros de operación utilizados en el sistema de simulación se encuentran detallados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Especificaciones técnicas del motor Kirloskar AV1-NW2+ (Kirloskar).

Kirloskar	Especificación
Tipo	Diésel inyección directa 4T
Configuración	Mono cilíndrico
Relación de compresión	17.5:1
Capacidad volumétrica	0.553cc
Velocidad nominal	1500 rpm
Rango de velocidad	800 – 1800 rpm
Potencia (kW; HP)	3.7 ; 5
Presión en el cilindro	45 bar
Temperatura	600 °C

3.1.3 MECANISMO DE REACCIÓN

Para la simulación del sistema de reacción se tomaron como base las reacciones de combustión del biodiesel para cada uno de sus componentes, conformadas por las reacciones R1 – R8, desarrolladas por Pérez (2013), quien caracterizó el biodiesel de ricino por análisis cromatógrafo y posteriormente llevo a cabo su investigación sobre su rendimiento, además se consideraron las reacciones como combustión completa y se calculó el calor de combustión para cada reacción, donde cabe destacar que el Eicoseonato presenta el calor de combustión más alto, en tanto que el N-Hexadecano presenta el calor de combustión más bajo; parámetros que se verán reflejados en la conversión de los reactivos más adelante en el apartado 3.3.1.3.

Ecuaciones de reacción:		Calor de combustión (kJ/mol)	N° reacción
Ricinato de metilo	$C_{19}H_{36}O_2 + 26.5O_2 \rightarrow 18H_2O + 19CO_2$	-11048.5	R1
Oleato de metilo	$C_{19}H_{36}O_2 + 27O_2 \rightarrow 18H_2O + 19CO_2$	-11203.0	R2
Linoleato de metilo	$C_{19}H_{34}O_2 + 26.5O_2 \rightarrow 17H_2O + 19CO_2$	-11074.8	R3
Estearato de metilo	$C_{19}H_{38}O_2 + 27.5O_2 \rightarrow 19H_2O + 19CO_2$	-11329.5	R4
Palmitato de metilo	$C_{17}H_{34}O_2 + 24.5O_2 \rightarrow 17H_2O + 17CO_2$	-10100.0	R5
Eicoseonato de metilo	$C_{21}H_{40}O_2 + 30O_2 \rightarrow 20H_2O + 21CO_2$	-12437.0	R6
Linolenato de metilo	$C_{19}H_{32}O_2 + 26O_2 \rightarrow 16H_2O + 19CO_2$	-10948.6	R7
N-Hexadecano	$C_{16}H_{34} + 24.5O_2 \rightarrow 17H_2O + 16CO_2$	-10033.1	R8

3.1.4 DETERMINACIÓN DE LOS FLUJOS DE COMBUSTIBLE DIÉSEL - BIODIESEL

En base a los datos reportados por Arunkumar (2018) y Panwar (2009) se determinaron de manera indirecta los flujos máxicos (Kg/h) de combustible y sus diferentes concentraciones a diferentes regímenes de funcionamiento del motor, es decir a partir de la gráfica BSFC, la cual relaciona el TFC con el BP a través de la ecuación 1, para ello primero se obtuvieron los valores de cada curva de la gráfica de BSFC a través de la reproducción de la gráfica original, ver figura 3.4 y tabla 3.3, posteriormente se obtuvo el TFC de cada curva a través de la Ec. 4, que se obtiene de la ecuación 1, ver tabla 3.4.

$$TFC = BSFC * Bp$$

EC. 4

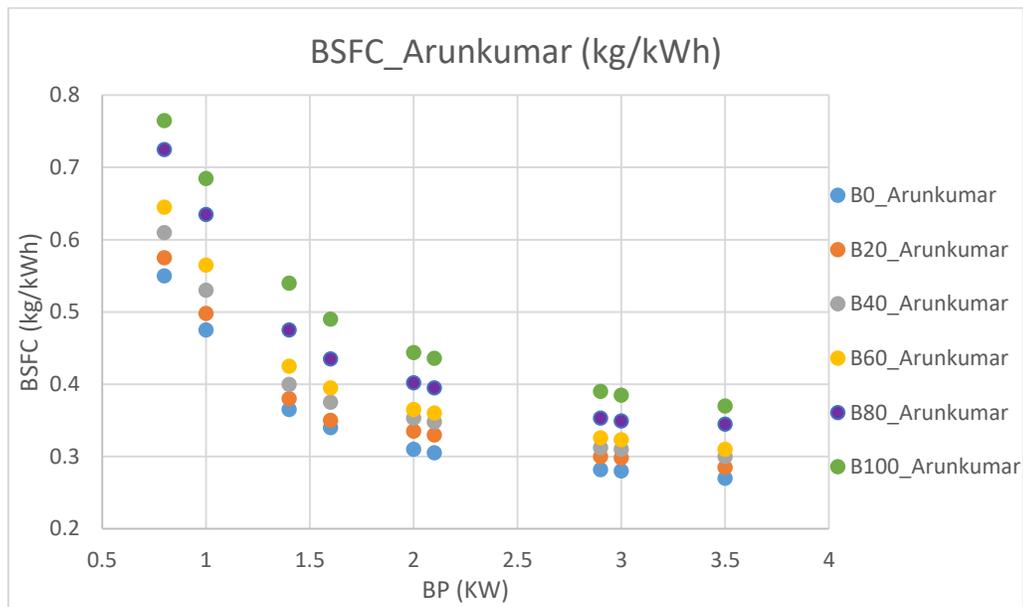


Figura 3.4 Gráfica del BSFC, obtenida a partir de la reproducción de la gráfica original obtenida por Arunkumar (2018), donde se pueden observar los puntos tomados como referencia.

Tabla 3.3 Valores numéricos para la gráfica de BSFC obtenidos por Arunkumar, (2018)

BP (kW)	Concentraciones de diésel-ricino / diésel -fósil					
	B100	B80	B60	B40	B20	B0
0.8	0.765	0.725	0.645	0.61	0.575	0.55
1	0.685	0.635	0.565	0.53	0.498	0.48
1.4	0.54	0.475	0.425	0.4	0.38	0.36
1.6	0.49	0.435	0.395	0.375	0.35	0.33
2	0.444	0.402	0.365	0.353	0.335	0.31
2.1	0.436	0.395	0.36	0.348	0.33	0.305
2.9	0.39	0.353	0.326	0.312	0.3	0.282
3	0.385	0.349	0.323	0.31	0.298	0.28
3.5	0.37	0.345	0.31	0.3	0.285	0.27

Tabla 3.4 Flujo másico TFC utilizado por Arunkumar, (2018) y Panwar, (2009).

BP (kW)	Flujo másico (kg/h) Concentraciones de diésel-ricino / diésel -fósil					
	B100	B80	B60	B40	B20	B0
0.8	0.612	0.58	0.516	0.488	0.46	0.44
1	0.685	0.635	0.565	0.53	0.498	0.48
1.4	0.756	0.665	0.595	0.56	0.532	0.504
1.6	0.784	0.696	0.632	0.6	0.56	0.528
2	0.888	0.804	0.73	0.706	0.67	0.62
2.1	0.9156	0.8295	0.756	0.7308	0.693	0.6405
2.9	1.131	1.0237	0.9454	0.9048	0.87	0.8178
3	1.155	1.047	0.969	0.93	0.894	0.84
3.5	1.295	1.2075	1.085	1.05	0.9975	0.945

Finalmente se obtuvieron los valores de las curvas para las gráficas de BSEC, BTE y ExGT, a través de la reproducción de las gráficas, datos que posteriormente fueron útiles para la validación del sistema de reacción. Ver figuras 3.5, 3.6, 3.7 y tablas 3.5, 3.6, 3.7 respectivamente.

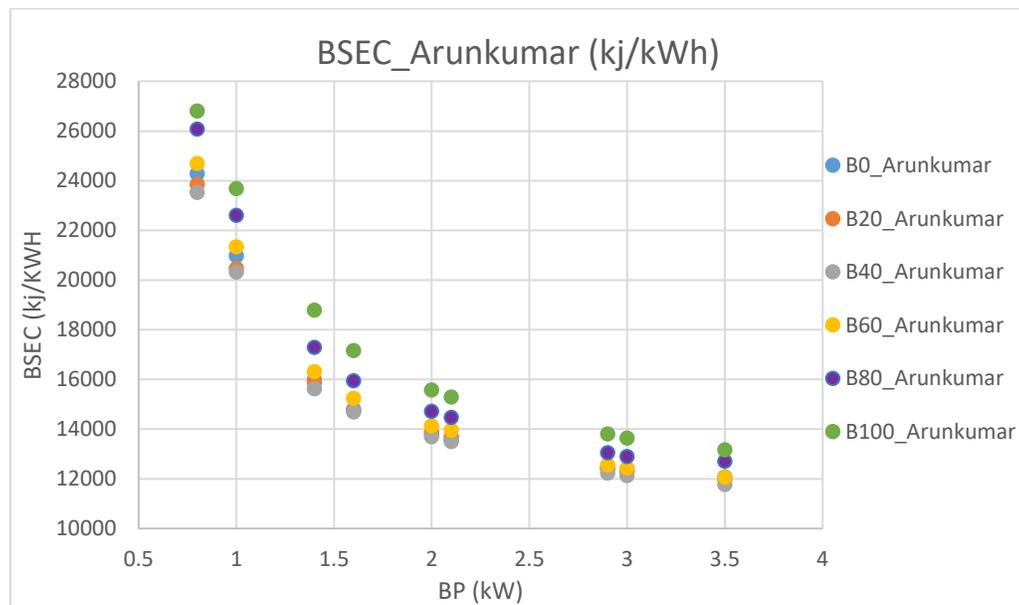


Figura 3.5 Gráfica del BSEC, obtenida a partir de la reproducción de la gráfica original obtenida por Arunkumar (2018), donde se pueden observar los puntos tomados como referencia.

Tabla 3.5 Valores numéricos para la gráfica de BSFC obtenidos por Arunkumar, (2018).

BP kW	BSEC Kg/kWh					
	B100	B80	B60	B40	B20	B0
	CV	34.45	35.9	38	38.05	41.4
0.8	26.35425	26.0275	24.51	23.2105	23.805	24.3375
1	23.59825	22.7965	21.47	20.1665	20.6172	21.24
1.4	18.603	17.0525	16.15	15.22	15.732	15.93
1.6	16.8805	15.6165	15.01	14.26875	14.49	14.6025
2	15.2958	14.4318	13.87	13.43165	13.869	13.7175
2.1	15.0202	14.1805	13.68	13.2414	13.662	13.49625
2.9	13.4355	12.6727	12.388	11.8716	12.42	12.4785
3	13.26325	12.5291	12.274	11.7955	12.3372	12.39
3.5	12.7465	12.3855	11.78	11.415	11.799	11.9475

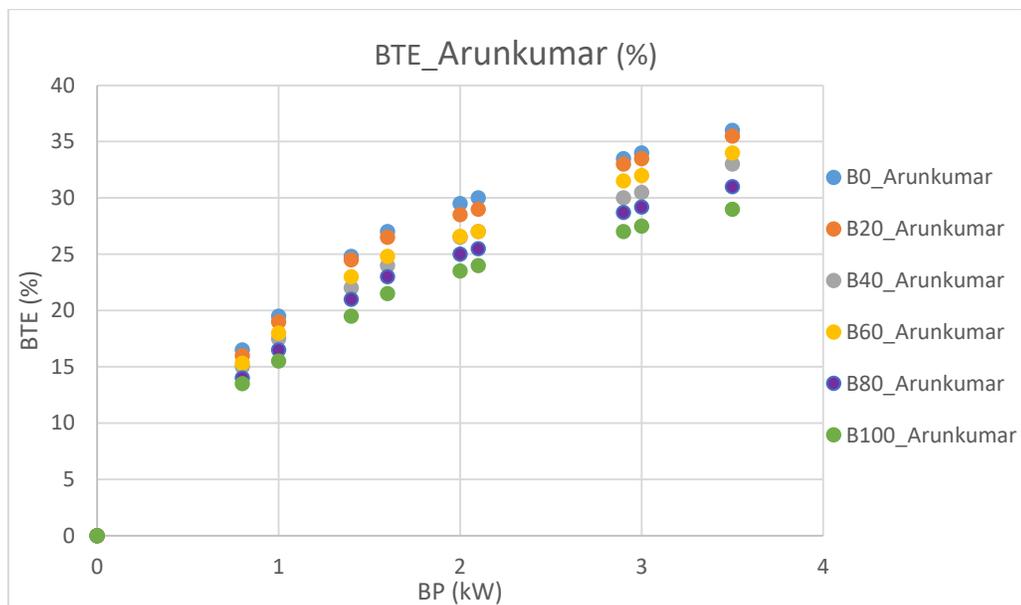


Figura 3.6 Gráfica del BTE, obtenida a partir de la reproducción de la gráfica original obtenida por Arunkumar (2018), donde se pueden observar los puntos tomados como referencia.

Tabla 3.6 Valores numéricos para la gráfica de BTE obtenidos por Arunkumar, (2018).

BP (kW)	BTE (%)					
	B100	B80	B60	B40	B20	B0
0	0	0	0	0	0	0
0.8	12.5	14.2	14.8	14.5	16	16.5
1	15.6	17.4	18.5	17.5	19.5	20
1.4	19.5	21	23	22	24	25
1.6	21	22.5	24.5	23.5	25.5	26.5
2	23.5	25	26.7	26.5	28.5	29.5
2.1	24	25.5	27	27	29	30
2.9	27	28.7	31.5	30	33	34
3	27.5	29.2	32	30.5	33.5	34.3
3.5	29	31	33.5	32.5	34.5	35.5

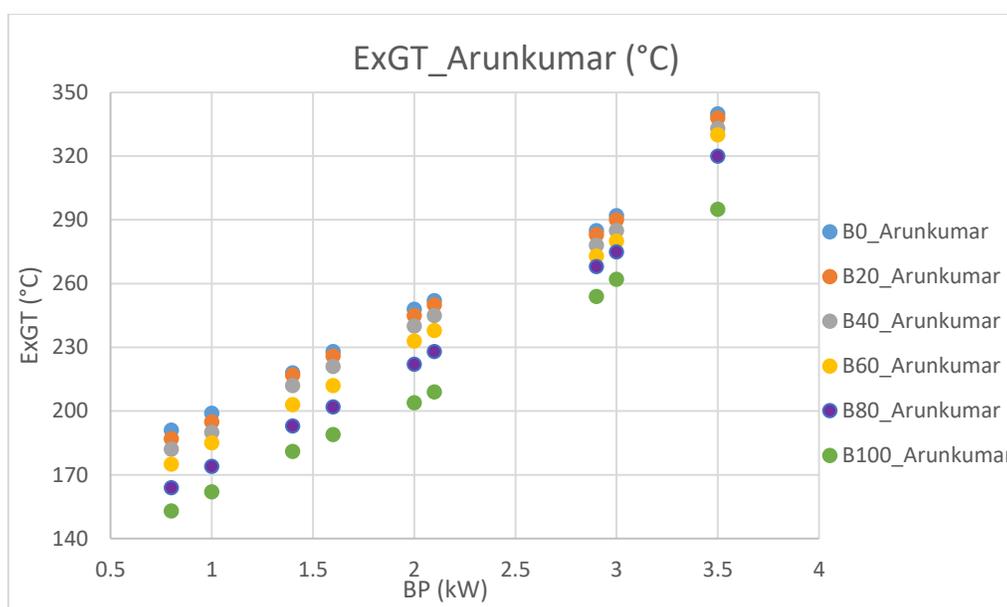


Figura 3.7 Gráfica del ExGT, obtenida a partir de la reproducción de la gráfica original obtenida por Arunkumar (2018), donde se pueden observar los puntos tomados como referencia.

Tabla 3.7 Valores numéricos para la gráfica de ExGT obtenidos por Arunkumar, (2018).

T salida °C	B100	B80	B60	B40	B20	B0
T out (°C)	B100	B80	B60	B40	B20	B0
0.8	153	164	175	182	187	191
1	162	174	185	190	195	199
1.4	181	193	203	212	217	218
1.6	189	202	212	221	226	228
2	204	222	233	240	245	249
2.1	209	228	238	245	250	252
2.9	254	268	273	278	283	285
3	262	275	280	285	290	292
3.5	295	320	330	333	338	340

3.1.5 DETERMINACIÓN DE LOS FLUJOS DE AIRE DE ALIMENTACIÓN

El aire está compuesto principalmente por gases como el oxígeno y nitrógeno en diferentes proporciones, 21% O₂, 78 % N₂ y 1 % de otros gases, además contiene una cantidad de vapor de agua variable según la altitud, presión y la temperatura principalmente. La determinación de la cantidad de vapor de agua contenida en el aire es un factor que se debe tomar en cuenta si se requiere apegarse lo más posible a las condiciones reales de operación del motor Kirloskar; para determinar la humedad absoluta del aire se tomaron en cuenta parámetros promedios de la ciudad de Puebla publicados por (METEORED, 2020), ver tabla 3.8.

Tabla 3.8 Parámetros y condiciones climáticas de la Ciudad de Puebla (METEORED, 2020).

Parámetro	Valor	Unidades
T de bulbo seco	20	°C
T de bulbo húmedo	17.77	°C
Humedad relativa	82.2	%
g de agua/ kg de aire seco	15.683	g/kg
Humedad específica	0.0154	-----
Humedad absoluta	14.211	g/ m ³

Una vez determinada la humedad del aire fue necesario determinar la cantidad de oxígeno estequiométrico, es decir el oxígeno mínimo para llevar a cabo una combustión completa, para ello se comenzó con la determinación de los moles, tanto de combustible como de oxígeno, necesarios para cada reacción previamente balanceada, ver reacciones R1 – R8, obteniendo así los moles totales de oxígeno y de combustible. Posteriormente se obtuvieron los kg estequiométricos de los componentes al multiplicar los moles de cada especie por su peso molecular correspondiente. Ver tabla 3.9.

Tabla 3.9 Oxígeno estequiométrico para cada especie.

	Moles totales de combustible (mol)	Moles totales de O ₂ (mol)	Combustible (kg)	Oxígeno (kg)
BIODIESEL	7	188	2.1094	6.0157
DIÉSEL	1	24.5	0.2264	0.7839

Posteriormente se determinó el flujo de oxígeno necesario para llevar a cabo la combustión completa para cada especie mediante las ecuaciones 5 y 6, y finalmente el aire total, en exceso y la humedad contenida en el aire en función de cada flujo a través de las ecuaciones 7, 8 y 9 respectivamente, ver tabla 3.10 y APÉNDICE IA para ver las tablas de todos los flujos.

$$FO2d = \frac{\%Fd \times O2de}{Fde} \quad \text{Ec. 5}$$

$$FO2bio = \frac{\%Fbio \times O2bioe}{Fbioe} \quad \text{Ec. 6}$$

$$AIREtotal = \frac{(FO2d+FO2bio)100}{21} \quad \text{Ec. 7}$$

$$AIREexe = AIRtotal * 1.3 \quad \text{Ec. 8}$$

$$Humedad = AIREexe \times kg \text{ agua} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

- FO₂d = Es el flujo de oxígeno necesario para el diésel de acuerdo al porcentaje de la mezcla.
- %Fd= Es el porcentaje de flujo del diésel de cada mezcla.
- Fde = Es el diésel estequiométrico para llevar a cabo la reacción.
- O₂de= Es el oxígeno estequiométricamente necesario para el diésel.
- FO₂bio = Es el flujo de oxígeno necesario para el biodiesel de acuerdo al porcentaje de la mezcla.
- %Fbio= Es el porcentaje de flujo del biodiesel de cada mezcla.
- Fbioe = Es el biodiesel estequiométrico para llevar a cabo la reacción.
- O₂bioe= Es el oxígeno estequiométricamente necesario para el biodiesel.

Tabla 3.10 Tabla de Aire total y humedad para el caso B20 para régimen de funcionamiento, ver APÉNDICE IA.

BP (kW/h)	20% bio	80%diesel	O2 total eq	AIRE total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.0920	0.3680	1.5367	7.4167	8.9000	0.1148
1	0.0996	0.3984	1.6637	8.0293	9.6352	0.1242
1.4	0.1064	0.4256	1.7773	8.5775	10.2930	0.1327
1.6	0.1120	0.4480	1.8708	9.0290	10.8348	0.1397
2	0.1340	0.5360	2.2383	10.8025	12.9630	0.1672
2.1	0.1386	0.5544	2.3151	11.1733	13.4080	0.1729
2.9	0.1740	0.6960	2.9064	14.0271	16.8326	0.2171
3	0.1788	0.7152	2.9866	14.4141	17.2969	0.2230
3.5	0.1995	0.7980	3.3324	16.0828	19.2994	0.2489

3.2 MODELO TERMODINÁMICO Y MODELO CINÉTICO

3.2.1 SELECCIÓN DEL MODELO TERMODINÁMICO

La selección del modelo termodinámico apropiado para efectuar la simulación del ciclo diésel se realizó considerando 5 factores: 1) la composición y concentraciones de los compuestos en la mezcla del fluido, 2) tomando como línea base las fases involucradas en el proceso de combustión, 3) rangos de presión y temperatura, 4) así como las características químicas de los componentes que intervienen en el mecanismo de reacción y 5) empleando la metodología (Carlson, 1996) y las recomendaciones del manual de Aspen Plus.

1) De acuerdo a la investigación previa, los estudios e investigaciones sobre la implementación de biodiesel en motores diésel están principalmente dirigidas a determinar la mezcla óptima entre biodiesel-diésel para obtener el mejor rendimiento posible, mostrando un rango de concentraciones de B0 – B20. Por lo cual es de esperarse que las propiedades y características que presenta la mezcla final en sus diferentes concentraciones sean muy similares al componente en mayor concentración, en este caso al diésel fósil, en concreto en la no polaridad del mismo (PEMEX, 2015).

2) Aunque el combustible es inyectado a alta presión en la cámara de combustión en forma líquida, se consideró la reacción en fase gaseosa debido a que el combustible al ser inyectado a alta presión presenta una dispersión por atomización en gotas extremadamente diminutas, por lo que aunado a la alta temperatura a la cual se encuentra el aire comprimido en la cámara de combustión, se presenta un fenómeno de evaporización instantáneo, dando como resultado un fluido en fase vapor justo antes de que inicie la reacción química.

3) Dado que el proceso de combustión se lleva a cabo a alta presión y temperatura, es decir por encima de 45 Mpa y 600 °C respectivamente, con lo cual se hace evidente la necesidad de tomar en cuenta dicho aspecto de la reacción en la elección del modelo termodinámico.

4) Una característica que presentan los ésteres es que son capaces de aceptar enlaces de hidrógeno, esto permite que los ésteres de cadena corta y por ende baja masa molecular sean solubles en agua, es decir que presentan algún grado de polaridad, en tanto que los ésteres de cadena larga y mayor peso molecular sean insolubles en agua y solubles en la mayoría de los disolventes orgánicos, presentando evidentemente un comportamiento no polar (Sánchez-Borroto, 2012).

Por lo tanto basado en la consideración de que semejante disuelve semejante, es decir que un solvente polar disuelve a una solución polar y viceversa, es factible utilizar la solubilidad en agua de cada componente de la mezcla con la que estamos trabajando, como un indicador de la no polaridad de la mezcla; por otra parte el factor acéntrico, el cual está ligado a la esfericidad de las moléculas, nos ayuda a determinar la linealidad de las moléculas y garantizar que son de cadena larga mostrando propiedades no polares como se describe en la tabla 3.11.

Como se observa en la tabla 3.11, el Ricinolato de metilo presenta una solubilidad en agua muy ligera, debido a la existencia de oxígeno en su composición, aspecto que se debe tomar en cuenta en la elección del modelo termodinámico. En tanto que el factor acéntrico presenta un valor alto comparado con el del agua, por lo que es evidente que las moléculas son de cadena larga mostrando una insolubilidad en agua, por lo que es factible considerar las mezclas como no polares.

Tabla 3.11 Factor acéntrico y solubilidad en agua para los componentes de interés (Aspen, 2006) y (NIST, 2020).

Éster metílico	Estructura	Formula	Factor acéntrico	Solubilidad en agua mg/L 25°C
Ricinolato de metilo	19:1-OH	C ₁₉ H ₃₆ O ₃	2.0055	9.87x10 ⁻²
Oleato de metilo	19:1	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	1.0494	Insoluble
Linoleato de metilo	19:2	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	1.0255	Insoluble
Estearato de metilo	19:0	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	0.8594	Insoluble
Palmitato de metilo	17:0	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	0.7764	Insoluble
Eicoseonato de metilo	21:1	C ₂₁ H ₄₀ O ₂	0.9315	Insoluble
Linelonato de metilo	19:3	C ₁₉ H ₃₂ O ₂	1.0301	Insoluble
Diésel fósil ^a	16:0	C ₁₆ H ₃₄	0.7174	2.1x10 ⁻⁵
Agua		H ₂ O	0.347	-----

5) Metodología Carlson y manual de Aspen Plus.

De acuerdo al árbol de decisiones presentado por Carlson (1996) figura 3.8, es necesario definir en primera instancia la condición polar o no polar del fluido o de la mezcla que será utilizada, como se mencionó para el caso del diésel al ser un hidrocarburo es de carácter no polar, por otro lado para el caso del biodiesel de manera general es no polar, sin embargo debido al tipo de biodiesel del que se está tratando (biodiesel de ricino) y a la concentración mayoritaria de ricinolato de metilo en la mezcla de ésteres, podría presentar un comportamiento ligeramente polar; aunque al tomar en cuenta la concentración entre el diésel y el biodiesel la cual es entre B0 – B20, se considera la influencia del biodiesel como despreciable, de lo anterior se asume que es bastante factible considerar la mezcla final como no polar para posteriormente buscar un modelo termodinámico que pueda tomar en cuenta dicho aspecto.

Siguiendo con las indicaciones del esquema es necesario definir la condición de la mezcla, en este caso, debido a que cada constituyente del fluido es descrito a través de una formula molecular, la condición de dicho fluido es de carácter real, ver figura 3.8.

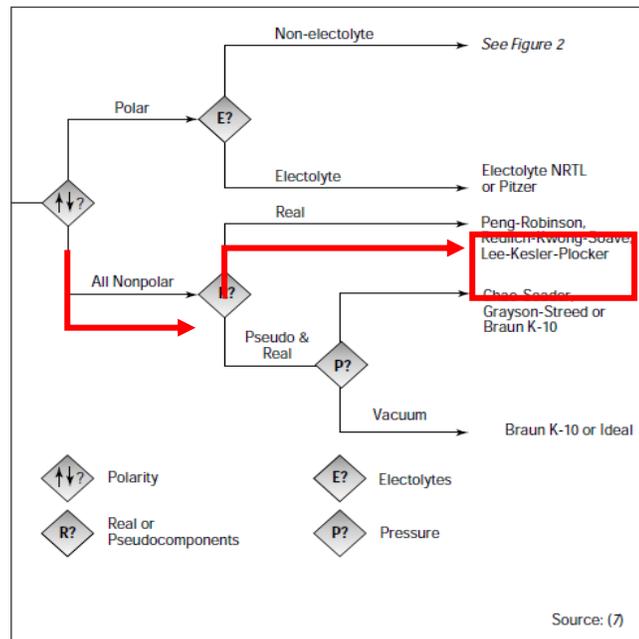


Figura 3.8 Árbol de decisiones para el método termodinámico (Carlson, 1996).

Con ello es evidente que la mejor opción para llevar a cabo la modelación del sistema es a través de la elección de una ecuación de estado (EOS), tales como Peng Robinson, Redlich Kwong-Soave y Lee-Kesler-Plöcker.

Finalmente de acuerdo al manual de Aspen Plus en la sección de clases de modelos recomendados para diferentes aplicaciones, se recomienda para simulaciones de combustión y generación de energía el uso de “Ecuaciones de estado para aplicaciones de hidrocarburos a alta presión (con banco de datos de combustión)”. Por lo tanto después de una investigación y análisis sobre los modelos termodinámicos en dicha sección, se determinó el modelo de benedict-webb-rubin-starling (BWRS) como el más adecuado debido a las características que se muestran descritas a continuación (Aspen, 2006).

3.2.1.1 MODELO TERMODINAMICO BENEDICT-WEBB-RUBIN-STARLING “BWRS”

El modelo termodinámico BWRS se basa en la ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubin-Starling con parámetros opcionales de interacción binaria y de componentes puros. Estos parámetros se obtienen a partir de regresiones de datos multipropiedad (equilibrio-líquido-vapor, entalpía, etc.). Si no se proporcionan parámetros de componentes puros, se estiman con las correlaciones propuestas por Starling. El modelo BWRS es comparable a PENG-ROB, RK-SOAVE, BWR LS y LK-PLOCK para cálculos de equilibrio de fase, pero es más preciso que PENG-ROB y RK-SOAVE para volumen molar líquido y entalpía. Puede utilizarlo para aplicaciones de refinería y procesamiento de gas e hidrocarburos (Aspen, 2006).

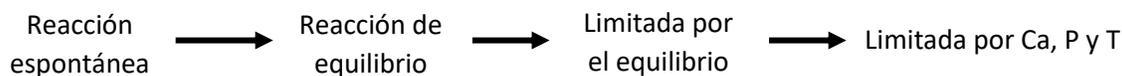
El método BWRS es adecuado cuando se necesita una precisión muy alta en las propiedades de los componentes puros. Este método puede calcular propiedades muy precisas (presión de vapor, volumen molar y entalpía) para componentes puros. El modelo también es muy bueno para sistemas de hidrocarburos ligeros y gases ligeros como N_2 , CO_2 y H_2S cuando se dan los parámetros binarios. Cuando hay agua, el BWRS utiliza de forma predeterminada la tabla de vapor para calcular la entalpía, la entropía, la energía de Gibbs y el volumen molar de agua.

Tipos de mezcla: Se recomienda utilizar el método de propiedad BWRS para mezclas no polares o ligeramente polares y gases ligeros. Los ejemplos son los hidrocarburos y los gases ligeros, como el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno y el nitrógeno.

Rango: Puede esperar resultados razonables a todas las temperaturas y presiones. El modelo termodinámico BWRS es consistente en la región crítica. No presenta un comportamiento anómalo, a diferencia de los métodos de propiedad del coeficiente de actividad. Los resultados son menos precisos en la región cercana al punto crítico de la mezcla (Aspen, 2006).

3.2.2 MODELO CINÉTICO

Debido a la velocidad con la que se lleva a cabo la reacción de combustión, que es de apenas unos milisegundos, la composición de la reacción alcanza el equilibrio químico, es decir que las reacciones químicas son más rápidas que los cambios asociados con parámetros termodinámicos como presión y temperatura, presentando una reacción química de carácter espontáneo, de manera que los cambios en la composición no están controlados por la cinética de la reacción sino que dependen de parámetros termodinámicos y de aspectos relacionados directamente con la composición de la mezcla, así como las fases involucradas en el proceso, lo cual implica que la reacción se encuentra limitada por el equilibrio (Collado, 2007). Además desde un punto de vista químico las reacciones se pueden considerar como reversibles, es decir que pueden reaccionar en ambas direcciones, esto permite aplicar la teoría de equilibrio químico, dado que se consideran solo el estado inicial y final de las reacciones químicas, donde los estados intermedios son despreciables, así como los fenómenos intermedios que pudieran presentarse, lo cual permite evaluar las propiedades termodinámicas del fluido de proceso y de esta manera determinar la potencia generada durante el proceso de combustión. En el siguiente esquema se muestran los criterios descritos (Figueroa, 2005).



Finalmente dado que el enfoque específico del proyecto es el análisis energético de la combustión, se determinó que es factible llevar a cabo el análisis de la combustión basado en el equilibrio, por lo cual se evidencia que la evolución de la reacción está limitada por parámetros termodinámicos como la concentración de los reactivos, presión y la temperatura.

3.3 MODELACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DEL MOTOR DIÉSEL

3.3.1 CONCEPTUALIZACIÓN DE LAS ETAPAS DEL CICLO DIÉSEL EN ASPEN PLUS

Admisión y compresión

Conceptualmente el proceso inicia con la succión y compresión del aire alcanzando una presión de 4.5 Mpa, este proceso abarca las etapas de admisión y compresión; para representar este fenómeno en el simulador se hizo a través de un compresor de aire, el cual funciona con una eficiencia del 100 %, ver figura 3.9 y tabla 3.12, dado que el proceso funciona de forma estacionaria bajo una temperatura óptima provocando como consecuencia pérdidas hacia el exterior prácticamente nulas y por lo tanto despreciables, el proceso es considerado como adiabático. La implementación de un compresor fue de suma importancia ya que de esta manera fue posible calcular la energía necesaria para llevar el aire a dichas condiciones y posteriormente tomarla en cuenta en el análisis energético, ver figura 3.9 en azul.

Combustión expansión

Para el caso del proceso específico de la combustión, se lleva a cabo en la etapa de combustión/expansión. Para modelar este proceso se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Mezcla perfecta: dado que la inyección de combustible al reactor es por atomización a través del inyector y que la auto ignición del combustible inicia simultáneamente en diversos puntos del volumen de control, aunado a la velocidad con la que se lleva a cabo el proceso, es factible considerar el proceso como mezcla perfecta .
2. Flujo continuo: aunque a primera instancia, el ciclo diésel es un ciclo batch y podría ser una opción viable simularlo de esta manera, debido a la velocidad con la que se lleva a cabo cada ciclo, la cual es alrededor de 8 – 15 mms (Fygueroa, 2005), desde la compresión hasta el escape, considerar el proceso como flujo constante es técnicamente viable ya que se apega más al comportamiento real del proceso de combustión diésel.
3. Reacciones basadas en el equilibrio: debido a que el alcance de este proyecto es la determinación energética del ciclo diésel desde un punto de vista termodinámico, es suficiente llevar a cabo el análisis basado en reacciones en equilibrio.
4. Combustión completa: para poder determinar el mayor contenido energético que pueden entregar los reactantes es necesario considerar las reacciones como conversión completa.

En base a las consideraciones anteriores se determina el uso de un reactor CSTR de mezcla perfecta a un régimen de flujo constante, como la opción técnicamente más viable. Por tanto la simulación de la reacción de mezclas biodiesel/ricino – diésel/fósil se lleva a cabo en un reactor CSTR de mezcla perfecta a un régimen de flujo continuo con reacciones químicas basadas en el equilibrio, ver figura 3.9 sección en rojo y tabla 3.12.

Escape

Finalmente para poder evaluar la carga energética entregada por la reacción de combustión en el simulador se utilizó una turbina, funcionando de manera adiabática representando la fase de expansión y escape del ciclo, ver figura 3.9 sección en verde y tabla 3.12.

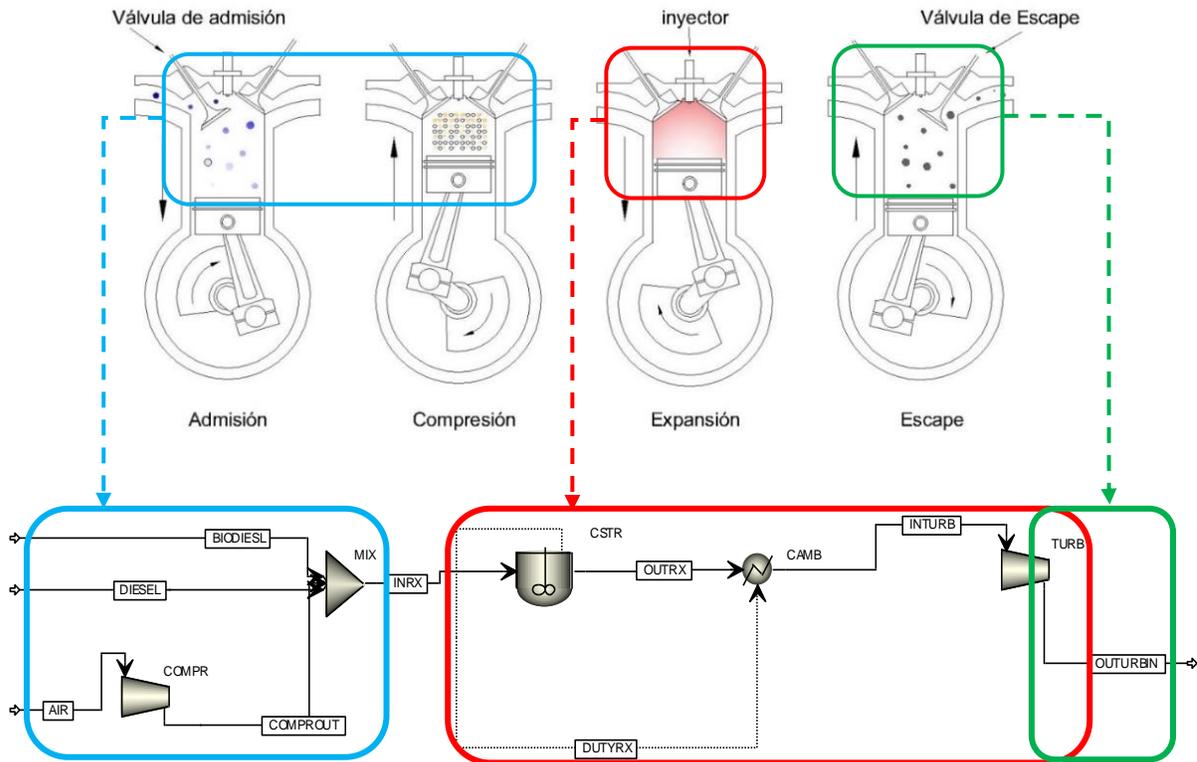


Figura 3.9 Diagrama del ciclo diésel y diagrama de Aspen Plus, enmarcado en azul proceso de admisión, en rojo combustión/expansión y en verde escape.

Tabla 3.12 Tabla de dispositivos implementados en el diagrama de flujo de Aspen Plus.

Etapa	Dispositivo	Régimen	Parámetros
Admisión	Corrientes de entrada "BIODIESEL"	Isotrópico	P 1 atm T 25°C
	"DIÉSEL"	Isotrópico	P 1 atm T 25°C
	"COMPROUT"	Isotrópico	P 45 bar T 600°C
	Mezclador	Isotrópico	P 45 bar T 600°C
Compresión	Compresor "COMPR"	Isotrópico	P 45 bar T 600°C
Combustión/expansión	Reactor "CSTR"	Isotrópico	P 45 bar T 600°C
	Intercambiador de calor "CAMB"	Isotrópico	P 585-1485 bar T 1995-1975°C
	Turbina "TURB"	Isotrópico	P 2 bar T 191-340 °C
Escape	Corriente OUTURBIN	Isotrópico	2 atm

3.3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DESARROLLADO EN ASPEN PLUS V8.8

Como se muestra en el diagrama de flujo 3.9, desarrollado en Aspen Plus V8.8, el proceso presenta tres corrientes de entrada:

- Biodiesel: conformada por los componentes antes mencionados y en sus diferentes concentraciones, con unas condiciones de entrada de 1 Bar de presión y a 25°C en diferentes rangos de flujo, ver APÉNDICE IA.
- Diésel: Esta corriente solo está conformada por n-Hexadecano y entra en fase líquida a 1 bar de presión y a 25 °C en diferentes rangos de flujo, ver APÉNDICE IA.
- Aire: esta corriente está conformada por O₂ y N₂ con una concentración de 21 % y 79 % respectivamente, y se alimenta en diferentes rangos de flujo, además en esta corriente también se alimenta una pequeña cantidad de agua con la finalidad de simular la humedad del aire, esta humedad está basada en la humedad del aire del estado de Puebla, ver APÉNDICE IA.

La corriente de aire entra a un compresor para elevar la presión y por ende la temperatura del aire hasta 45 bar y 600 °C respectivamente, para posteriormente entrar a un mezclador, en el cual se une con las corrientes de biodiesel y diésel para generar la corriente INRX, dicha corriente presenta unos parámetros de temperatura y presión que están en función de los diferentes flujos de cada régimen de funcionamiento, además esta corriente es completamente en fase vapor debido al choque térmico. La corriente INTX es también la entrada al reactor y se encuentra en este punto en condiciones óptimas para llevar a cabo la reacción.

Como se mencionó anteriormente el sistema de reacción está conformado por las reacciones R1 – R8, reacciones que se llevan a cabo de manera paralela dentro de un reactor CSTR a las mismas condiciones de la corriente de entrada. Para la simulación se empleó el “tipo de reacción” LHHW y reacción en “equilibrio” para la definición de velocidades de reacción en el simulador.

A la salida del reactor se genera la corriente de salida del reactor OUTRX, esta corriente presenta un cambio en la composición de los componentes de entrada al reactor, con una temperatura y presión de 600 °C y 45 bares respectivamente, presentando de manera general una composición de CO₂, H₂O y N₂ en diferentes rangos de composición según las diferentes condiciones de alimentación, además de la desaparición de los componentes de entrada, lo cual garantiza una combustión completa.

En el reactor CSTR se presenta la corriente DUTYRX, la cual es una corriente de calor, en la cual se ve reflejado parte de la energía expedida por la reacción. Posteriormente tanto la corriente OUTRX y DUTYRX ingresan a un intercambiador de calor “CAMB” con la finalidad de incorporar toda la energía generada en el reactor, es decir la energía en forma de calor que sale por la corriente DUTYRX y la energía que contiene la corriente de flujo de aire de la salida del reactor OUTRX.

Continuando con la secuencia del diagrama de flujo, a la salida del intercambiador CAMB se genera la corriente de salida "INTURB", esta corriente presenta un incremento sustancial de la temperatura y de la presión, debido a la incorporación total de la energía producida por la combustión.

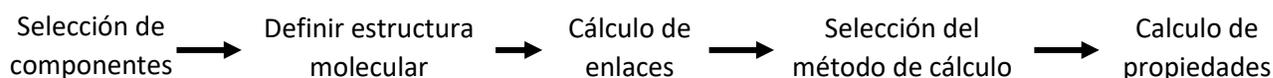
Finalmente la corriente "INTURB" entra una turbina con una eficiencia de 100 % (tanto la eficiencia del compresor y de la turbina se fijaron en 100 % con la finalidad de obtener la carga energética neta del proceso) en la cual se llevó a cabo el análisis de la carga energética por la reacción y así validar la viabilidad de la simulación a través de la comparación de los datos de salida con los datos de salida de los artículos tomados como base.

En adición ara evaluar la energía que lleva la corriente de salida del escape se acoplo la corriente OUTURBIN a un intercambiador de calor "ESCAPE", y así evaluar está perdida de energía.

3.3.1.2 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES Y PARÁMETROS INEXISTENTES EN EL SIMULADOR ASPEN PLUS V8.8.

Así mismo, en base a los componentes típicos no convencionales que conforman el fluido de proceso, se llevó a cabo la determinación de propiedades y parámetros termodinámicos de especies que no se encontraban presentes en la base de datos del simulador Aspen Plus, específicamente para el ricinolato de metilo figura 3.10 y el eicoseonato de metilo figura 3.11.

Para llevar a cabo este procedimiento se hizo uso del complemento de Aspen Plus "Aspen Properties" diseñado para predecir propiedades y parámetros termodinámicos de forma teórica de componentes puros, a partir de la estructura y de los grupos funcionales que conforman la molécula, este complemento se fundamenta en la teoría de contribución de grupos, específicamente en el método JOBAK, BENSON y GANI, el procedimiento se realizó en la siguiente secuencia:



1. Seleccionar componente:

- Ricinolato metilo
- Eicoseonato de metilo

2. Definición de estructura molecular de cada componente

>>> Componentes

>>> Estructura de la molécula

>>> Estructura

>>> Calculo de enlaces

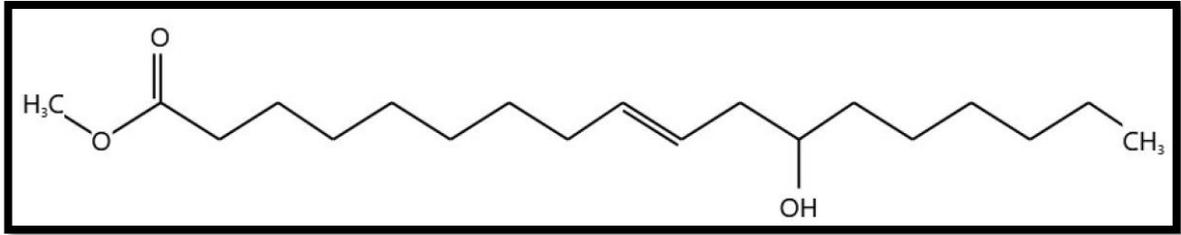


Figura 3.10 Ricinolato de metilo (NIST, 2020).

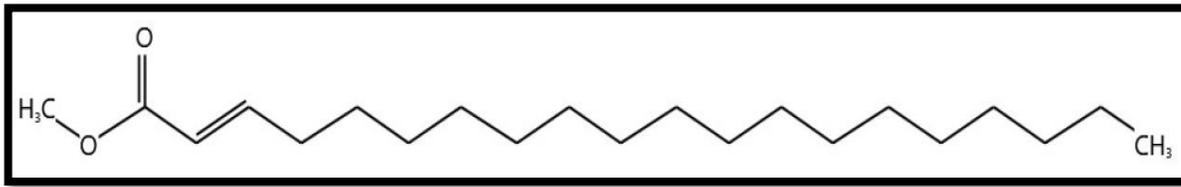


Figura 3.11 Eicoseonato de metilo (NIST, 2020).

3. Selección del método de cálculo:

>>> Estimación

>>> Todos los parámetros

>>> Componentes puros

>>> Métodos

- Joback

4. Estimación de propiedades

- DGFPRM
- DHFORM
- OMEGA (factor acéntrico)

T – Dependiente Método LI – MA

- PLXANT (Presión de vapor)

Las propiedades determinadas por el complemento de Aspen Plus se presentan en las tablas 3.13 para valores escalares, y en la tabla 3.14 se presenta la presión de vapor para el ricinolato de metilo como una correlación.

Tabla 3.13. Propiedades determinadas, valores escalares obtenidos de Aspen.

PropertyName	Parameter	Ricinolato de metilo	Eicoseonato de metilo	Units	Method
NORMAL BOILING POINT	TB	788.240		K	JOBACK
CRITICAL PRESSURE	PC	1201.457		kPa	JOBACK
CRITICAL COMPRES.FAC	ZC	0.20			DEFINITI
IDEAL GAS CP AT 300 K		4.63E+05		J/KMOL-K	BENSON
AT 500 K		6.82E+05		J/KMOL-K	BENSON
AT 1000 K		1.00E+06		J/KMOL-K	BENSON
STD.FREE ENERGY FORM	DGFORM	-2.60E+08	-81.2615	J/KMOL	JOBACK
VAPOR PRESSURE AT TB		101.325		kPa	LI-MA
AT 0.9*TC		34.74		kPa	LI-MA
AT TC		101.04		kPa	LI-MA
ACENTRIC FACTOR	OMEGA	2.01			DEFINITI
HEAT OF VAP AT TB	DHVLB	0.00		J/KMOL	DEFINITI
LIQUID MOL VOL AT TB	VB	0.59	0.4714	CUM/KMOL	GUNN-YAM
PARACHOR	PARC	815.10			PARACHOR

Tabla 3.14. Presión de vapor dependiente de la temperatura valores obtenidos por Aspen Plus.

Presión de vapor (PLXANT)	
RICINOLATO	
Temperatura	C
Presión	bar
1	60.68074334
2	-12559.8123
3	0
4	0
5	-6.70796686
6	3.0141428E-20
7	6
8	278.45
9	514.85

3.3.1.3 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

Una vez desarrollados los parámetros inexistentes y caracterizado el sistema de reacción, se realizaron una serie de análisis de sensibilidad para determinar los rangos de presión y temperatura en la cual las reacciones presentarían una combustión completa, con un flujo de combustible y aire para el caso B20, posteriormente se realizaron múltiples análisis enfocados en evaluar diferentes criterios, en la tabla 3.15 se muestra la descripción de cada análisis o grupo de análisis según el caso.

Tabla 3.15 Análisis de sensibilidad generados en la simulación.

Análisis		Vary	Define	
Análisis 1	Presión en el CSTR	1 – 100 bar	Flujo a la salida del CSTR de los componentes del combustible	Kg/h
Análisis 2	Temperatura en el CSTR	100 – 2000 °C	Flujo a la salida del CSTR de los componentes del combustible	Kg/h
Análisis 3	Flujo de aire al compresor	0 – 13 Kg/h	Flujo a la salida del CSTR de los componentes del combustible, de H ₂ O y CO ₂	Kg/h
Análisis 4	Flujo de aire al compresor	0 – 13 Kg/h	DUTY generado a la salida de la turbina	kW
Validación Análisis 5 -10	Flujo de combustible	Ver apéndice II A Kg/h	BP neto generado a la salida de la turbina	kW
Ricino-Diésel Análisis 11 -19	Flujo de combustible	Ver apéndice II B Kg/h	BP neto generado a la salida de la turbina	kW
Ricino-Girasol- Análisis 20 - 25	Flujo de combustible	Ver apéndice II C Kg/h	BP neto generado a la salida de la turbina	kW
Ricino-Pentanol Análisis 26 - 31	Flujo de combustible	Ver apéndice II D Kg/h	BP neto generado a la salida de la turbina	kW

Análisis de sensibilidad 1 sobre la presión del sistema.

El primer análisis realizado estuvo enfocado en evaluar la influencia de la variación de la presión sobre la conversión de reactivos a productos, y con ello determinar el rango de presión técnicamente viable para obtener una reacción de combustión completa. Este análisis se realizó con flujos de alimentación para una mezcla B20 (20% biodiesel y 80% diésel) con una temperatura base de 600 °C. Se definió en la ventana de “Vary” (>>model análisis tools >> sensitivity) la presión en el módulo del reactor RCSTR dentro de un rango de 1 bar – 100 bar, y posteriormente en “Define” se definieron las corrientes de salida para cada reactivo en OUTRX, con la finalidad de visualizar el comportamiento de cada componente a la salida del reactor.

En la figura 3.12 se observa el aumento de la concentración del CO₂ (línea roja) a la salida del reactor e inversamente proporcional el descenso del oxígeno (línea verde) hasta que la curva alcanza la estabilidad en 16.5 bares, señal de que la combustión ha alcanzado su máximo, obteniendo un rango de presión óptimo de 16.5 – 57 bares. Con lo cual, de acuerdo a las investigaciones realizadas de manera independiente por Das (2017) y Pérez (2013) ya antes descritas, se evidencia que la presión de 45 bares dentro del reactor es técnicamente viable.

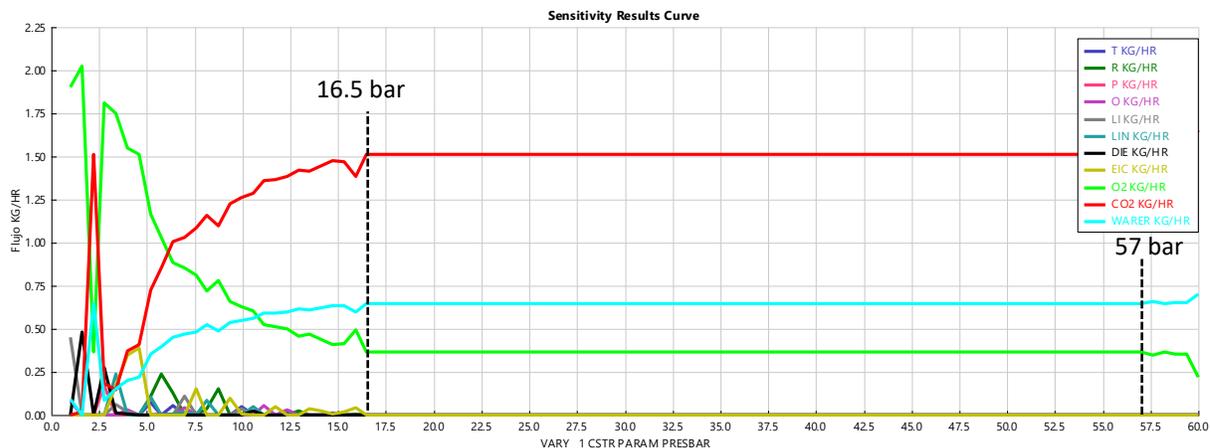


Figura 3.12 Gráfica Flujo de reactivos a la salida del reactor vs Presión en Aspen Plus v8.8

Análisis de sensibilidad 2 sobre la temperatura del sistema.

Dado que la temperatura en la cámara de combustión es un parámetro inherente a la presión alcanzada al interior de la cámara de combustión como resultado del fenómeno de compresión, el segundo análisis realizado fue enfocado en determinar la influencia de la temperatura en cuanto a la conversión de reactivos hacia productos, y en que rangos de temperatura era técnicamente viable llevar a cabo la operación del proceso con una presión base de 45 bares. Para esto se definió en la ventana de “Vary” (>>model análisis tools >> sensitivity) la temperatura de operación del reactor RCSTR dentro de un rango de 100°C – 2000°C y posteriormente en “Define” se definieron las corrientes de salida para cada reactivo en OUTRX, con la finalidad de visualizar el comportamiento de cada componente a la salida del reactor, ver figura 3.13.

Como se observa en la figura 3.13 la temperatura no ejerce una influencia en cuanto al comportamiento de la reacción o al menos no una influencia considerable, por lo cual es factible tomar la temperatura del aire que alcanza por la compresión, fenómeno que se apega al que ocurre en un motor real.

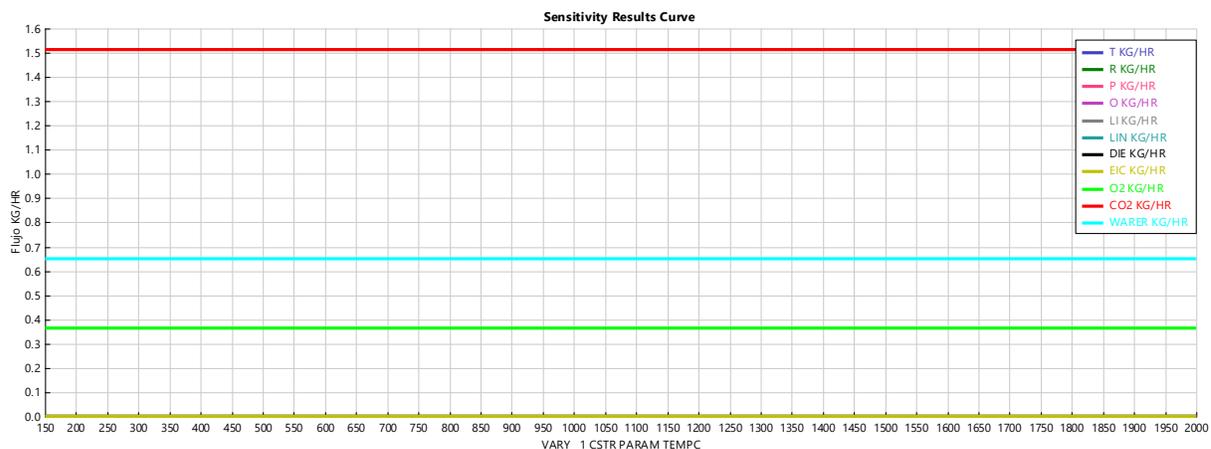


Figura 3.13 Gráfica Flujo de aire vs T en Aspen Plus v8.8.

Análisis de sensibilidad 3 sobre el flujo de aire en la conversión de las reacciones.

Una vez verificado que los rangos óptimos de operación de presión y temperatura propuestos por los autores son técnicamente viables para la simulación en Aspen Plus, se realizó un tercer análisis de sensibilidad enfocado esta vez a evaluar la influencia del flujo de aire en la conversión de la reacción, tomando una presión de 45 bares y una temperatura de 600°C. Para esto se definió en la ventana de "Vary" (>>model análisis tools >> sensitivity) el flujo en kg/h en la corriente "AIR" dentro de un rango de 5 - 11 kg/h, y posteriormente en "Define" se definieron las corrientes de salida para cada reactivo en OTRX, para visualizar el comportamiento de cada componente a la salida del reactor ver figura 3.14 y 3.15.

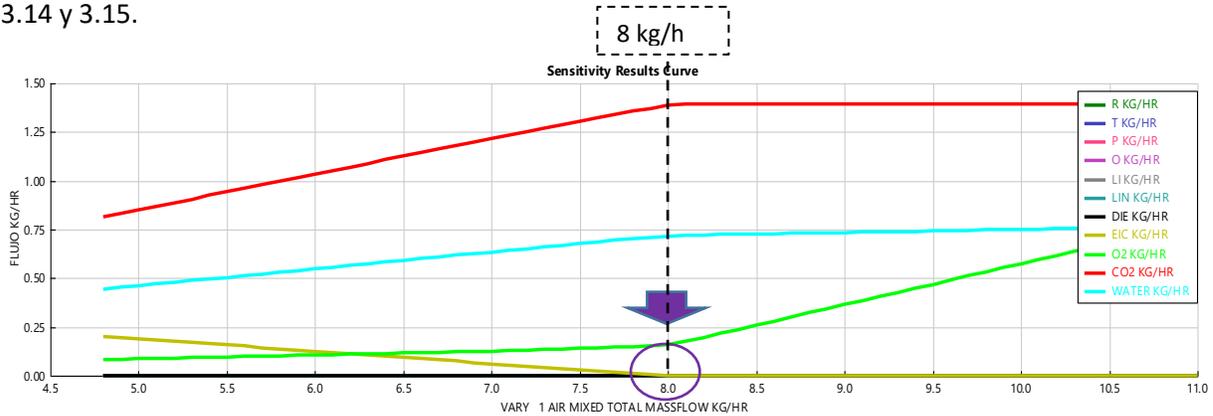


Figura 3.14 Gráfica flujo de aire vs flujo de reactivos en la corriente OTRX Aspen Plus v8.8. Las líneas de los reactivos que no se observan están traslapadas en el eje x dado que tienden a 0.

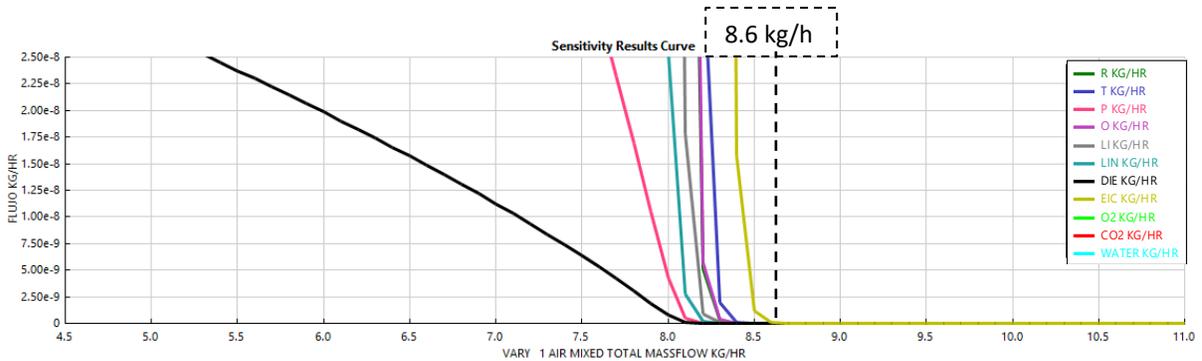


Figura 3.15 Gráfica flujo de aire vs flujo de reactivos en la corriente OTRX con ZOOM a 2.5e-08 en Aspen Plus v8.8

En la figura 3.14 se observa el aumento de la concentración del CO₂ a la salida del reactor e inversamente proporcional el descenso del oxígeno hasta que la curva alcanza la estabilidad en 8 kg/h, correspondiente al punto de inflexión, señal de que la combustión ha alcanzado su máximo, por otro lado el aire estequiométrico para este flujo según la tabla 3.10, es de 7.41 kg/h, al respecto al acercarse a la imagen, ver figura 3.15, se puede observar que la combustión tiende a completarse hasta un flujo de aproximadamente 8.6 kg/h, esto aunado a la heurística que toda combustión tiene que tener un exceso de aire para producirse una reacción completa, se determinó considerar un 30% de aire en exceso.

También en la figura 3.15 se puede observar al DIE (diésel fósil o n-Hexadecano para nuestro caso) como el primer reactante en consumirse y al Eicoseonato de metilo como el último reactante que alcanza el consumo total, mostrando al Eicoseonato de metilo como reactivo limitante, esto debido al calor de combustión de cada reacción, los cuales son de -10033.1 kJ/mol y -12437.0 kJ/mol respectivamente, como se mencionó en el apartado 3.1.3.

Análisis de sensibilidad 4 sobre la generación de energía debido a la conversión de los reactivos.

Este análisis se enfocó en evaluar la generación de energía debido a la conversión de la reacción. Para esto se definió en la ventana de “Vary” (>>model análisis tools >> sensitivity) el flujo de aire en la corriente “AIR” dentro de un rango de 1 - 11 kg/h, y en “Define” se definió la corriente de salida Duty. Esto mostro un incremento en la energía generada por la reacción hasta alcanzar un máximo con un flujo de 8 kg/h, correspondiente al punto de inflexión, con el cual la reacción alcanza una conversión completa, ver figura 3.16. Finalmente se obtuvo la simulación de Aspen Plus V8.8 con los parámetros y flujos adecuados, así como la conversión completa de los reactivos, ver figura 3.17 y tabla 3.16.

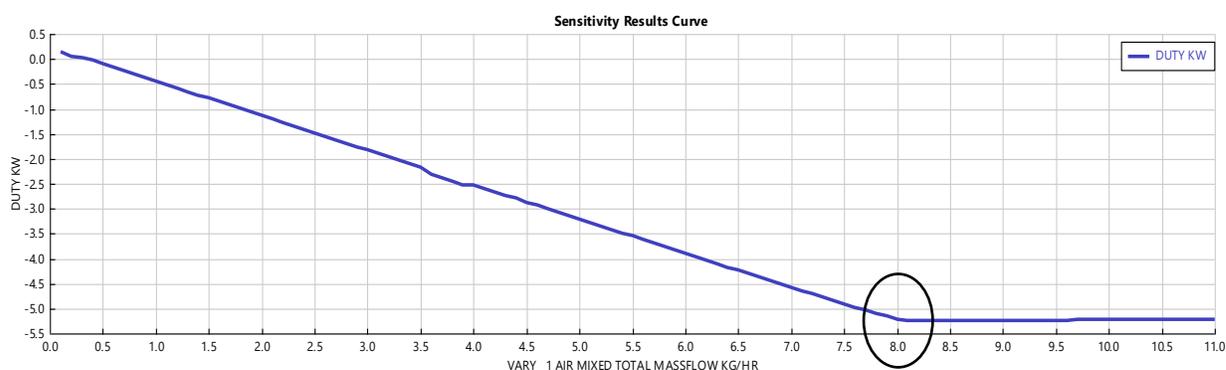


Figura 3.16 Gráfica flujo de aire vs DUTY neto del reactor CSTR en Aspen Plus v8.8

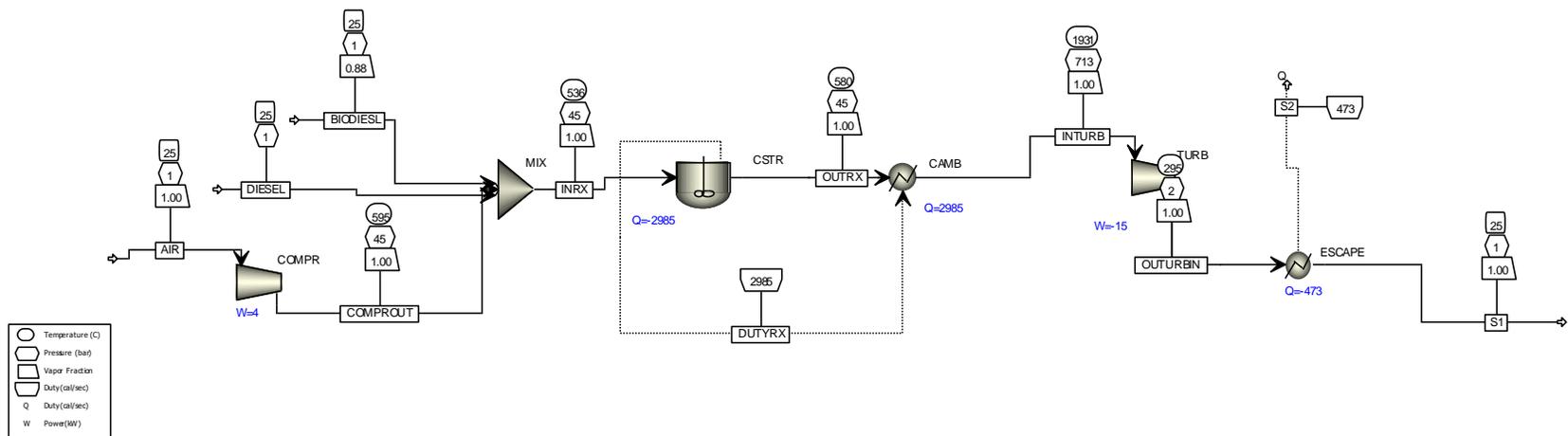


Figura 3.17 Diagrama de flujo del sistema de reacción Biodiesel de ricino-Diésel en Aspen Plus v8.8

Tabla 3.16 Datos de la corriente OUTRX generados por la simulación.

	RICINO kmol/h	OLEATE kmol/h	LINOLEAT kmol/h	STEARATE kmol/h	PALMITAT kmol/h	EICOSEON kmol/h	LINOLENA kmol/h	DIESEL kmol/h	WATER kmol/h	CO ₂ kmol/h	OXYGE- O1	NITRO- O1	TFC kmol/h	TFC kg/h
INRX	5.67E-04	2.60E-05	2.90E-05	7.26E-06	8.01E-06	2.68E-06	2.97E-06	3.52E-03	1.50E-04	0	1.35E-01	5.81E-01	7.21E-01	2.16E+01
OUTRX	0	0	0	0	0	0	0	0	7.16E-02	6.86E-02	3.19E-02	5.81E-01	7.54E-01	2.16E+01

3.3.2 VALIDACIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIÓN

Para llevar a cabo la validación del modelo propuesto, se realizaron 6 análisis de sensibilidad más, uno para cada mezcla B0 – B100, correspondientes a los análisis del 5 – 10 ver APÉNDICE II A, basados en los parámetros óptimos de operación del sistema global, obtenidos gracias a los análisis de sensibilidad antes mencionados, así como los flujos de alimentación para cada régimen de funcionamiento, mostrados en el APÉNDICE IA; estos análisis se llevaron a cabo bajo la metodología que se muestra en el diagrama de la figura 3.18, por tanto los análisis de sensibilidad realizados para la parte de validación, se enfocaron en analizar la potencia generada por el sistema tomando en consideración las curvas de eficiencia para cada mezcla, así como las curvas de temperatura a la salida del motor propuestas por Arunkumar (2018), ver figuras 3.19 y 3.20 respectivamente.

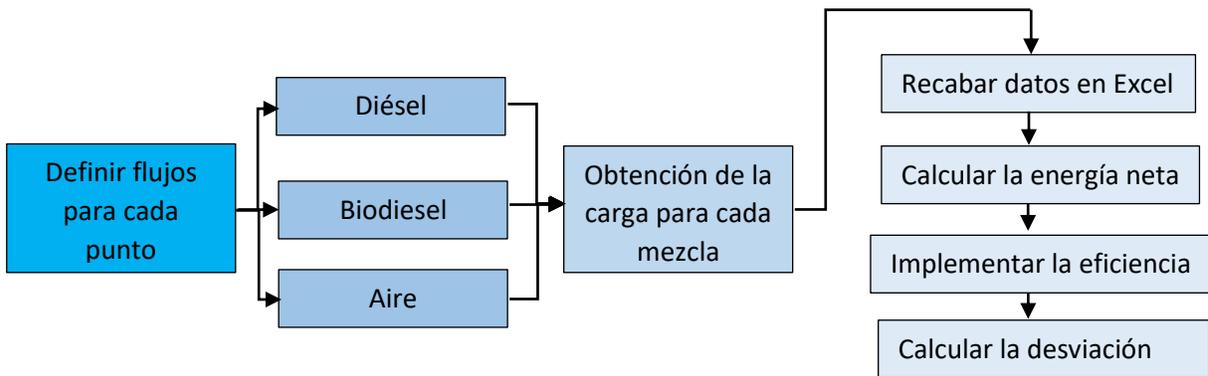


Figura 3.18. Esquema de la metodología para la obtención de las curvas de BSFC en Aspen Plus.

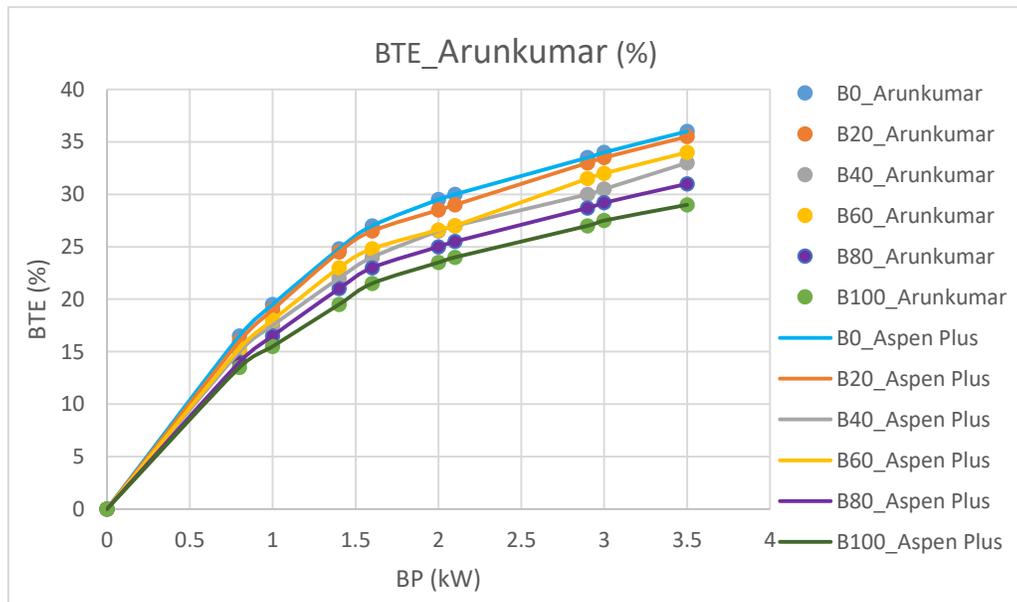


Figura 3.19 Gráfica BTE vs BP por (Arunkumar, 2018).

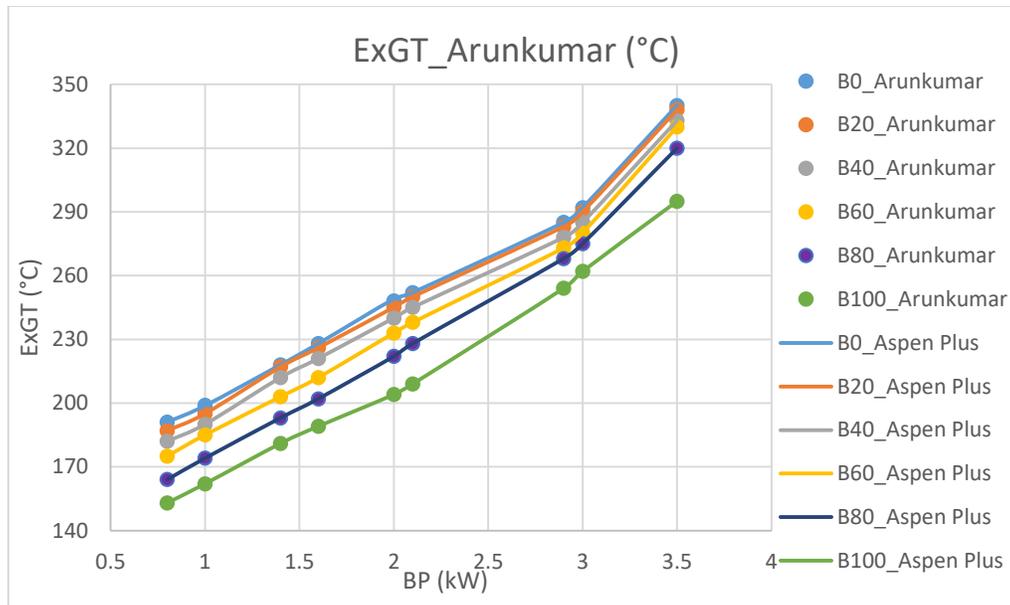


Figura 3.20 Gráfica CO₂ en la corriente de salida del reactor CSTR vs BP por (Arunkumar, 2018).

Análisis de sensibilidad de validación

Los análisis de sensibilidad del 5 – 10 se realizaron de la misma manera, es decir se varió tanto el flujo de combustible, en sus diferentes mezclas, como el flujo de aire con la humedad correspondiente; flujos ya descritos en el apartado de “caracterización del aire” ver APÉNDICE I A, los datos generados se detallan en las tablas ubicadas en el APÉNDICE II A. A través de este procedimiento se obtuvieron curvas de BP para cada mezcla, ver figura 3.21. Posteriormente con ayuda del software Microsoft Excel, se obtuvo el BSFC y BSEC a través de las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, generando las curvas de las figuras 3.22 y 3.23.

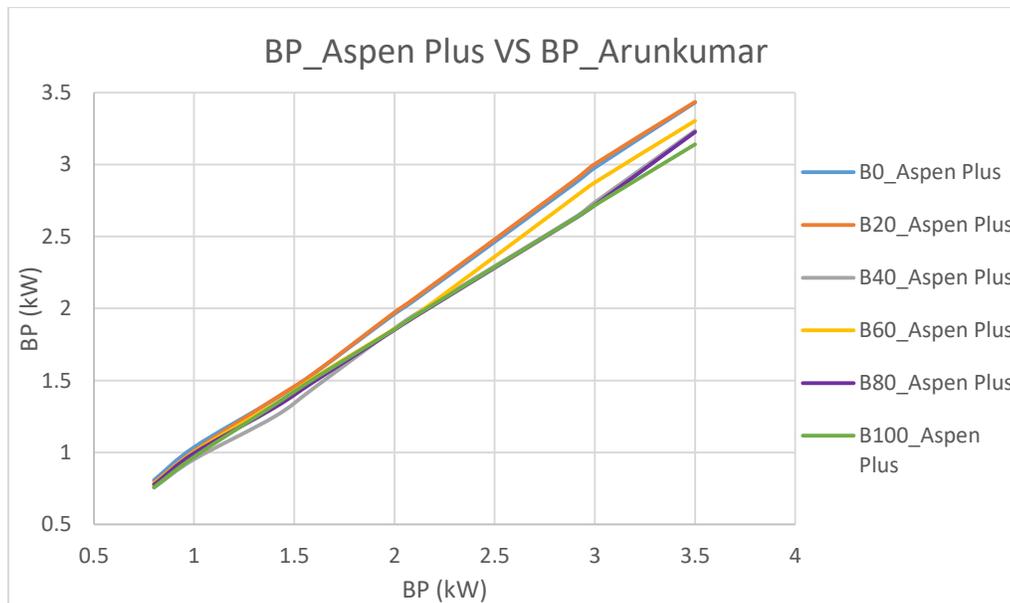


Figura 3.21 Gráfica BP_Aspen Plus (eje Y) vs escala de BP por (Arunkumar, 2018) (eje x).

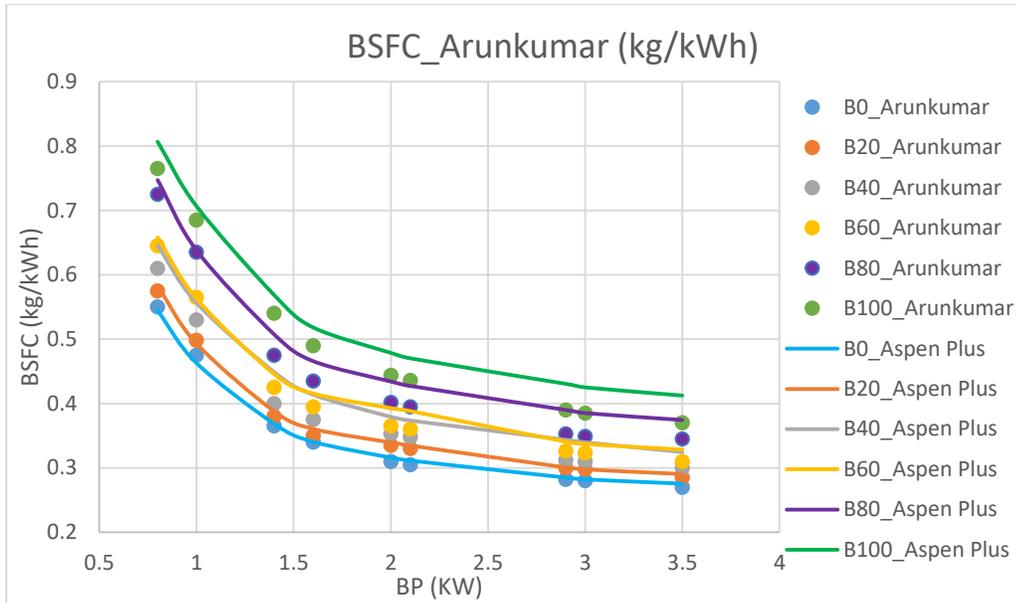


Figura 3.22 Gráfica BSFC_Aruncumar/BSFC_Aspen Plus vs BP por (Aruncumar, 2018).

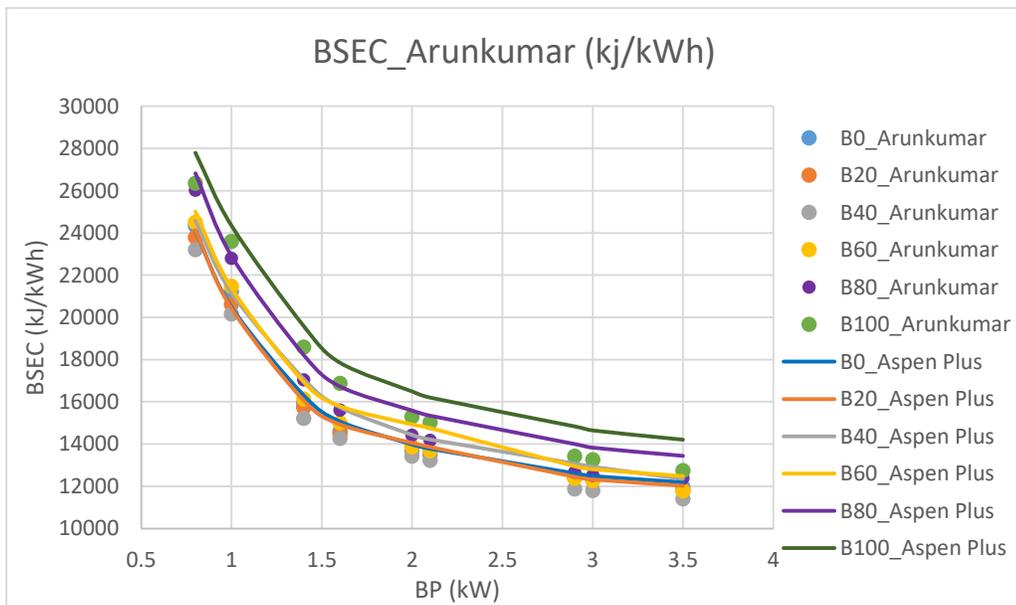


Figura 3.23 Gráfica BSEC_Aruncumar/BSEC_Aspen Plus vs BP por (Aruncumar, 2018).

Las curvas obtenidas presentan un ajuste con los datos reportados por el autor del 92.5 al 98%, como se observa en la tabla 3.17, lo cual representa una desviación del al 2 al 7.5% de mezclas B0 a B100 respectivamente.

Tabla 3.17 Ajuste promedio de los datos de Aspen Plus con respecto a los reportados.

Mezcla	Ajuste %
B0	98.0
B20	98.6
B40	92.8
B60	95.2
B80	93.0
B100	92.5

Finalmente se obtuvo la gráfica 3.24 donde se muestra la generación de CO₂ para cada mezcla propuesta.

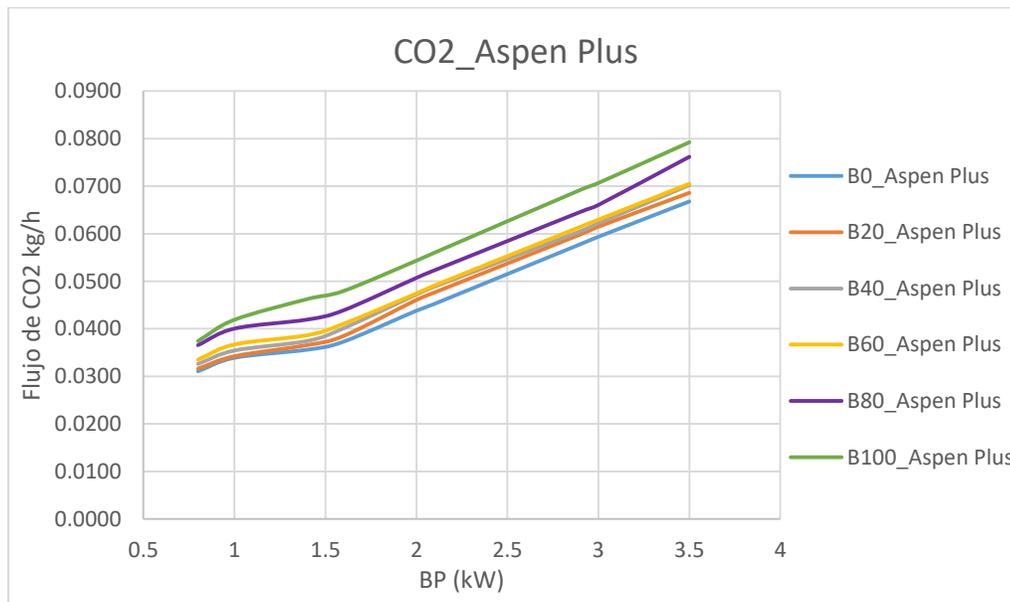


Figura 3.24 Gráfica CO₂ en la corriente de salida del reactor CSTR vs BP por (Arunkumar, 2018).

De lo anterior, dado que los datos no se ajustan en un 100 % a los datos generados por Arunkumar (2018), se propuso una eficiencia propia del sistema desarrollado en Aspen Plus, ver figura 3.25, con la cual el ajuste de los datos generados en Aspen Plus se ajustan en un 100 % con los reportados por (Arunkumar, 2018), generando por consecuencia curvas de BSFC idénticas, ver figura 3.26, y obteniendo de esa manera la validación de la simulación.

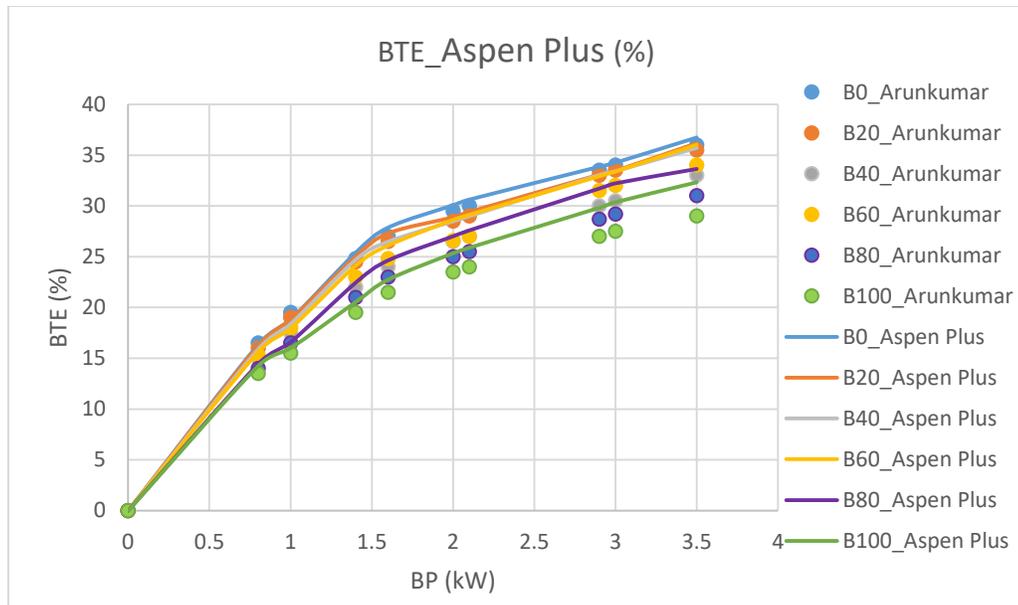


Figura 3.25 Gráfica BTE_Aspen Plus vs BTE por (Arunkumar, 2018).

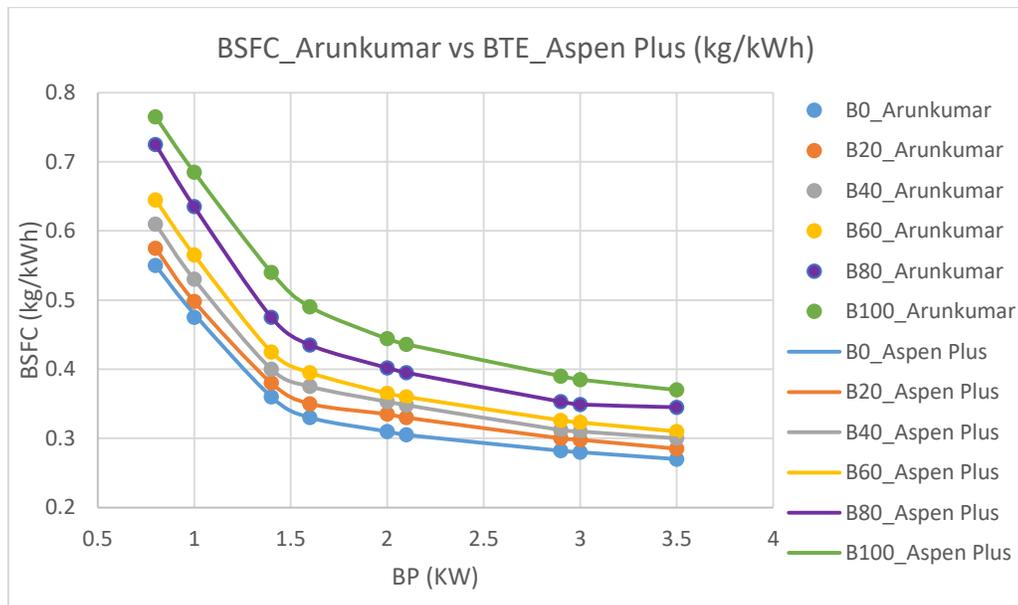


Figura 3.26 Gráfica BSFC_Aspen Plus vs BSFC por (Arunkumar, 2018).

Bajo este planteamiento se propuso emplear la eficiencia de Aspen Plus para llevar a cabo los estudios de otras mezclas y así generar resultados totalmente confiables y apegados a la realidad de los experimentos realizados de manera práctica.

3.4 ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA TERMODINÁMICA A DIFERENTES COMPOSICIONES DE MEZCLA

3.4.1 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN BIODIESEL/RICINO – DIÉSEL FÓSIL SOBRE EL RENDIMIENTO.

Una vez validada la simulación se realizaron 9 análisis de sensibilidad, correspondientes a los análisis 11 – 19, esta vez enfocados en evaluar la influencia de la variación de la concentración del biodiesel- diésel para el flujo de diésel fósil puro en cada régimen de funcionamiento específico, es decir en cada valor del BP propuesto por Arunkumar (2018) tomándolo como la escala, ver tabla 3.18. Los datos y gráficas obtenidos se presentan en el apartado de resultados y APÉNDICE II B.

Tabla 3.18 Flujo de diésel B0

BP(kW)	0.8	1	1.4	1.6	2	2.1	2.9	3	3.5
B0 flujo (kg/h)	0.44	0.48	0.504	0.528	0.62	0.6405	0.8178	0.84	0.945

Los análisis de sensibilidad se realizaron variando la concentración del biodiesel de 0 a 100 % y de manera paralela disminuyendo la concentración del biodiesel de 100 a 0 %.

Para poder llevar a cabo esta tarea se hizo uso de dos herramientas de Aspen Plus, 1) la herramienta de análisis de sensibilidad y 2) la herramienta calculador, cuya herramienta se basa en el programa de fortran y nos ayuda a calcular las variables dependientes del análisis de sensibilidad.

Para ello se comenzó por nombrar un análisis de sensibilidad como MBD (masa del biodiesel) en la ventana >> sensitivity >> new >> vary en donde se definió la variable a controlar, mass-flow del biodiesel en un rango de 0 a 100 k/h con 100 puntos de evaluación. Posteriormente en la ventana define, se definieron las variables a evaluar tales como: flujo de diésel, flujo de aire y flujo de biodiesel a la entrada del reactor, BP, CO₂ y temperatura a la salida de la turbina.

Posteriormente fue necesario calcular el flujo del diésel y el flujo de aire total para una combustión completa, para ello se hizo uso de la herramienta calculador en la ventana >> Flowsheeting options>> Calculator >> new>> donde se definieron las variables a calcular, ver tabla 3.19, MD (masa del diésel) y AIR (masa del aire estequiométrico con un 30 % de humedad), posteriormente en la ventana >>Calcúlate>>Fortran>> se programaron para cada variable las siguientes ecuaciones de cálculo:

$$MD = B0flujo - MBD \quad \text{Ec. 10}$$

$$AIR = 1.3 * ((MBD * 6.016/2.1095 + MD * 0.784/0.2264) * 100/21) \quad \text{Ec. 11}$$

Tabla 3.19 variables generadas por el análisis de sensibilidad y el calculador.

Variables a importar	MBD	
Variables a exportar	MD	AIR

3.4.2 ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE BIODIESEL/RICINO-BIODIESEL/GIRASOL-DIÉSEL

La mezcla de diferentes tipos de biodiesel para alcanzar mejores rendimientos es una opción viable que se está desarrollando actualmente y se están presentando una gran variedad de investigaciones al respecto, por lo cual se propuso analizar el rendimiento de dos tipos de mezcla, 1) mezcla: Biodiesel/ricino – Biodiesel/girasol – Diésel, que se presenta en este apartado y 2) mezcla: Biodiesel/ricino – Aceite/ricino – Pentanol – Diésel, que se presenta en el siguiente apartado.

Para analizar este caso se realizaron 6 análisis de sensibilidad, correspondientes a los análisis 20 – 25, enfocados en evaluar el rendimiento energético para cada mezcla B0 – B100. Los datos y gráficas obtenidos se presentan en el apartado de resultados y APÉNDICE II C.

Mecanismo de reacción de la mezcla de biodiesel/ricino-biodiesel/girasol-diésel.

Para la simulación del sistema de reacción Biodiesel de ricino-girasol-diésel fósil se tomaron nuevamente como base las reacciones de combustión del biodiesel de ricino para cada uno de sus componentes así como la del diésel, conformadas por las reacciones R1 – R8, para el caso del biodiesel de girasol no fue necesario desarrollar nuevas reacciones químicas, debido a que todos los componentes que conforman el biodiesel de girasol se encuentran también en el biodiesel de ricino, solo hizo falta determinar su composición química la cual esta descrita en la tabla 2.4 del apartado 2 por Sánchez-Borroto, (2012). Además al igual que los sistemas de reacción anteriores se consideraron las reacciones como combustión completa (Pérez Armando, 2013).

Siguiendo con la secuencia se determinaron los flujos de alimentación tanto de combustible como de aire, ver APÉNDICE I B, en la tabla 3.20 se muestran los flujos para el caso B20.

Tabla 3.20. Flujos máscicos B20 Para biodiesel de ricino- biodiesel de girasol- diésel.

BP (kW)	Flujo máscico (kg/h) Concentraciones de biodiesel-Ricino-Girasol / diésel -fósil				
	20% bio	Biodiesel	Girasol	80%diesel	Aire
0.8	0.0920	0.046	0.046	0.3680	9.5190
1	0.0996	0.0498	0.0498	0.3984	10.3054
1.4	0.1064	0.0532	0.0532	0.4256	11.0090
1.6	0.1120	0.056	0.056	0.4480	11.5884
2	0.1340	0.067	0.067	0.5360	13.8647
2.1	0.1386	0.0693	0.0693	0.5544	14.3406
2.9	0.1740	0.087	0.087	0.6960	18.0034
3	0.1788	0.0894	0.0894	0.7152	18.5000
3.5	0.1995	0.09975	0.09975	0.7980	20.6418

Para llevar a cabo la simulación solo se agregó una corriente de entrada BGIRSOL, ver figura 3.27, para alimentar las concentraciones de pentanol y aceite de ricino en sus diferentes flujos, manteniendo todos los parámetros de la simulación validada, obteniendo una combustión completa, ver tabla 3.21.

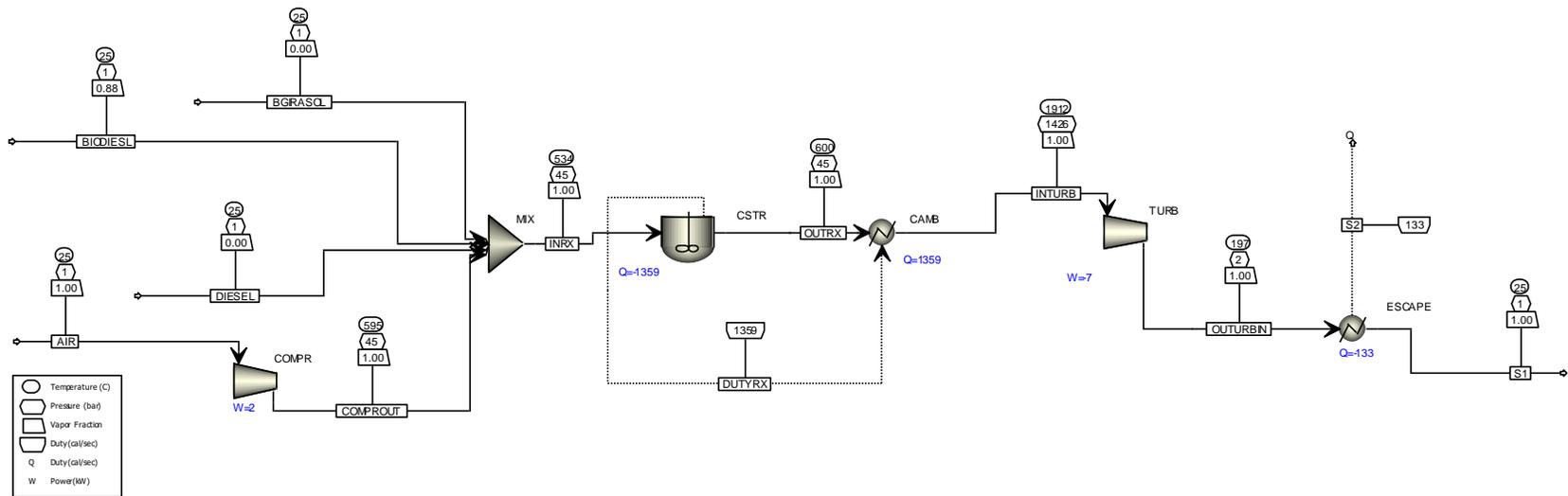


Figura 3.27. Diagrama de flujo del sistema de reacción Biodiesel de ricino-Biodiesel de Girasol-Diésel en Aspen Plus v8.8

Tabla 3.21 Datos de la corriente OUTRX generados por la simulación para biodiesel de ricino y girasol.

	RICINO kmol/h	OLEATE kmol/h	LINOLEAT kmol/h	STEARATE kmol/h	PALMITAT kmol/h	EICOSEON kmol/h	LINOLENA kmol/h	DIESEL kmol/h	WATER kmol/h	CO ₂ kmol/h	OXYGE- O1	NITRO- O1	TFC kmol/h	TFC kg/h
INRX	1.3E-04	4.350E-05	1.09E-04	7.99E-06	1.12E-05	6.17E-07	1.62E-06	1.6E-03	1.2E-02	0	9.1E-02	3.86E-01	4.9E-01	14.46
OUTRX	0	0	0	0	0	0	0	0	4.5E-02	3.1E-02	4.3E-02	3.86E-01	4.9E-01	14.46

3.4.3 MEZCLA BIODIESEL DE RICINO-ACEITE DE RICINO-PENTANOL-DIÉSEL FÓSIL

Para llevar cabo el análisis de la mezcla Biodiesel/ricino-Aceite/ricino-Pentanol-Diésel, se tomó como base la investigación desarrollada por Sai Manoj, (2020), quien llevo a cabo una investigación sobre la implementación de una mezcla de biodiesel con aceite y pentanol mezclado con diésel fósil bajo diferentes concentraciones, el implementó una mezcla de 50 % diésel 20% biodiesel 20% Pentanol y 10 % de aceite de palma, al respecto se propuso analizar la misma hipótesis pero con mezclas acordes a este proyecto, para lo cual se propuso una mezcla para el biodiesel de 40% Biodiesel de ricino, 40 Pentanol y 20% Aceite de ricino, y así evaluar la influencia de la mezcla al combinarse con el diésel en mezclas B0 – B100, ver APÉNDICE I C.

Para analizar este caso se realizaron 6 análisis de sensibilidad, correspondientes a los análisis 26 – 31, enfocados en evaluar el rendimiento energético para cada mezcla B0 – B100. Los datos y gráficas obtenidos se presentan en el apartado de resultados y APÉNDICE II D.

Mecanismo de reacción

Para la simulación del sistema de reacción Biodiesel/ricino – aceite/ricio-pentanol - diésel fósil se tomaron como base las reacciones de combustión del biodiesel para cado uno de sus componentes, conformadas por las reacciones R1 – R7, R8, R9 – R15 y R16 cuyas reacciones corresponden al biodiesel de ricino, diésel fósil, aceite de ricino y pentanol respectivamente. Considerando las reacciones como combustión completa (Pérez Armando, 2013).

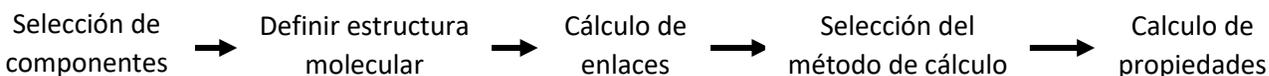
Ecuaciones de reacción:		Calor de combustión (kJ/mol)	N° de reacción
Ácido ricinoleico	$C_{18}H_{34}O_3 + 25O_2 \rightarrow 17H_2O + 18CO_2$	-10384.8	R9
Ácido oleico	$C_{18}H_{34}O_2 + 25.5O_2 \rightarrow 17H_2O + 18CO_2$	-10484.0	R10
Ácido linoleico	$C_{18}H_{32}O_2 + 25O_2 \rightarrow 16H_2O + 18CO_2$	-10389.3	R11
Ácido estérico	$C_{18}H_{36}O_2 + 26O_2 \rightarrow 18H_2O + 18CO_2$	-10672.0	R12
Ácido palmítico	$C_{16}H_{34}O_2 + 23O_2 \rightarrow 16H_2O + 16CO_2$	-9442.27	R13
Ácido eicoseanoico	$C_{20}H_{48}O_2 + 28.5O_2 \rightarrow 19H_2O + 20CO_2$	-11782.2	R14
Ácido linolenico	$C_{18}H_{30}O_2 + 24.5O_2 \rightarrow 15H_2O + 18CO_2$	-1096.60	R15
Pentanol	$C_5H_{12} + 7.5O_2 \rightarrow 6H_2O + 5CO_2$	-3122.77	R16

En la tabla 3.22 se muestran los flujos tanto para el combustible como para el aire y la humedad, bajo la misma metodología antes descrita, basada en la estequiometría de la reacción.

Tabla 3.22 Flujos máxicos B20 Para biodiesel-ricino-Aceite de ricino-Pentanol / diésel –fósil.

BP (kW)	Flujo máxico (kg/h) Concentraciones de biodiesel-ricino-Aceite de ricino-Pentanol / diésel -fósil					
	20% bio	BIODIESEL	ACEITE-ricino	PENTANOL	80%diesel	Aire
0.8	0.0920	0.0368	0.0184	0.0368	0.3680	9.4879
1	0.0996	0.03984	0.01992	0.03984	0.3984	10.2717
1.4	0.1064	0.04256	0.02128	0.04256	0.4256	10.9730
1.6	0.1120	0.0448	0.0224	0.0448	0.4480	11.5505
2	0.1340	0.0536	0.0268	0.0536	0.5360	13.8194
2.1	0.1386	0.05544	0.02772	0.05544	0.5544	14.2938
2.9	0.1740	0.0696	0.0348	0.0696	0.6960	17.9446
3	0.1788	0.07152	0.03576	0.07152	0.7152	18.4396
3.5	0.1995	0.0798	0.0399	0.0798	0.7980	20.5744

Al igual que para el ricinolato de metilo y eicoseonato de metilo, también fue necesario determinar la energía de Gibbs y entalpia de formación para el ácido ricinoleico y el ácido eicoseanoico así como la presión de vapor para el ácido ricinoleico, utilizando la misma metodología ya antes mencionada.



1. Seleccionar componente:

Ácido ricinoleico
Ácido eicoseanoico

2. Definición de estructura molecular de cada componente, figura 3.28 y 3.29 respectivamente.

>>> Componentes >>> Estructura de la molécula >>> Estructura >>> Calculo de enlaces

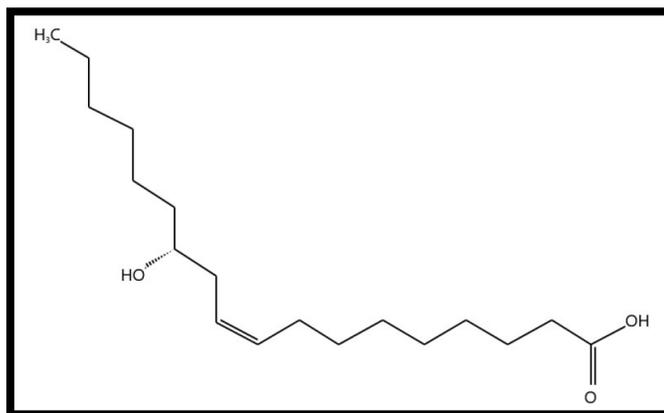


Figura 3.28 Ácido ricinoleico (NIST, 2020).

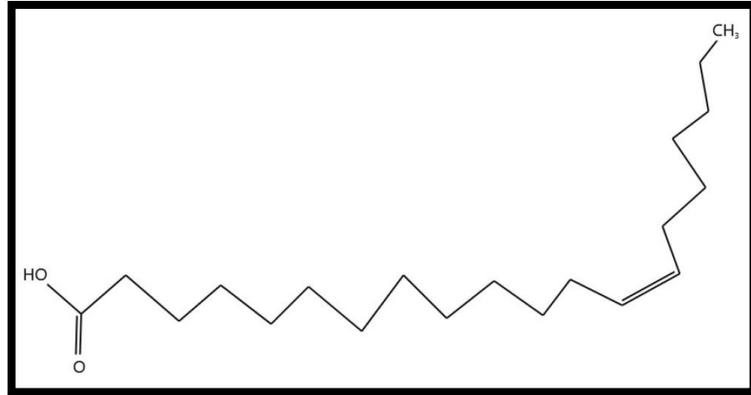


Figura 3.29 Ácido eicosanoico (NIST, 2020).

3. Selección del método de cálculo:
 >>> Estimación >>> Todos los parámetros >>> Componentes puros >>> métodos Joback

4. Estimación de propiedades
 DGFPRM
 DHFORM
 OMEGA (factor acéntrico)
 T – Dependiente Método LI – MA
 PLXANT (Presión de vapor)

Las propiedades determinadas por el complemento de Aspen Plus se presentan en las tablas 3.22 y 3.24.

Tabla 3.23. Propiedades determinadas de valor escalar.

PropertyName	Parameter	Ácido ricinoleico	Ácido Eicosanoico	Units	Method
NORMAL BOILING POINT	TB		806.67	κ	JOBACK
CRITICAL PRESSURE	PC		1.56E-01	kPa	JOBACK
CRITICAL COMPRES.FAC	ZC		4.67E+05		DEFINITI
IDEAL GAS CP AT 300 K			7.00E+05	J/KMOL-K	BENSON
AT 500 K			1.04E+06	J/KMOL-K	BENSON
AT 1000 K			-1.46E+08	J/KMOL-K	BENSON
STD.FREE ENERGY FORM	DGFORM	-3.02E+08	1.01E+05	J/KMOL	JOBACK
VAPOR PRESSURE AT TB		1.01E+05	1.46E+05	kPa	LI-MA
AT 0.9*TC		1.43E+04	2.41E+05	kPa	LI-MA
AT TC		5.75E+04	2.53E-01	kPa	LI-MA
ACENTRIC FACTOR	OMEGA		1.84E+07		DEFINITI
HEAT OF VAP AT TB	DHVLB		8.76E-01	J/KMOL	DEFINITI
LIQUID MOL VOL AT TB	VB		1.56E-01	CUM/KMOL	GUNN-YAM
PARACHOR	PARC	769.6	835.3		PARACHOR

Tabla 3.24. Presión de vapor dependiente de la temperatura.

Presión de vapor (PLXANT)	
Ácido ricinoleico	
Temperatura	C
Presión	bar
1	91.3823279
2	-16989.5277
3	0
4	0
5	-8.88213102
6	2.35274953E-20
7	6
8	568.4
9	812

Para llevar a cabo la simulación solo se agregaron dos corrientes de entrada PENTANOL Y ACEITE, ver figura 3.30, para alimentar las concentraciones de pentanol y aceite de ricino en sus diferentes flujos, manteniendo todos los parámetros de la simulación validada, generando una combustión completa, como se puede observar en la tabla 3.25a y 3.25b.

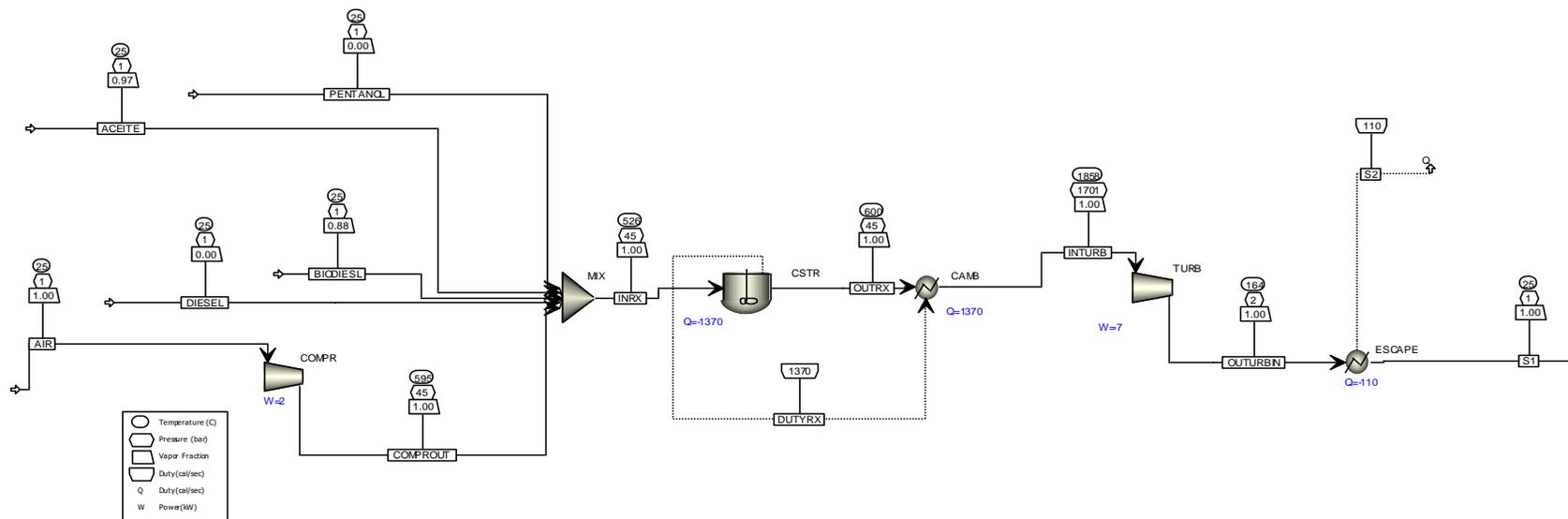


Figura 3.30 Diagrama de flujo del sistema de reacción Biodiesel/ricino- Aceite/ricino-Pentanol-Diesel en Aspen Plus v8.8

Tabla 3.25a Datos de la corriente OUTRX generados por la simulación para Biodiesel/ricino- Aceite/ricino-Pentanol-Diesel en Aspen Plus v8.8

Bio	RICINO kmol/h	OLEATE kmol/h	LINOLEAT kmol/h	STEARATE kmol/h	PALMITAT kmol/h	EICOSEON kmol/h	LINOLENA kmol/h	DIESEL kmol/h	WATER kmol/h	CO ₂ kmol/h	OXYGE- 01 kmol/h	NITRO- 01 kmol/h	TFC kmol/h	TFC kg/h
INRX	1.04E-04	4.790E-06	5.35E-06	1.33E-06	1.47E-06	4.94E-07	5.48E-07	1.6E-03	1.2E-02	0	9.1E-02	3.86E-01	4.9E-01	14.46
OUTRX	0	0	0	0	0	0	0	0	4.5E-02	3.1E-02	4.4E-02	3.86E-01	4.9E-01	14.46

Tabla 3.25b Datos de la corriente OUTRX generados por la simulación para Biodiesel/ricino- Aceite/ricino-Pentanol-Diesel en Aspen Plus v8.8

Aceite	RICINO kmol/h	OLEATE kmol/h	LINOLEAT kmol/h	STEARATE kmol/h	PALMITAT kmol/h	EICOSEON kmol/h	LINOLENA kmol/h	Pentanol kmol/h
INRX	5.49E-05	2.14E-06	3.02E-06	7.5E-07	7.24E-07	2.01E-07	3.17E-07	4.17E-04
OUTRX	0	0	0	0	0	0	0	0

4. RESULTADOS

Resultados del análisis de la variación de la concentración biodiesel/ricino – diésel fósil sobre el rendimiento.

Una vez validada la simulación fue posible analizar la influencia de la variación de la concentración de la mezcla biodiesel/ricino – Diésel fósil como se mostró en el apartado 3.4.1, donde se encontró que la diferencia porcentual neta entre la mezcla B0 y B100 en cuanto al BP y BSFC es de 19.27 %, es decir que con la alimentación de biodiesel al 100% hay una reducción del BP del 19.27% y por consiguiente se requiere de un aumento de 19.27% de combustible para obtener la misma potencia generada por la mezcla B0 (diésel puro), ver figuras 4.1, 4.2a y 4.2b respectivamente. En cuanto al ExGT la reducción en promedio es de 4% entre la mezcla B0 y B100 a flujo constante, ver figura 4.3. Tablas de resultados en APÉNDICE II B.

Con la implementación de mezclas B20 se presenta una reducción del BP y un incremento del BSFC de 3.7 %, paramento que considera como la perdida máxima tolerable para la implementación según Arunkumar (2018).

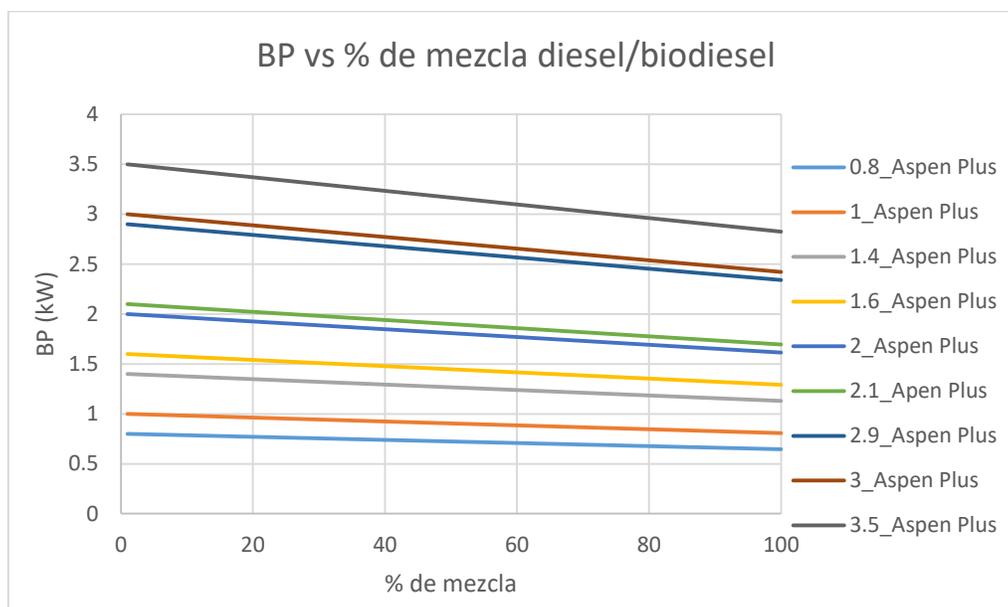


Figura 4.1 Gráfica BP vs concentración de mezcla, Aspen Plus.

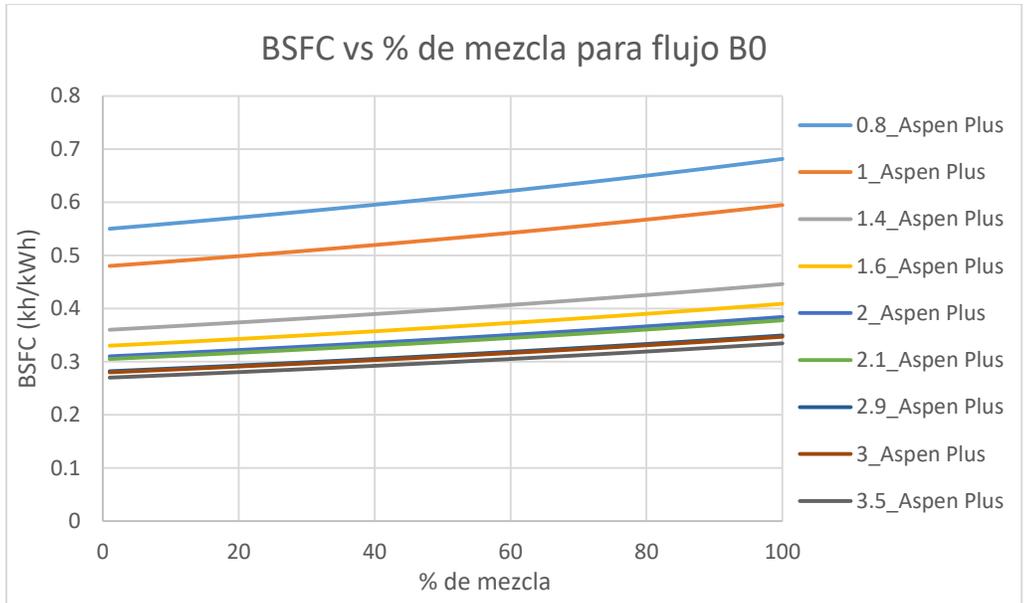


Figura 4.2a Gráfica BSFC a flujo constante de B0 (kg/h) vs concentración de mezcla, Aspen Plus.

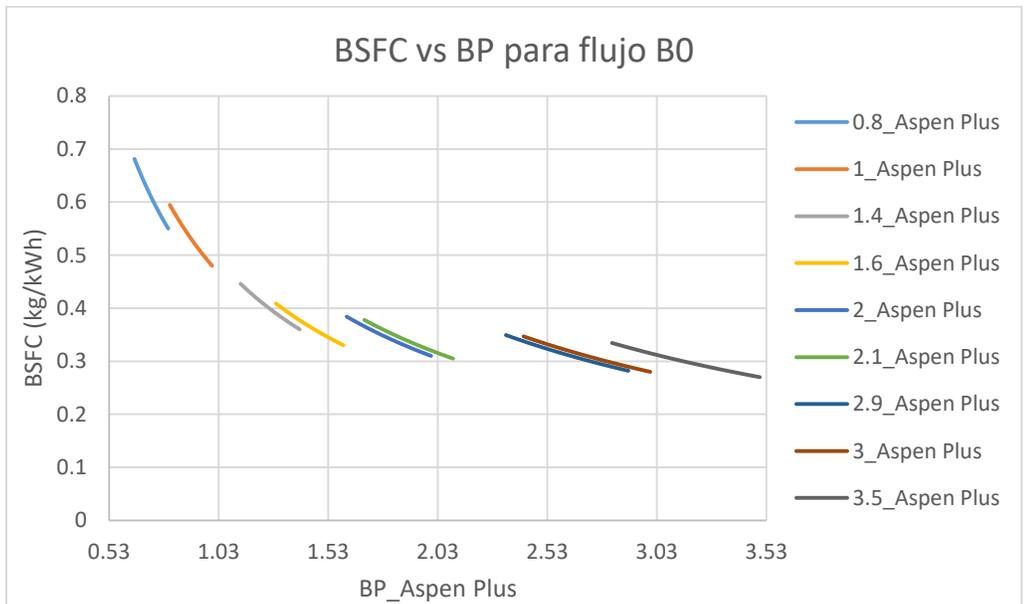


Figura 4.2b Gráfica BSFC a flujo constante de B0 (kg/h) con mezcla de B100-B0 vs BP generado, Aspen Plus.

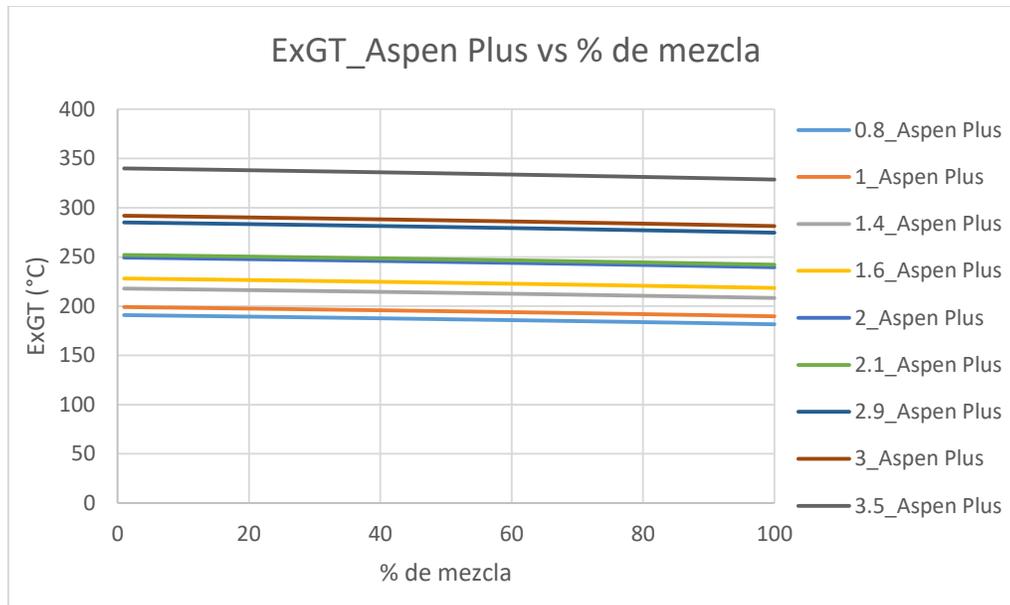


Figura 4.3 Gráfica ExGT vs Concentración de mezcla, Aspen Plus.

Resultados del análisis de la mezcla de biodiesel/ricino - biodiesel/girasol - diésel.

Como se presentó en el apartado 3.4.2, se propuso analizar el rendimiento energético de la mezcla de Biodiesel/ricino – Biodiesel/Girasol – Diésel fósil para encontrar la forma de aumentar la concentración de la mezcla manteniendo la reducción del 3.7% mencionada anteriormente, para ello se tomaron las siguientes consideraciones:

- Los resultados del análisis de esta mezcla son confiables debido a que la composición del biodiesel de girasol, contiene los mismos componentes que el biodiesel de ricino, a excepción del Ricinolato de metilo, solo que con concentraciones diferentes, lo cual supone que el comportamiento es influenciado que tiene todos y cada uno de ellos sobre la mezcla se modelan correctamente debido a la validación previa de la simulación.
- Aunque la concentración de la mezcla biodiesel/ricino – biodiesel/girasol es de 50/50, la concentración en la mezcla final del biodiesel de girasol, al menos para en caso B20, es de apenas el 10%, además el componente que se encuentra en mayor proporción es el linoleato de metilo con una concentración del 65%, al respecto si se encontraran componentes en concentraciones mínimas en el biodiesel, para la mezcla final su influencia sería irrelevante.
- Se propuso utilizar mezclas 50/50 para el biodiesel de ricino y biodiesel de girasol debido a que bajo este análisis se puede definir el comportamiento de la mezcla desde un punto medio, por lo que a partir de los resultados arrojados por el mismo, se podrá inferir el comportamiento en el rendimiento energético al utilizar mezclas más ricas ya sea de uno o de otro componente para el caso de la mezcla de biodiesel.

Bajo este análisis se encontró que la diferencia porcentual neta entre la mezcla B0 y B100 en cuanto al BP y BSFC es de 16.87%, es decir que con la alimentación de biodiesel al 100% hay una reducción del BP del 16.87% y por consiguiente se requiere de un aumento de 16.87% de combustible para obtener la misma potencia generada por la mezcla B0 (diésel puro), ver figura 4.4 y 4.5 respectivamente. En cuanto al ExGT la reducción en promedio es de 4 % entre la mezcla B y B100 a flujo constante, ver figura 4.6.

Con la implementación de mezclas B20 se presenta una reducción del BP y un incremento del BSFC de 3.3%.

Finalmente se generaron las curvas de CO2 para cada caso, ver figura 4.7. Tablas de resultados en APÉNDICE II C.

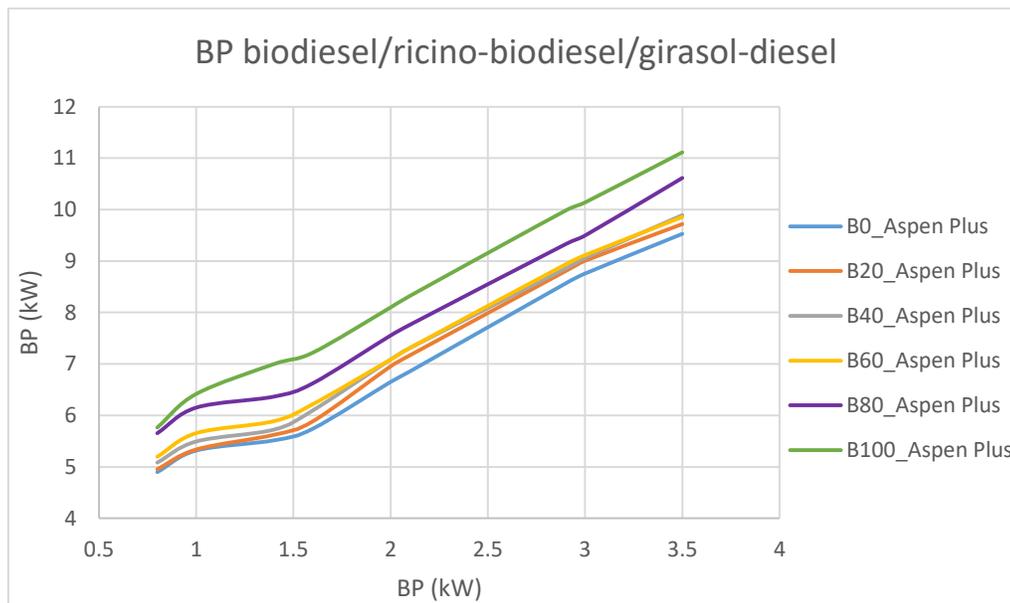


Figura 4.4 Gráfica BP_Aspen Plus (eje Y) vs escala de BP por Arunkumar, (2018), (eje x), para biodiesel ricino-girasol-diésel

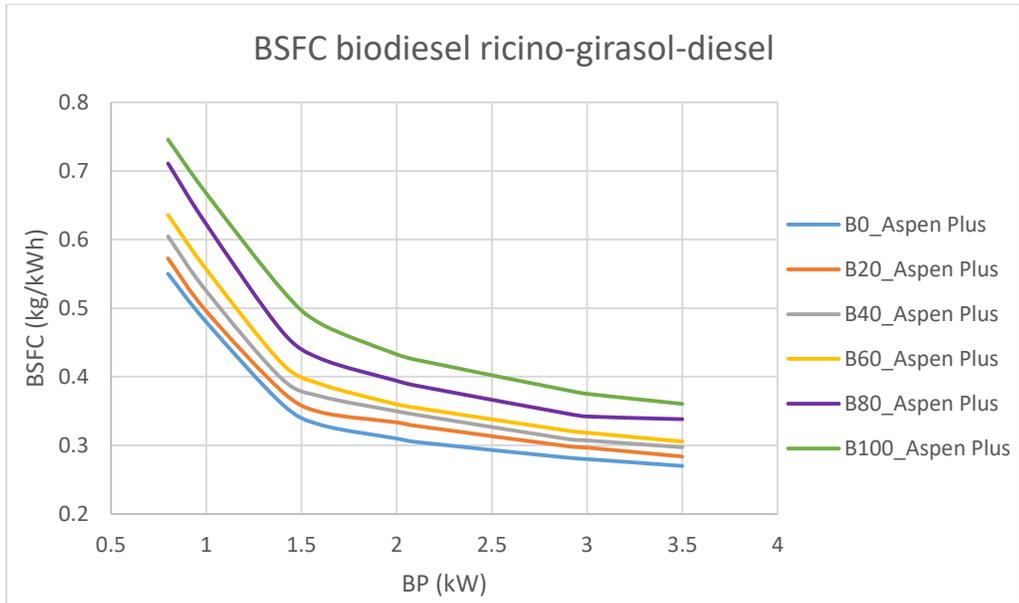


Figura 4.5 Gráfica BSFC_Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).

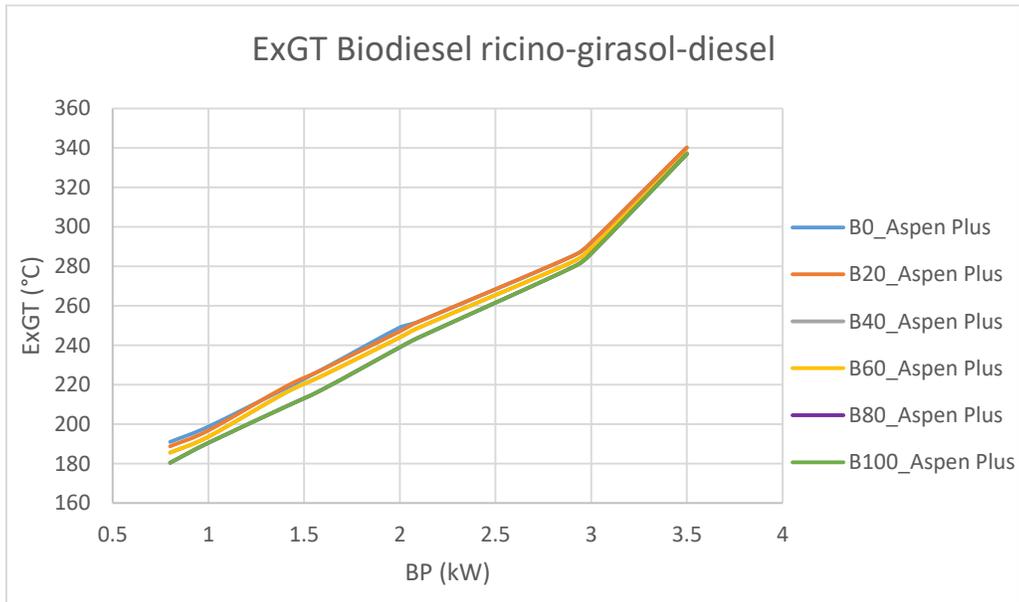


Figura 4.6 Gráfica BSFC_Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).

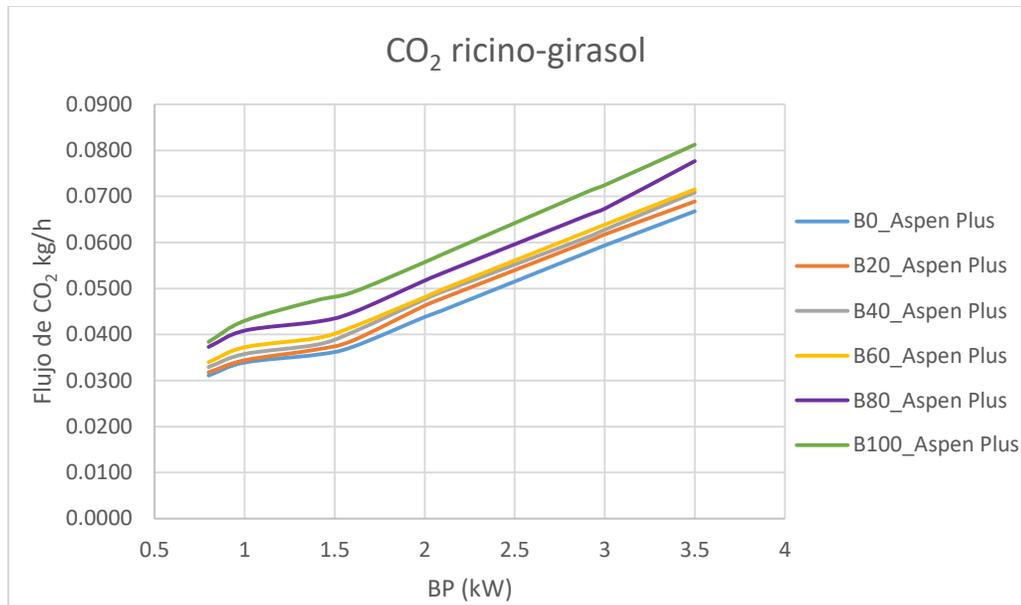


Figura 4.7 Gráfica CO₂_Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).

Resultados de la mezcla biodiésel/ricino – aceite/ricino – pentanol - diésel fósil.

Como se mostró en el apartado 3.4.3, otra propuesta fue analizar el rendimiento energético de la mezcla de Biodiésel/ricino - Aceite/ricino - Pentanol - Diésel fósil, para determinar su comportamiento y verificar su viabilidad. Para ello se tomaron las siguientes consideraciones:

- La concentración del biodiésel en la mezcla B20 es de 8% biodiésel/ricino, 8% de Aceite de ricino y 4% de pentanol, presentando una concentración baja con respecto al diésel fósil que es del 80%, por lo cual la influencia que ejercen todos y cada uno de ellos es mínima y por lo tanto es posible analizar la variación de esta mezcla con la metodología y simulación validada.
- La caracterización del Aceite de ricino se hizo bajo la misma metodología que se utilizó para el Biodiésel de ricino, presentando inclusive muchos de los parámetros inexistentes, además la composición del biodiésel de ricino y del aceite de ricino contienen los mismos componentes, es decir que los ácidos presentes en el aceite de ricino, se presentan en el biodiésel como ésteres transesterificados.
- Las propiedades y concentraciones para el Aceite de ricino y Biodiésel de ricino se tomaron de la investigación desarrollada por Tamilselvan (2017), quien caracterizó su composición y propiedades, e incluso las propiedades de mezclas B20 – B100.

Bajo este análisis se encontró que la diferencia porcentual neta entre la mezcla B0 y B100 en cuanto al BP y BSFC es de 19.9%, es decir que con la alimentación de biodiésel al 100% hay una reducción del BP del 19.9% y por consiguiente se requiere de un aumento de 19.9% de combustible para obtener la misma potencia generada por la mezcla B0 (diésel puro), ver figuras 4.8 y 4.9 respectivamente. En cuanto al ExGT la reducción en promedio es de 4 % entre la mezcla B0 y B100 a flujo constante ver figura 4.10.

Con la implementación específicamente de mezclas B20 se presenta una reducción del BP y un incremento del BSFC de 3.9 %, lo cual sugiere una mezcla inviable. Finalmente se generaron las curvas de CO₂ para este caso, ver figura 4.11. Tablas de resultados en APÉNDICE II D.

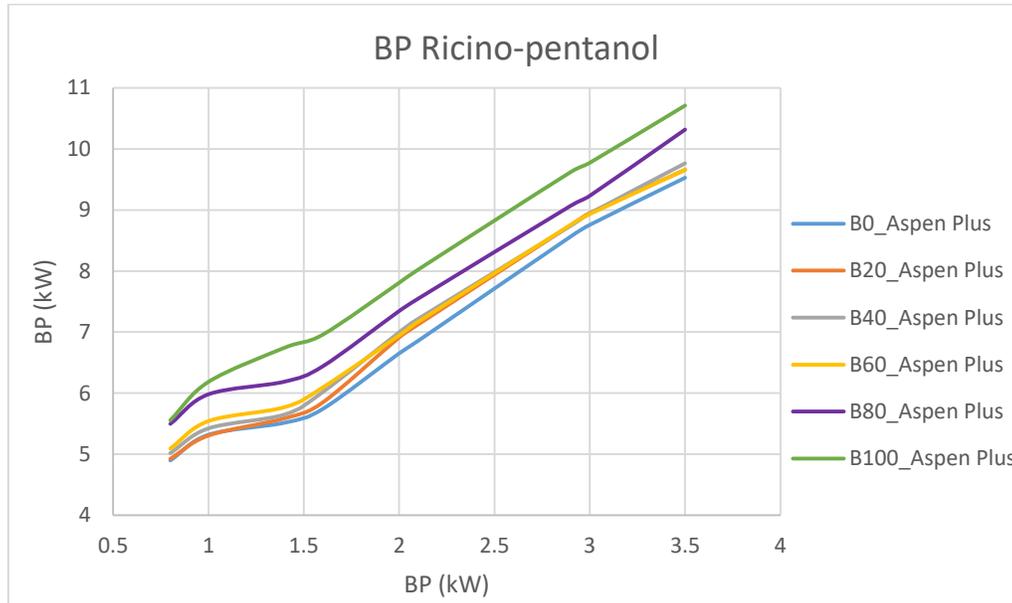


Figura 4.8 Gráfica BP_Aspen Plus (eje Y) vs escala de BP por Arunkumar, (2018), para biodiesel ricino-Aceite de ricino – Pentano –diésel

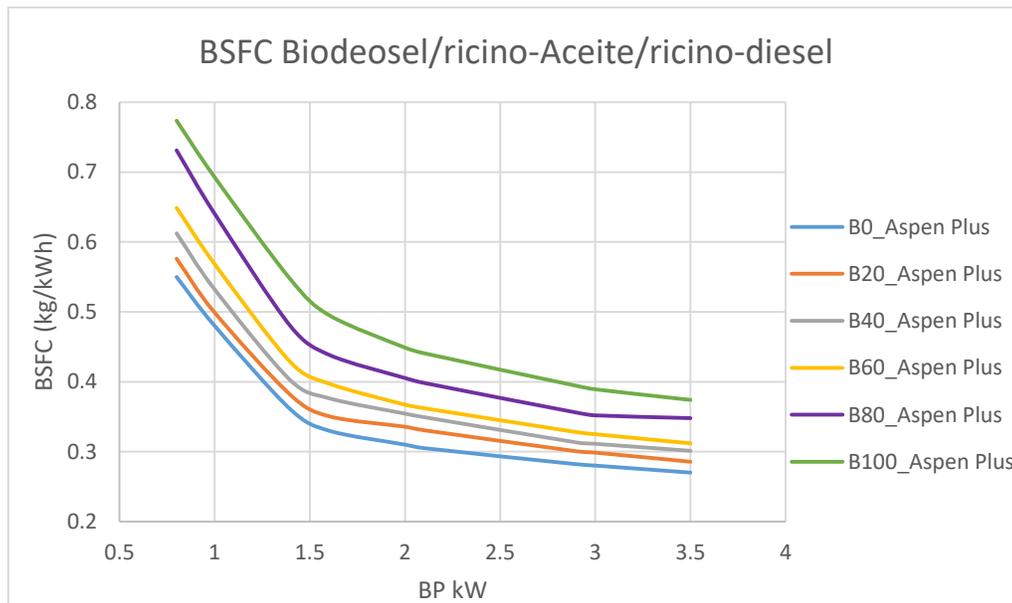


Figura 4.9 Gráfica BSFC_Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).

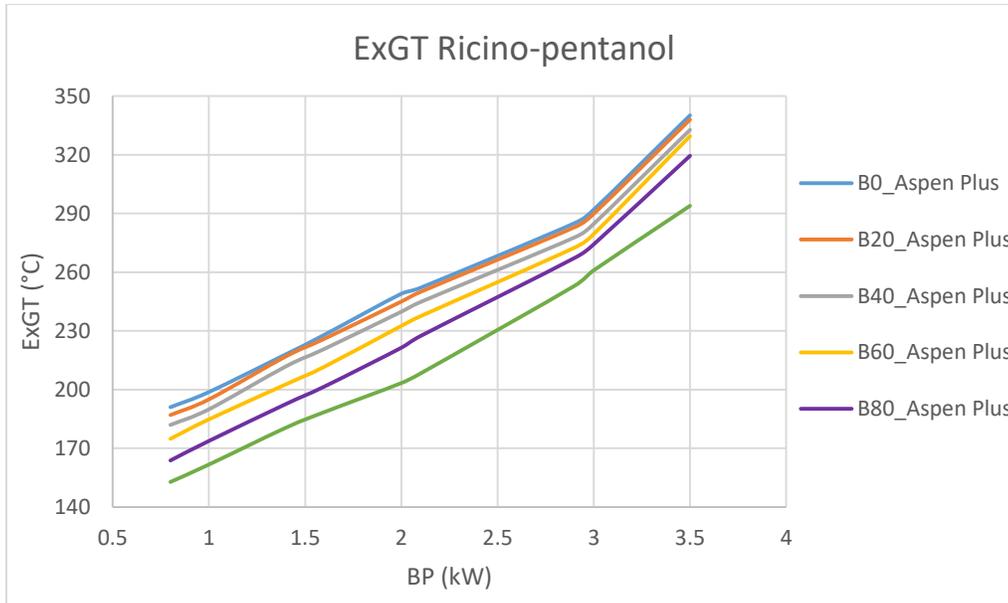


Figura 4.10 Gráfica BSFC_Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).

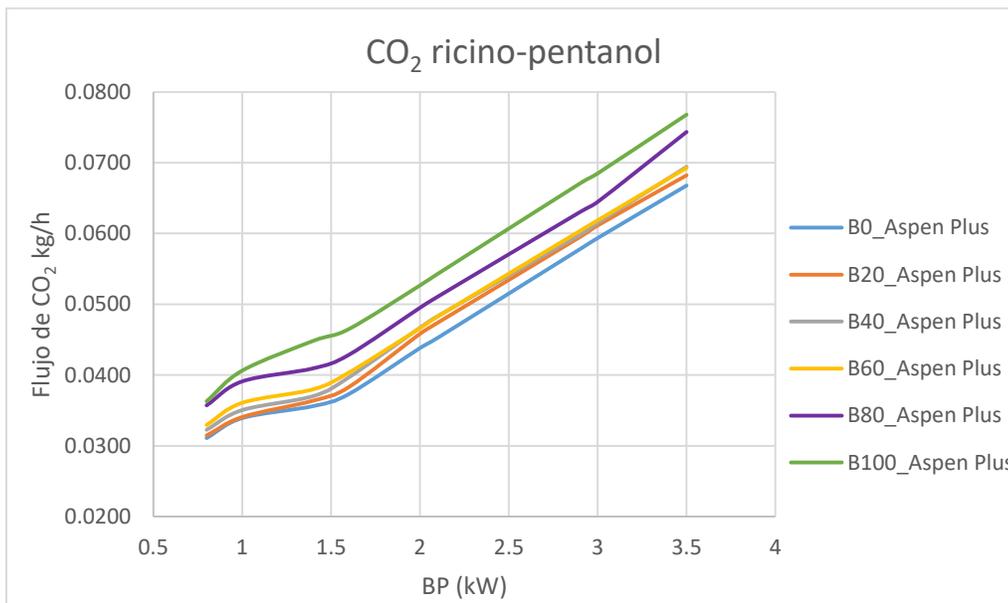


Figura 4.11 Gráfica CO₂_Aspen Plus vs escala de BP por Arunkumar, (2018).

Comparativa entre los casos de estudio propuestos

A continuación se presenta la comparativa del rendimiento entre los tres casos de estudio de manera resumida, para ver detalles ir a APÉNDICE II (A, B, C y D):

- biodiesel/ricino – diésel
- biodiesel/girasol – biodiesel/ricino – diésel
- biodiesel/ricino – aceite/ricino – pentanol – diésel.

La variación de B100 para cada caso, a flujo constante, se presenta en la figura 4.12, en la cual se puede observar claramente que se requiere menos combustible entre la mezcla de biodiesel/ricino – biodiesel/girasol – diésel.

Por el contrario para el caso de la mezcla biodiesel/ricino – aceite/ricino – pentanol – diésel se puede observar que se requiere más combustible para obtener la misma potencia, al menos para la mezcla B100 de 1% más, mostrando una mezcla ineficiente.

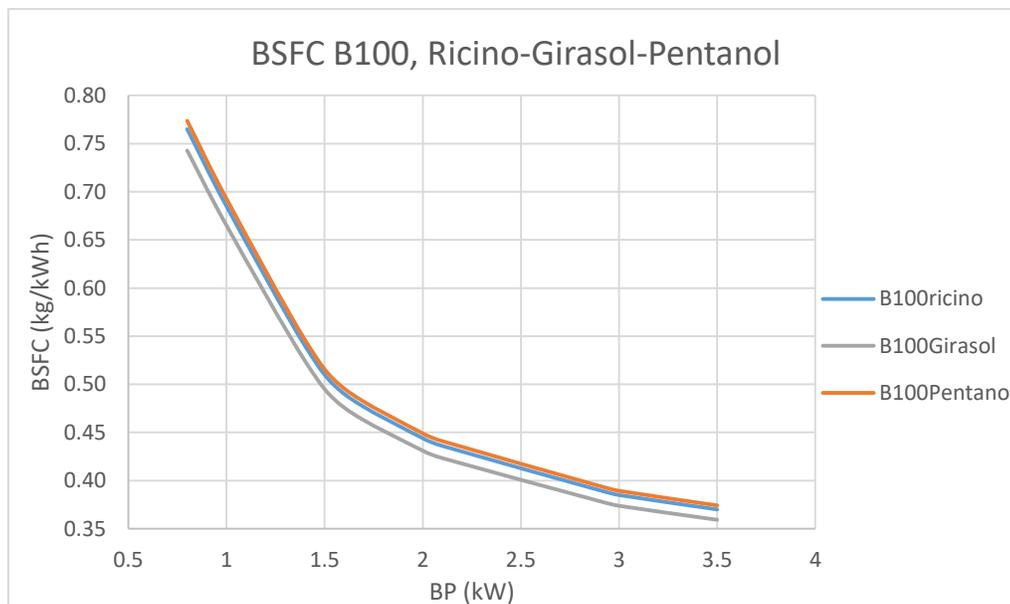


Figura 4.12 Gráfica del BSFC para los casos Biodiesel de ricino, Biodiesel de Girasol y La mezcla Biodiesel de ricino con Aceite de ricino y Pentanol.

La comparativa entre los tres casos de estudio, de BP (Brake Power), BSFC (Brake specific fuel consumption) y ExGT (Exhaust Gas Temperature) para todas las mezclas analizadas se presentan en las tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, donde se puede observar claramente la diferencia entre los tres casos de estudio.

BP (Break Power)

Tabla 4.1 Comparativa del BP en kW para B0, B20, B40.

B0			B20			B40		
Validación	Girasol	pentanol	validación	girasol	pentanol	validación	girasol	girasol
4.8981	4.8981	4.8981	4.9336	4.9551	4.9243	5.0375	5.0834	5.0179
5.3176	5.3176	5.3176	5.3145	5.3377	5.3045	5.4437	5.4933	5.4226
5.5159	5.5159	5.5159	5.5988	5.6233	5.5884	5.6722	5.7124	5.6504
5.7418	5.7418	5.7418	5.8596	5.8852	5.8487	6.0425	6.0977	6.0193
6.6513	6.6513	6.6513	6.9244	6.9548	6.9117	7.0225	7.0868	6.9959
6.8575	6.8575	6.8575	7.1387	7.1701	7.1257	7.2454	7.3120	7.2182
8.5659	8.5659	8.5659	8.7669	8.8054	8.7508	8.7752	8.8560	8.7422
8.7572	8.7572	8.7572	8.9666	9.0060	8.9502	8.9770	9.0595	8.9431
9.5284	9.5284	9.5284	9.6755	9.7183	9.6579	9.8021	9.8925	9.7652

Tabla 4.2 Comparativa del BP en kW para B60, B80, B100.

B60			B80			B100		
validación	girasol	pentanol	validación	girasol	pentanol	validación	girasol	pentanol
5.1242	5.1973	5.0930	5.5441	5.6543	5.4971	5.6190	5.7650	5.5565
5.5757	5.6553	5.5419	6.0318	6.1518	5.9809	6.2541	6.4168	6.1847
5.8052	5.8882	5.7703	6.2413	6.3657	6.1890	6.8201	6.9978	6.7450
6.1306	6.2184	6.0940	6.4948	6.6244	6.4406	7.0365	7.2200	6.9593
6.9855	7.0857	6.9441	7.4063	7.5543	7.3450	7.8935	8.0997	7.8075
7.2107	7.3142	7.1681	7.6111	7.7632	7.5483	8.1127	8.3247	8.0244
8.8087	8.9357	8.7572	9.1453	9.3285	9.0698	9.7266	9.9819	9.6224
8.9855	9.1149	8.9326	9.3093	9.4961	9.2331	9.8797	10.1390	9.7739
9.7161	9.8565	9.6591	10.4048	10.6143	10.3177	10.8278	11.1128	10.7120

BSFC (Break Specific Fuel Consumption)

Tabla 4.3 Comparativa del BSFC en kg/kWh para B0, B20, B40.

B0			B20			B40		
validación	girasol	pentanol	validación	girasol	pentanol	validación	girasol	pentanol
0.55000	0.55000	0.55000	0.57500	0.57251	0.57608	0.61000	0.60449	0.61238
0.48000	0.48000	0.48000	0.49800	0.49584	0.49894	0.53000	0.52521	0.53206
0.36000	0.36000	0.36000	0.38000	0.37834	0.38071	0.40000	0.39638	0.40154
0.33000	0.33000	0.33000	0.35000	0.34847	0.35065	0.37500	0.37160	0.37644
0.31000	0.31000	0.31000	0.33500	0.33354	0.33561	0.35300	0.34979	0.35434
0.30500	0.30500	0.30500	0.33000	0.32856	0.33060	0.34800	0.34483	0.34931
0.28200	0.28200	0.28200	0.30000	0.29869	0.30055	0.31200	0.30915	0.31318
0.28000	0.28000	0.28000	0.29800	0.29669	0.29855	0.31000	0.30718	0.31117
0.27000	0.27000	0.27000	0.28500	0.28375	0.28552	0.30000	0.29726	0.30113

Tabla 4.4 Comparativa del BSFC en kg/kWh para B60, B80, B100.

B60			B80			B100		
validación	Girasol	pentanol	validación	Girasol	pentanol	validación	Girasol	pentanol
0.64500	0.63593	0.64895	0.72500	0.71088	0.73121	0.76500	0.74562	0.77361
0.56500	0.55705	0.56844	0.63500	0.62262	0.64041	0.68500	0.66764	0.69269
0.42500	0.41901	0.42757	0.47500	0.46572	0.47902	0.54000	0.52629	0.54601
0.39500	0.38942	0.39738	0.43500	0.42649	0.43867	0.49000	0.47755	0.49544
0.36500	0.35984	0.36717	0.40200	0.39412	0.40535	0.44400	0.43270	0.44889
0.36000	0.35491	0.36214	0.39500	0.38726	0.39829	0.43600	0.42490	0.44079
0.32600	0.32136	0.32792	0.35300	0.34607	0.35594	0.39000	0.38003	0.39422
0.32300	0.31842	0.32491	0.34900	0.34213	0.35188	0.38500	0.37515	0.38917
0.31000	0.30558	0.31183	0.34500	0.33819	0.34791	0.37000	0.36051	0.37400

ExGT (Exhaust Gas Temperature)

Tabla 4.5 Comparativa del ExGT en °C para B0, B20, B40.

B0			B20			B40		
validación	Girasol	pentanol	validación	Girasol	pentanol	validación	Girasol	pentanol
191.04	191.04	191.04	187.02	188.80	187.03	182.05	185.61	181.98
198.78	198.78	198.78	195.03	196.82	195.03	190.05	193.66	189.96
218.05	218.05	218.05	217.02	218.83	216.98	212.05	218.95	211.88
228.04	228.04	228.04	226.02	227.89	225.97	221.01	224.78	220.81
249.02	249.02	249.02	245.07	247.00	245.00	240.07	243.94	239.81
252.07	252.07	252.07	250.05	251.99	249.97	245.06	248.97	244.80
285.08	285.08	285.08	283.09	285.13	283.01	278.07	282.17	277.79
292.02	292.02	292.02	290.01	292.06	289.92	285.03	289.16	284.74
340.14	340.14	340.14	338.07	340.26	337.98	333.03	337.43	332.72

Tabla 4.6 Comparativa del ExGT en °C para B60, B80, B100.

B60			B80			B100		
validación	Girasol	pentanol	validación	Girasol	pentanol	validación	Girasol	pentanol
175.02	180.48	174.87	164.00	171.43	163.81	153.0422	162.5391	152.8305
185.02	190.56	184.83	174.04	181.58	173.79	162.0156	171.6563	161.7194
203.01	208.70	202.73	193.04	200.81	192.66	181.0257	190.9612	180.5604
212.03	217.80	211.70	202.03	209.91	201.59	189.0713	199.1295	188.536
233.02	238.96	232.58	222.01	230.11	221.42	204.0442	214.3294	203.3695
238.00	243.99	237.54	228.06	236.23	227.42	209.0168	219.3785	208.2966
273.07	279.39	272.59	268.09	276.73	267.29	254.0829	265.1364	253.0579
280.09	286.45	279.57	275.06	283.80	274.29	262.0322	273.2168	260.9886
330.08	336.87	329.53	320.02	329.30	319.48	295.0249	306.7299	293.9369

5. CONCLUSIONES

Conclusión 1

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN BODIESEL/RICINO – DIÉSEL FÓSIL SOBRE EL RENDIMIENTO.

La validación de la simulación permitió evaluar el comportamiento de la mezcla desde otro punto de vista, es decir analizar su comportamiento manteniendo fijo el flujo de combustible y no a través de la potencia generada fija como el análisis desarrollado por los autores. Esto permitió determinar la pérdida de potencia por el biodiesel con respecto a la potencia de diésel puro variando de manera gradual la composición de la mezcla, fenómeno que de manera práctica es muy difícil de llevar a cabo.

Conclusión 2

MEZCLA DE BODIESEL/RICINO-BODIESEL/GIRASOL-DIÉSEL

El análisis de esta mezcla mostro que la perdida de potencia con respecto a la perdida de potencia por biodiesel de ricino para mezclas B100 es menor, en concreto en un 2.4 %. Al respecto una menor perdida de potencia nos permite incrementar la mezcla de biodiesel en diésel manteniendo la perdida de potencia máxima tolerable de 3.7%, con lo cual se determinó que la mezcla B20 de ricino podría elevarse a una mezcla B23 al mezclarse con biodiesel de girasol, concluyendo que la mezcla de biodiesel de ricino y biodiesel de girasol se presenta como una mezcla tanto técnica como energéticamente más viable y por ende con mejor rendimiento.

Conclusión 3

MEZCLA BODIESEL DE RICINO-ACEITE DE RICINO-PENTANOL-DIÉSEL FÓSIL

Para el caso de esta mezcla, al llevar a cabo el análisis tomando en cuenta las consideraciones antes mencionadas, mostro que la pérdida de potencia para mezclas B100 fue mayor, en concreto de un 1%. Con lo que esta mezcla lejos de mostrar una mejora, presenta un rendimiento menor lo cual después del análisis se deduce que su implementación no permite incrementar la concentración de la mezcla y mantener la perdida de potencia máxima tolerable de 3.7%, dado que su implementación solo permitirá mezclas de B19, concluyendo que la mezcla de biodiesel de ricino con aceite de ricino y pentanol, se presenta como una mezcla inviable.

Conclusión 4

Finalmente el análisis de los casos propuestos permitió entender y definir el comportamiento en influencia de las diferentes mezclas propuestas desde un punto de vista termodinámico, por lo que el desarrollo de modelos de simulación, así como la validación de la viabilidad técnica de la implementación del simulador generará información valiosa para el entendimiento de la fenomenología del proceso en la búsqueda del desarrollo tecnológico que permita la transición energética.

6. BIBLIOGRAFÍA

Arunkumar M. Experimental studies on engine performance and emission characteristics using castor biodiesel as fuel in CI engine [Publicación periódica] // Elsevier. - 2018. - pág. 8.

Aspen Technology Physical Property Methods and Models [Libro]. - Cambridge, USA : [s.n.], 2006.

Bueno André Valente Performance and emissions characteristics of castor oil biodiesel fuel blends [Publicación periódica] // ScienceDirect . - 2017. - pág. 8.

Carlson Eric Don't Gamble With Physical Properties For Simulations [Publicación periódica] // CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS. - 1996 .

Cedeño-Caero Desulfuración de organoazufrados presentes en el diésel por oxidación y extracción. Parte I. catalizadores de cobre soportados [Publicación periódica] // Revista Mexicana de Ingeniería Química. - 2005. - pág. 13.

Cengel Yunus A. Termodinámica [Libro]. - [s.l.] : McGraw Hill, 2011.

Collado Javier Pérez Modelado cinético-químico del proceso de combustión diésel para la estimación de contaminantes gaseosos [Publicación periódica]. - Ciudad Real : Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, 2007. - 30.

Conceicao Marta M. Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel [Publicación periódica] // ScienceDirect . - 2007. - pág. 12.

CONUEE Derivados del petróleo, diésel [Publicación periódica] // MOVILIDAD Y TRANSPORTE . - 2017.

Das Mithun An experimental study on the combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel-castor oil biodiesel blends [Publicación periódica] // Renewable Energy. - India : ELSEVIER , 2017. - pág. 11.

Deep Akash Experimental investigations on the influence of fuel injection timing and pressure on single cylinder C.I. engine fueled with 20% blend of castor biodiesel in diesel [Publicación periódica] // ELSEVIER . - 2017. - pág. 8.

El-Araby Ashraf Amin Study on the characteristics of palm oil–biodiesel–diesel fuel blend [Publicación periódica] // Egyptian Journal of Petroleum. - 2017. - pág. 8.

Fabián Jesús Rendón Hernández José Luis Gutiérrez Díaz Castor biodiesel-diesel blend to power a diesel engine: evaluation of the bus efficiency and emissions under driving conditions [Publicación periódica] // INTERCIENCIA . - 2014. - pág. 6.

Fogler H. Scott Elements of chemical reaction engineering 4ta. Ed. [Libro]. - [s.l.] : Pearson Education, 2008.

Figueroa Simón J. El proceso de combustión en motores de combustión interna [Publicación periódica]. - MÉRIDA, VENEZUELA : Editorial Venezolana, 2005. - 19 : Vol. 1.

Goering Carroll E Thermodynamics and engine cycles [Libro]. - 2003.

Gogoi T.K. A cycle simulation model for predicting the performance of a diesel engine fuelled by diesel and biodiesel blends [Publicación periódica]. - Napaam, India : ScienceDirect, 2009.

Kirloskar Kirloskar Oil Engines Limited, Agri Business Product Catalogue [Libro]. - Khadki : [s.n.].

LLUECA PABLO PEIRÓ Modelado CFD del proceso de combustión en un motor diésel de pequeña cilindrada [Publicación periódica]. - Valencia : [s.n.], 2015. - 20.

Martínez María Félix Cornejo Caracterización de aceite de higuera (Ricinus communis) de dos variedades silvestres para la producción de biodiesel en la región del Valle de Mezquital, Hidalgo [Publicación periódica] // Tesis . - 2012. - pág. 70.

METEORED METEORED [En línea]. - 2020. - 15 de Octubre de 2020. - https://www.meteored.mx/clima_Puebla-America+Norte-Mexico-Puebla--1-21044.html.

Naranjo Consuelo Sánchez teoría de la combustión [Libro]. - Madrid : [s.n.], 2011.

NIST NIST: National Institute of Standards and Technology [En línea] // www.nist.gov. - AGENCIA DE GOBIERNO, 12 de noviembre de 2020. - 12 de noviembre de 2020.

Panwar N.L. Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil [Publicación periódica] // Elsevier . - 2009. - pág. 5.

Parag Saxena Sayali Jawale A review on prediction of properties of biodiesel and blends of biodiesel [Publicación periódica] // ScienceDirect . - 2013. - pág. 8.

Paula Berman Shahar Nizri Castor oil biodiesel and its blends as alternative fuel [Publicación periódica] // ScienceDirect . - 2011. - pág. 6.

PEMEX Hoja de Datos de Seguridad [Publicación periódica] // NOM-018-STPS-2015 DOF 09.10.2015. - 2015.

Pérez Armando Gisela Montero Simulación en Aspen de la combustión de mezclas diesel-biodiesel [Publicación periódica] // Ingeniería Investigación y Tecnología. - Baja California : Ingeniería Investigación y Tecnología , 2013. - pág. 10.

Raman Anantha Experimental investigation on performance, combustion and emission analysis of a direct injection diesel engine fuelled with rapeseed oil biodiesel [Publicación periódica] // ELSEVIER. - 2019. - pág. 6.

Riegelhaupt Enrique Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento [Publicación periódica] // Red mexicana de bioenergía . - 2016. - pág. 129.

Sadegh Azizzadeh Hajlari Bahman Najafi Castor oil, a source for biodiesel production and its impact on the diesel engine performance [Publicación periódica] // ELSEVIER . - 2019. - pág. 10.

SAGARPA Promueve INIFAP cultivos de higuera para producción de bioenergéticos [Publicación periódica]. - 2016.

Sai Manoj Saipavan Kalyan Experimental assessment of alumina nano additives on the performance of C.I. engine fuelled with a high-performance fuel blend [Publicación periódica]. - India : Materialstoday Proceedings , 2020.

Sánchez-Borroto Yisel Cetane number estimation of biofuels from their fatty acid composition [Publicación periódica]. - La Habana, Cuba : Ingeniería Mecánica., 2012. - 8 : Vol. 15.

Santos Viviani Marques Leite dos Thermochemistry of biodiesel oxidation reactions: A DFT study [Publicación periódica] // Elsevier . - 2010. - pág. 7.

SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [Publicación periódica] // SAGARPA. - 2019.

Tamilselvan P. A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines [Publicación periódica] // ScienceDirect. - 2017. - pág. 26.

Velázquez Jaime Armendáriz Caracterización fenotípica y molecular de genotipos de higuera (Ricinus communis L.) PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL [Publicación periódica] // Tesis . - 2012. - pág. 255.

Zareh Parvaneh Comparative assessment of performance and emission characteristics of castor, coconut and waste cooking based biodiesel as fuel in a diesel engine [Journal] // ELSEVIER. - 2017. - p. 12.

Zareh Parvaneh Comparative assessment of performance and emission characteristics of castor, coconut and waste cooking based biodiesel as fuel in a diesel engine [Publicación periódica] // ELSEVIER . - 2017. - pág. 12.

APÉNDICE I

Apéndice I A

Tablas de flujo de combustible, Aire total y humedad para cada flujo de biodiesel/ricino-diésel fósil de B0 – B100 respectivamente.

B0 BP (kW/h)	0% biod	100%diesel	O2 total eq	AIRE total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.0000	0.4400	1.5237	7.2556	9.4323	0.1479
1	0.0000	0.4800	1.6622	7.9152	10.2898	0.1614
1.4	0.0000	0.5040	1.7453	8.3110	10.8042	0.1694
1.6	0.0000	0.5280	1.8284	8.7067	11.3187	0.1775
2	0.0000	0.6200	2.1470	10.2238	13.2909	0.2084
2.1	0.0000	0.6405	2.2180	10.5618	13.7304	0.2153
2.9	0.0000	0.8178	2.8320	13.4855	17.5312	0.2749
3	0.0000	0.8400	2.9088	13.8516	18.0071	0.2824
3.5	0.0000	0.9450	3.2724	15.5830	20.2580	0.3177

B20 BP (kW/h)	20% bio	80%diesel	O2 total eq	AIRE total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.0920	0.3680	1.5367	7.4167	8.9000	0.1148
1	0.0996	0.3984	1.6637	8.0293	9.6352	0.1242
1.4	0.1064	0.4256	1.7773	8.5775	10.2930	0.1327
1.6	0.1120	0.4480	1.8708	9.0290	10.8348	0.1397
2	0.1340	0.5360	2.2383	10.8025	12.9630	0.1672
2.1	0.1386	0.5544	2.3151	11.1733	13.4080	0.1729
2.9	0.1740	0.6960	2.9064	14.0271	16.8326	0.2171
3	0.1788	0.7152	2.9866	14.4141	17.2969	0.2230
3.5	0.1995	0.7980	3.3324	16.0828	19.2994	0.2489

B40 BP (kW/h)	40% bio	60%diesel	O2 total eq	AIRE total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.1952	0.2928	1.5706	7.4793	9.7230	0.1525
1	0.2120	0.3180	1.7058	8.1230	10.5599	0.1656
1.4	0.2240	0.3360	1.8024	8.5828	11.1576	0.1750
1.6	0.2400	0.3600	1.9311	9.1958	11.9546	0.1875
2	0.2824	0.4236	2.2723	10.8204	14.0665	0.2206
2.1	0.2923	0.4385	2.3521	11.2005	14.5607	0.2284
2.9	0.3619	0.5429	2.9121	13.8673	18.0275	0.2827
3	0.3720	0.5580	2.9932	14.2535	18.5296	0.2906
3.5	0.4200	0.6300	3.3795	16.0927	20.9205	0.3281

B60 BP (kW/h)	60% bio	40%diesel	O2 total eq	AIRE total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.3096	0.2064	1.5977	7.6082	9.8906	0.1551
1	0.3390	0.2260	1.7494	8.3307	10.8299	0.1698
1.4	0.3570	0.2380	1.8423	8.7730	11.4049	0.1789
1.6	0.3792	0.2528	1.9569	9.3186	12.1141	0.1900
2	0.4380	0.2920	2.2603	10.7635	13.9926	0.2194
2.1	0.4536	0.3024	2.3408	11.1469	14.4909	0.2273
2.9	0.5672	0.3782	2.9273	13.9395	18.1214	0.2842
3	0.5814	0.3876	3.0004	14.2875	18.5737	0.2913
3.5	0.6510	0.4340	3.3595	15.9978	20.7972	0.3262

B80 BP (kW/h)	80% bio	20%diesel	O2 total eq	AIRE total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.4640	0.1160	1.7250	8.2144	10.6787	0.1288
1	0.5080	0.1270	1.8886	8.9933	11.6913	0.1410
1.4	0.5320	0.1330	1.9778	9.4182	12.2437	0.1477
1.6	0.5568	0.1392	2.0700	9.8573	12.8145	0.1546
2	0.6432	0.1608	2.3912	11.3868	14.8029	0.1786
2.1	0.6636	0.1659	2.4671	11.7480	15.2724	0.1842
2.9	0.8190	0.2047	3.0447	14.4984	18.8479	0.2274
3	0.8376	0.2094	3.1140	14.8284	19.2769	0.2326
3.5	0.9660	0.2415	3.5913	17.1015	22.2320	0.2682

B100 BP (kW/h)	100% bio	0%diesel	O2 total eq	AIRE total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.6120	0.0000	1.7454	8.3115	10.8050	0.1303
1	0.6850	0.0000	1.9536	9.3029	12.0938	0.1459
1.4	0.7560	0.0000	2.1561	10.2672	13.3473	0.1610
1.6	0.7840	0.0000	2.2360	10.6475	13.8417	0.1670
2	0.8880	0.0000	2.5326	12.0599	15.6778	0.1891
2.1	0.9156	0.0000	2.6113	12.4347	16.1651	0.1950
2.9	1.1310	0.0000	3.2256	15.3600	19.9680	0.2409
3	1.1550	0.0000	3.2941	15.6860	20.3918	0.2460
3.5	1.2950	0.0000	3.6933	17.5873	22.8635	0.2758

Apéndice I B

Tablas de flujo de combustible, Aire total y humedad para cada flujo de biodiesel/ricino-biodiesel/girasol-diésel fósil de B0 – B100 respectivamente.

B0 BP (kW)	0% bio	Bio-ricino	Girasol	100%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.4400	1.5237	7.2556	9.4323	0.1479
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.4800	1.6622	7.9152	10.2898	0.1614
1.4	0.0000	0.0000	0.0000	0.5040	1.7453	8.3110	10.8042	0.1694
1.6	0.0000	0.0000	0.0000	0.5280	1.8284	8.7067	11.3187	0.1775
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.6200	2.1470	10.2238	13.2909	0.2084
2.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.6405	2.2180	10.5618	13.7304	0.2153
2.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.8178	2.8320	13.4855	17.5312	0.2749
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.8400	2.9088	13.8516	18.0071	0.2824
3.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.9450	3.2724	15.5830	20.2580	0.3177

B20 BP (kW)	20% bio	Bio-ricino	Girasol	80%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.0920	0.046	0.046	0.3680	1.6647	7.9272	10.3054	0.1616
1	0.0996	0.0498	0.0498	0.3984	1.7784	8.4684	11.0090	0.1727
1.4	0.1064	0.0532	0.0532	0.4256	1.8720	8.9141	11.5884	0.1817
1.6	0.1120	0.056	0.056	0.4480	2.2397	10.6651	13.8647	0.2174
2	0.1340	0.067	0.067	0.5360	2.3166	11.0312	14.3406	0.2249
2.1	0.1386	0.0693	0.0693	0.5544	2.9082	13.8488	18.0034	0.2823
2.9	0.1740	0.087	0.087	0.6960	2.9885	14.2308	18.5000	0.2901
3	0.1788	0.0894	0.0894	0.7152	3.3344	15.8783	20.6418	0.3237
3.5	0.1995	0.09975	0.09975	0.7980	1.5377	7.3223	9.5190	0.1493

B40 BP (kW)	40% bio	Bio-ricino	Girasol	60%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.1952	0.0976	0.0976	0.2928	1.5731	7.4909	9.7382	0.1527
1	0.2120	0.106	0.106	0.3180	1.7085	8.1356	10.5763	0.1659
1.4	0.2240	0.112	0.112	0.3360	1.8052	8.5961	11.1749	0.1753
1.6	0.2400	0.12	0.12	0.3600	1.9341	9.2101	11.9731	0.1878
2	0.2824	0.1412	0.1412	0.4236	2.2758	10.8372	14.0884	0.2209
2.1	0.2923	0.14616	0.14616	0.4385	2.3558	11.2179	14.5833	0.2287
2.9	0.3619	0.18096	0.18096	0.5429	2.9167	13.8889	18.0555	0.2832
3	0.3720	0.186	0.186	0.5580	2.9979	14.2757	18.5584	0.2911
3.5	0.4200	0.21	0.21	0.6300	3.3847	16.1177	20.9530	0.3286

B60 BP (kW)	60% bio	Bio-ricino	Girasol	40%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.3096	0.1548	0.1548	0.2064	7.6277	9.9159	9.9159	0.1555
1	0.3390	0.1695	0.1695	0.2260	8.3520	10.8576	10.8576	0.1703
1.4	0.3570	0.1785	0.1785	0.2380	8.7955	11.4341	11.4341	0.1793
1.6	0.3792	0.1896	0.1896	0.2528	9.3424	12.1451	12.1451	0.1905
2	0.4380	0.219	0.219	0.2920	10.7911	14.0284	14.0284	0.2200
2.1	0.4536	0.2268	0.2268	0.3024	11.1754	14.5280	14.5280	0.2278
2.9	0.5672	0.28362	0.28362	0.3782	13.9752	18.1677	18.1677	0.2849
3	0.5814	0.2907	0.2907	0.3876	14.3240	18.6212	18.6212	0.2920
3.5	0.6510	0.3255	0.3255	0.4340	16.0388	20.8504	20.8504	0.3270

B80 BP (kW)	80% bio	Bio-ricino	Girasol	20%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.4640	0.232	0.232	0.1160	1.7313	8.2443	10.7176	0.1681
1	0.5080	0.254	0.254	0.1270	1.8955	9.0261	11.7340	0.1840
1.4	0.5320	0.266	0.266	0.1330	1.9850	9.4525	12.2883	0.1927
1.6	0.5568	0.2784	0.2784	0.1392	2.0776	9.8932	12.8612	0.2017
2	0.6432	0.3216	0.3216	0.1608	2.4000	11.4283	14.8568	0.2330
2.1	0.6636	0.3318	0.3318	0.1659	2.4761	11.7908	15.3281	0.2404
2.9	0.8190	0.40948	0.40948	0.2047	3.0558	14.5512	18.9166	0.2967
3	0.8376	0.4188	0.4188	0.2094	3.1253	14.8824	19.3472	0.3034
3.5	0.9660	0.483	0.483	0.2415	3.6044	17.1638	22.3130	0.3499

B100 BP (kW)	100% bio	Bio-ricino	Girasol	0%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.6120	0.306	0.306	0.0000	1.7538	8.3516	10.8571	0.1703
1	0.6850	0.3425	0.3425	0.0000	1.9630	9.3478	12.1522	0.1906
1.4	0.7560	0.378	0.378	0.0000	2.1665	10.3167	13.4117	0.2103
1.6	0.7840	0.392	0.392	0.0000	2.2468	10.6988	13.9085	0.2181
2	0.8880	0.444	0.444	0.0000	2.5448	12.1180	15.7535	0.2471
2.1	0.9156	0.4578	0.4578	0.0000	2.6239	12.4947	16.2431	0.2547
2.9	1.1310	0.5655	0.5655	0.0000	3.2412	15.4341	20.0644	0.3147
3	1.1550	0.5775	0.5775	0.0000	3.3099	15.7616	20.4901	0.3213
3.5	1.2950	0.6475	0.6475	0.0000	3.7111	17.6721	22.9738	0.3603

Apéndice I C

Tablas de flujo de combustible, Aire total y humedad para cada flujo de Biodiesel/ricino-Aceite/ricino-Pentanol-diésel fósil de B0 – B100 respectivamente.

B0 BP (kW)	B0 bio	Bio- ricino	Aceite- ricino	PENTANOL	100%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4400	1.5237	7.2556	9.4323	0.1479
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4800	1.6622	7.9152	10.2898	0.1614
1.4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5040	1.7453	8.3110	10.8042	0.1694
1.6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5280	1.8284	8.7067	11.3187	0.1775
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6200	2.1470	10.2238	13.2909	0.2084
2.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6405	2.2180	10.5618	13.7304	0.2153
2.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8178	2.8320	13.4855	17.5312	0.2749
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8400	2.9088	13.8516	18.0071	0.2824
3.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9450	3.2724	15.5830	20.2580	0.3177

B20 BP (kW)	B20 bio	Bio- ricino	Aceite- ricino	PENTANOL	80%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.0920	0.0368	0.0184	0.0368	0.3680	1.5327	7.2984	9.4879	0.1611
1	0.0996	0.03984	0.01992	0.03984	0.3984	1.6593	7.9013	10.2717	0.1721
1.4	0.1064	0.04256	0.02128	0.04256	0.4256	1.7726	8.4408	10.9730	0.1811
1.6	0.1120	0.0448	0.0224	0.0448	0.4480	1.8659	8.8850	11.5505	0.2167
2	0.1340	0.0536	0.0268	0.0536	0.5360	2.2324	10.6303	13.8194	0.2242
2.1	0.1386	0.05544	0.02772	0.05544	0.5544	2.3090	10.9952	14.2938	0.2814
2.9	0.1740	0.0696	0.0348	0.0696	0.6960	2.8987	13.8035	17.9446	0.2892
3	0.1788	0.07152	0.03576	0.07152	0.7152	2.9787	14.1843	18.4396	0.3227
3.5	0.1995	0.0798	0.0399	0.0798	0.7980	3.3236	15.8264	20.5744	0.1488

B40 BP (kW)	B40 bio	Bio- ricino	Aceite- ricino	PENTANOL	60%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.1952	0.07808	0.03904	0.07808	0.2928	1.5624	7.4401	9.6722	0.1517
1	0.2120	0.0848	0.0424	0.0848	0.3180	1.6969	8.0805	10.5046	0.1647
1.4	0.2240	0.0896	0.0448	0.0896	0.3360	1.7929	8.5379	11.0992	0.1741
1.6	0.2400	0.096	0.048	0.096	0.3600	1.9210	9.1477	11.8920	0.1865
2	0.2824	0.11296	0.05648	0.11296	0.4236	2.2604	10.7638	13.9929	0.2195
2.1	0.2923	0.116928	0.058464	0.116928	0.4385	2.3398	11.1419	14.4845	0.2272
2.9	0.3619	0.144768	0.072384	0.144768	0.5429	2.8969	13.7947	17.9332	0.2812
3	0.3720	0.1488	0.0744	0.1488	0.5580	2.9776	14.1789	18.4326	0.2891
3.5	0.4200	0.168	0.084	0.168	0.6300	3.3618	16.0085	20.8110	0.3264

B60 BP (kW)	B60 bio	Bio- ricino	Aceite- ricino	PENTANOL	40%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.3096	0.12384	0.06192	0.12384	0.2064	1.5849	7.5471	9.8113	0.1539
1	0.3390	0.1356	0.0678	0.1356	0.2260	1.7354	8.2638	10.7430	0.1685
1.4	0.3570	0.1428	0.0714	0.1428	0.2380	1.8275	8.7026	11.3134	0.1774
1.6	0.3792	0.15168	0.07584	0.15168	0.2528	1.9412	9.2438	12.0169	0.1885
2	0.4380	0.1752	0.0876	0.1752	0.2920	2.2422	10.6772	13.8803	0.2177
2.1	0.4536	0.18144	0.09072	0.18144	0.3024	2.3221	11.0574	14.3747	0.2254
2.9	0.5672	0.22690	0.113448	0.22690	0.3782	2.9038	13.8277	17.9760	0.2819
3	0.5814	0.23256	0.11628	0.23256	0.3876	2.9763	14.1728	18.4247	0.2890
3.5	0.6510	0.2604	0.1302	0.2604	0.4340	3.3326	15.8695	20.6303	0.3235

B80 BP (kW)	B80 bio	Bio- ricino	Aceite- ricino	PENTANOL	20%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.4640	0.1856	0.0928	0.1856	0.1160	1.7060	8.1237	10.5608	0.1656
1	0.5080	0.2032	0.1016	0.2032	0.1270	1.8677	8.8940	11.5622	0.1813
1.4	0.5320	0.2128	0.1064	0.2128	0.1330	1.9560	9.3142	12.1085	0.1899
1.6	0.5568	0.22272	0.11136	0.22272	0.1392	2.0472	9.7484	12.6729	0.1987
2	0.6432	0.25728	0.12864	0.25728	0.1608	2.3648	11.2611	14.6394	0.2296
2.1	0.6636	0.26544	0.13272	0.26544	0.1659	2.4398	11.6182	15.1037	0.2369
2.9	0.8190	0.32758	0.16379	0.327584	0.2047	3.0110	14.3383	18.6398	0.2923
3	0.8376	0.33504	0.16752	0.33504	0.2094	3.0796	14.6646	19.0640	0.2990
3.5	0.9660	0.3864	0.1932	0.3864	0.2415	3.5517	16.9126	21.9864	0.3448

B100 BP (kW)	B100 bio	Bio- ricino	Aceite/ ricino	Pentanol	80%diesel	O2 total	Aire total	30% exceso	Kg de agua
0.8	0.6120	0.2448	0.1224	0.2448	0.0000	1.7204	8.1925	10.6502	0.1670
1	0.6850	0.274	0.137	0.274	0.0000	1.9256	9.1697	11.9206	0.1870
1.4	0.7560	0.3024	0.1512	0.3024	0.0000	2.1252	10.1201	13.1562	0.2063
1.6	0.7840	0.3136	0.1568	0.3136	0.0000	2.2039	10.4949	13.6434	0.2140
2	0.8880	0.3552	0.1776	0.3552	0.0000	2.4963	11.8871	15.4533	0.2424
2.1	0.9156	0.36624	0.18312	0.36624	0.0000	2.5739	12.2566	15.9336	0.2499
2.9	1.1310	0.4524	0.2262	0.4524	0.0000	3.1794	15.1400	19.6820	0.3087
3	1.1550	0.462	0.231	0.462	0.0000	3.2469	15.4613	20.0997	0.3152
3.5	1.2950	0.518	0.259	0.518	0.0000	3.6404	17.3354	22.5360	0.3534

APÉNDICE II

Apéndice II A

Tablas de resultados de los análisis de validación 6 – 11, a diferentes concentraciones de mezcla B0 – B100, para el caso de validación biodiesel/ricino – diésel.

B0	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS	
	BP kW	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbin kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final
0.8	1.6072	595.1	0.03109	0.0412	0.0143	-10831.49	-0.8113	-6.5053	2	191.0	0.8082	16.33	0.550	24296.90
1.0	1.7533	595.1	0.03392	0.0450	0.0156	-10831.47	-0.8113	-7.0709	2	198.8	1.0369	18.81	0.480	21093.52
1.4	1.8410	595.1	0.03561	0.0472	0.0164	-10831.58	-0.8113	-7.3569	2	218.1	1.3679	25.38	0.360	16023.13
1.6	1.9287	595.1	0.03731	0.0495	0.0172	-10831.56	-0.8113	-7.6705	2	228.0	1.5503	27.87	0.330	14730.03
2.0	2.2647	595.1	0.04381	0.0581	0.0201	-10831.56	-0.8113	-8.9160	2	249.0	1.9621	30.07	0.310	13796.05
2.1	2.3396	595.1	0.04526	0.0600	0.0208	-10831.61	-0.8113	-9.1971	2	252.1	2.0573	30.62	0.305	13580.90
2.9	2.9872	595.1	0.05778	0.0767	0.0266	-10831.58	-0.8113	-11.5531	2	285.1	2.8696	33.86	0.282	12522.98
3.0	3.0683	595.1	0.05935	0.0787	0.0273	-10831.58	-0.8113	-11.8255	2	292.0	2.9775	34.26	0.280	12421.98
3.5	3.4519	595.1	0.06677	0.0886	0.0307	-10831.50	-0.8113	-12.9803	2	340.1	3.4302	36.73	0.270	12035.63

B20	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS	
	BP kW	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final
0.8	1.6210	595.1	0.03163	0.0412	0.0148	-10833.20	-0.7853	-6.5546	2	187.0	0.7894	16.22	0.575	23856.36
1.0	1.7549	595.1	0.03424	0.0446	0.0160	-10833.15	-0.7853	-7.0694	2	195.0	1.0098	18.82	0.498	20579.44
1.4	1.8747	595.1	0.03658	0.0477	0.0171	-10833.32	-0.7854	-7.4735	2	217.0	1.3717	25.01	0.380	15811.91
1.6	1.9734	595.1	0.03851	0.0502	0.0180	-10833.27	-0.7854	-7.8329	2	226.0	1.5528	27.31	0.350	14607.71
2.0	2.3610	595.1	0.04607	0.0601	0.0215	-10833.23	-0.7853	-9.2854	2	245.1	1.9735	28.88	0.335	13922.38
2.1	2.4420	595.1	0.04765	0.0621	0.0222	-10833.28	-0.7854	-9.5808	2	250.1	2.0702	29.42	0.330	13719.20
2.9	3.0658	595.1	0.05982	0.0780	0.0279	-10833.25	-0.7853	-11.8326	2	283.1	2.8931	33.08	0.300	12429.83
3.0	3.1503	595.1	0.06147	0.0801	0.0287	-10833.27	-0.7854	-12.1169	2	290.0	3.0038	33.46	0.298	12331.98
3.5	3.5151	595.1	0.06859	0.0894	0.0320	-10833.23	-0.7853	-13.1906	2	338.1	3.4348	36.17	0.285	11879.03

B40 BP kW	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS	
	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/molk	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final	BSEC PAPER
0.8	1.6568	595.1	0.03263	0.0417	0.0154	-10835.08	-0.7605	-6.6943	2	182.0	0.7556	15.88	0.610	23416.77
1.0	1.7994	595.1	0.03544	0.0453	0.0168	-10834.85	-0.7605	-7.2431	2	190.0	0.9526	18.37	0.530	20343.45
1.4	1.9012	595.1	0.03744	0.0479	0.0177	-10835.13	-0.7605	-7.5733	2	212.0	1.2479	24.68	0.400	15639.44
1.6	2.0370	595.1	0.04012	0.0513	0.0190	-10835.09	-0.7605	-8.0794	2	221.0	1.4502	26.48	0.375	14631.51
2.0	2.3969	595.1	0.04721	0.0604	0.0224	-10835.05	-0.7605	-9.4194	2	240.1	1.8610	28.48	0.353	13702.96
2.1	2.4811	595.1	0.04886	0.0625	0.0231	-10835.14	-0.7605	-9.7265	2	245.1	1.9563	28.98	0.348	13509.39
2.9	3.0718	595.1	0.06050	0.0774	0.0286	-10835.13	-0.7605	-11.8470	2	278.1	2.6326	33.05	0.312	12244.79
3.0	3.1573	595.1	0.06218	0.0795	0.0294	-10835.07	-0.7605	-12.1343	2	285.0	2.7380	33.42	0.310	12150.14
3.5	3.5647	595.1	0.07021	0.0898	0.0332	-10835.07	-0.7605	-13.3668	2	333.0	3.2347	35.71	0.300	11732.57

B60 BP kW	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS	
	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/molk	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final	BSEC PAPER
0.8	1.6853	595.1	0.03352	0.0420	0.0161	-10837.03	-0.7355	-6.8095	2	175.0	0.7840	15.61	0.645	24586.76
1.0	1.8454	595.1	0.03671	0.0460	0.0177	-10836.94	-0.7355	-7.4211	2	185.0	1.0036	17.93	0.565	21456.04
1.4	1.9433	595.1	0.03866	0.0484	0.0186	-10836.98	-0.7355	-7.7485	2	203.0	1.3352	24.12	0.425	16332.33
1.6	2.0642	595.1	0.04106	0.0515	0.0197	-10837.00	-0.7355	-8.1948	2	212.0	1.5204	26.10	0.395	15207.45
2.0	2.3843	595.1	0.04743	0.0594	0.0228	-10836.95	-0.7355	-9.3698	2	233.0	1.8581	28.63	0.365	14157.50
2.1	2.4692	595.1	0.04912	0.0616	0.0236	-10837.01	-0.7355	-9.6799	2	238.0	1.9469	29.12	0.360	13976.78
2.9	3.0878	595.1	0.06142	0.0770	0.0295	-10837.04	-0.7355	-11.8965	2	273.1	2.7747	32.92	0.326	12566.72
3.0	3.1649	595.1	0.06295	0.0789	0.0303	-10836.98	-0.7355	-12.1504	2	280.1	2.8754	33.39	0.323	12446.65
3.5	3.5437	595.1	0.07049	0.0883	0.0339	-10836.96	-0.7355	-13.2598	2	330.1	3.3035	36.02	0.310	12023.19

B80 BP kW	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS	
	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/molk	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final	BSEC PAPER
0.8	1.8196	595.1	0.03658	0.0448	0.0179	-10839.08	-0.7105	-7.3637	2	164.0	0.7762	14.43	0.725	26139.82
1.0	1.9921	595.1	0.04005	0.0491	0.0196	-10839.12	-0.7106	-8.0240	2	174.0	0.9953	16.58	0.635	22814.45
1.4	2.0863	595.1	0.04194	0.0514	0.0205	-10839.06	-0.7105	-8.3276	2	193.0	1.3107	22.43	0.475	17300.07
1.6	2.1835	595.1	0.04390	0.0538	0.0215	-10839.02	-0.7105	-8.6784	2	202.0	1.4938	24.63	0.435	15876.06
2.0	2.5223	595.1	0.05071	0.0622	0.0248	-10839.07	-0.7105	-9.9287	2	222.0	1.8516	27.00	0.402	14726.91
2.1	2.6023	595.1	0.05232	0.0641	0.0256	-10839.07	-0.7105	-10.2134	2	228.1	1.9408	27.59	0.395	14483.41
2.9	3.2116	595.1	0.06457	0.0792	0.0316	-10838.98	-0.7105	-12.3569	2	268.1	2.6247	31.71	0.353	13066.02
3.0	3.2847	595.1	0.06604	0.0810	0.0323	-10839.08	-0.7105	-12.5940	2	275.1	2.7183	32.23	0.349	12920.06
3.5	3.7882	595.1	0.07616	0.0934	0.0372	-10839.05	-0.7105	-14.1930	2	320.0	3.2255	33.64	0.345	12721.14

B100 BP kW	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS	
	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/molk	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final	BSEC PAPER
0.8	1.8411	595.1	0.03744	0.0448	0.0186	-10841.34	-0.6878	-7.4601	2	153.0	0.7586	14.24	0.765	26550.01
1.0	2.0607	595.1	0.04191	0.0502	0.0208	-11009.11	-0.6878	-8.3149	2	162.0	0.9694	15.99	0.685	23714.31
1.4	2.2743	595.1	0.04625	0.0554	0.0230	-11009.13	-0.6878	-9.0944	2	181.0	1.3299	20.53	0.540	18796.15
1.6	2.3586	595.1	0.04796	0.0574	0.0238	-11009.07	-0.6878	-9.3951	2	189.1	1.5128	22.74	0.490	17092.20
2.0	2.6714	595.1	0.05432	0.0650	0.0270	-11009.11	-0.6878	-10.5650	2	204.0	1.8550	25.34	0.444	15582.07
2.1	2.7545	595.1	0.05601	0.0670	0.0278	-11009.10	-0.6878	-10.8671	2	209.0	1.9470	25.89	0.436	15308.83
2.9	3.4024	595.1	0.06919	0.0828	0.0344	-11009.12	-0.6878	-13.1291	2	254.1	2.6262	29.82	0.390	13824.68
3.0	3.4747	595.1	0.07066	0.0846	0.0351	-11009.07	-0.6878	-13.3543	2	262.0	2.7169	30.37	0.385	13654.51
3.5	3.8958	595.1	0.07922	0.0948	0.0394	-11009.09	-0.6878	-14.7236	2	295.0	3.1401	32.32	0.370	13184.79

Apéndice II B

Tablas de resultados de los análisis de validación 11 – 20, a diferente régimen de funcionamiento constante 0.8 – 3.5. Para el caso de biodiesel/ricino – diésel.

BP kW	COMPRESOR			CSTR	TURBINA		ANÁLISIS
	F biodiesel	AIR	hp comp kW	CO2	T	BP	BSFC
0.8	0.4400-0	9.4323-7.7679	1.5424-1.2702	1.3682-1.1846	191.0-181.6	0.8000-0.6458	0.5500-0.6812
1.0	0.4800-0	10.2897-8.4741	1.6826-1.3857	1.4926-1.2923	199.1-189.7	1.0000-0.8072	0.4800-0.5945
1.4	0.5040-0	10.8042-8.8978	1.7667-1.4550	1.5672-1.3569	217.8-208.3	1.4000-1.1301	0.3600-0.4459
1.6	0.5280-0	11.3187-9.3215	1.8508-1.5243	1.6418-1.4215	228.1-218.4	1.6000-1.2915	0.3300-0.4088
2.0	0.6200-0	13.2909-10.9457	2.1734-1.7898	1.9279-1.6692	249.3-239.5	2.0000-1.6144	0.3100-0.3840
2.1	0.6405-0	13.7303-11.3076	2.2452-1.8490	1.9917-1.7244	252.0-242.1	2.1000-1.6952	0.3050-0.3778
2.9	0.8178-0	17.5311-14.4377	2.8667-2.3609	2.5430-2.2017	285.0-274.6	2.9000-2.3411	0.2820-0.3493
3.0	0.8400-0	18.0070-14.8296	2.9446-2.4250	2.6120-2.2615	291.9-281.3	3.0000-2.4218	0.2800-0.3468
3.5	0.9450-0	20.2579-16.6833	3.3126-2.7281	2.9385-2.5442	339.9-328.6	3.5000-2.8254	0.2700-0.3344

Apéndice II C

Tablas de resultados de los análisis de validación 20 - 25, a diferentes concentraciones de mezcla B0 – B100, para el caso biodiesel/girasol – biodiesel/ricino – diésel.

B0	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS
	BP kW	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI
0.8	1.6072	595.1	0.0311	0.0412	0.0143	-10831.49	-0.8113	-6.5053	2	191.0	0.8000	16.333	0.5500
1.0	1.7533	595.1	0.0339	0.0450	0.0156	-10831.47	-0.8113	-7.0709	2	198.8	1.0000	18.806	0.4800
1.4	1.8410	595.1	0.0356	0.0472	0.0164	-10831.58	-0.8113	-7.3569	2	218.1	1.4000	25.381	0.3600
1.6	1.9287	595.1	0.0373	0.0495	0.0172	-10831.56	-0.8113	-7.6705	2	228.0	1.6000	27.866	0.3300
2.0	2.2647	595.1	0.0438	0.0581	0.0201	-10831.56	-0.8113	-8.9160	2	249.0	2.0000	30.069	0.3100
2.1	2.3396	595.1	0.0453	0.0600	0.0208	-10831.61	-0.8113	-9.1971	2	252.1	2.1000	30.623	0.3050
2.9	2.9872	595.1	0.0578	0.0767	0.0266	-10831.58	-0.8113	-11.5531	2	285.1	2.9000	33.855	0.2820
3.0	3.0683	595.1	0.0594	0.0787	0.0273	-10831.58	-0.8113	-11.8255	2	292.0	3.0000	34.257	0.2800
3.5	3.4519	595.1	0.0311	0.0412	0.0143	-10831.49	-0.8113	-6.5053	2	191.0	3.5000	36.732	0.2700

B20	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS
	BP kW	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI
0.8	1.6220	595.1	0.0318	0.0413	0.0146	-10872.42	-0.7790	-6.5771	2	188.8	0.8035	16.145	0.5725
1.0	1.7560	595.1	0.0344	0.0447	0.0158	-10872.36	-0.7790	-7.0937	2	196.8	1.0044	18.735	0.4958
1.4	1.8760	595.1	0.0367	0.0478	0.0169	-10871.15	-0.7789	-7.4994	2	218.8	1.4061	24.896	0.3783
1.6	1.9746	595.1	0.0387	0.0503	0.0177	-10872.36	-0.7790	-7.8598	2	227.9	1.6070	27.187	0.3485
2.0	2.3625	595.1	0.0463	0.0601	0.0212	-10872.35	-0.7790	-9.3172	2	247.0	2.0088	28.757	0.3335
2.1	2.4436	595.1	0.0479	0.0622	0.0219	-10872.40	-0.7790	-9.6136	2	252.0	2.1092	29.288	0.3286
2.9	3.0677	595.1	0.0601	0.0781	0.0276	-10872.36	-0.7790	-11.8731	2	285.1	2.9128	32.934	0.2987
3.0	3.1523	595.1	0.0618	0.0802	0.0283	-10872.40	-0.7790	-12.1583	2	292.1	3.0132	33.311	0.2967
3.5	3.5173	595.1	0.0689	0.0895	0.0316	-10872.38	-0.7790	-13.2355	2	340.3	3.5155	36.015	0.2837

B40	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS
	BP kW	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/molk	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI
0.8	1.6593	595.1	0.0329	0.0419	0.0151	-10912.80	-0.7471	-6.7428	2	185.6	0.8073	15.737	0.6045
1.0	1.8021	595.1	0.0358	0.0455	0.0164	-10912.83	-0.7471	-7.2955	2	193.7	1.0091	18.204	0.5252
1.4	1.9041	595.1	0.0378	0.0480	0.0173	-10912.90	-0.7471	-7.6281	2	215.8	1.4128	24.458	0.3964
1.6	2.0402	595.1	0.0405	0.0515	0.0185	-10912.91	-0.7471	-8.1379	2	224.8	1.6146	26.239	0.3716
2.0	2.4006	595.1	0.0476	0.0606	0.0218	-10912.86	-0.7471	-9.4874	2	243.9	2.0183	28.221	0.3498
2.1	2.4849	595.1	0.0493	0.0627	0.0226	-10913.23	-0.7471	-9.7969	2	249.0	2.1193	28.720	0.3448
2.9	3.0766	595.1	0.0611	0.0776	0.0279	-10913.17	-0.7471	-11.9325	2	282.2	2.9267	32.746	0.3092
3.0	3.1623	595.1	0.0628	0.0798	0.0287	-10912.84	-0.7471	-12.2218	2	289.2	3.0276	33.114	0.3072
3.5	3.5703	595.1	0.0709	0.0901	0.0324	-10912.86	-0.7471	-13.4628	2	337.4	3.5323	35.380	0.2973

B60	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS
	BP kW	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/molk	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI
0.8	1.6896	595.1	0.0340	0.0422	0.0155	-10956.46	-0.7145	-6.8869	2	180.5	0.8114	15.393	0.6359
1.0	1.8501	595.1	0.0372	0.0462	0.0170	-10956.37	-0.7145	-7.5054	2	190.6	1.0143	17.682	0.5570
1.4	1.9483	595.1	0.0392	0.0487	0.0179	-10956.38	-0.7145	-7.8365	2	208.7	1.4200	23.776	0.4190
1.6	2.0695	595.1	0.0417	0.0517	0.0190	-10956.41	-0.7145	-8.2879	2	217.8	1.6229	25.730	0.3894
2.0	2.3904	595.1	0.0481	0.0597	0.0220	-10956.37	-0.7145	-9.4761	2	239.0	2.0287	28.226	0.3598
2.1	2.4755	595.1	0.0498	0.0618	0.0227	-10956.41	-0.7145	-9.7897	2	244.0	2.1301	28.711	0.3549
2.9	3.0957	595.1	0.0623	0.0773	0.0284	-10957.01	-0.7146	-12.0314	2	279.4	2.9418	32.454	0.3214
3.0	3.1730	595.1	0.0639	0.0793	0.0292	-10956.41	-0.7145	-12.2878	2	286.4	3.0432	32.913	0.3184
3.5	3.5528	595.1	0.0715	0.0888	0.0326	-10956.39	-0.7145	-13.4093	2	336.9	3.5506	35.510	0.3056

B80 BP kW	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS
	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final
0.8	1.8262	595.1	0.0373	0.0451	0.0170	-11003.37	-0.6814	-7.4805	2	171.4	0.8159	14.149	0.7109
1.0	1.9994	595.1	0.0408	0.0494	0.0186	-11003.29	-0.6814	-8.1512	2	181.6	1.0199	16.255	0.6226
1.4	2.0939	595.1	0.0428	0.0518	0.0195	-11003.35	-0.6814	-8.4596	2	200.8	1.4279	21.993	0.4657
1.6	2.1915	595.1	0.0448	0.0542	0.0204	-11003.29	-0.6814	-8.8158	2	209.9	1.6319	24.153	0.4265
2.0	2.5315	595.1	0.0517	0.0626	0.0236	-11003.38	-0.6814	-10.0859	2	230.1	2.0400	26.475	0.3941
2.1	2.6118	595.1	0.0534	0.0646	0.0243	-11003.30	-0.6814	-10.3751	2	236.2	2.1420	27.051	0.3873
2.9	3.2233	595.1	0.0658	0.0797	0.0300	-11002.76	-0.6813	-12.5518	2	276.7	2.9581	31.088	0.3461
3.0	3.2967	595.1	0.0673	0.0815	0.0307	-11003.31	-0.6814	-12.7928	2	283.8	3.0602	31.592	0.3421
3.5	3.8020	595.1	0.0777	0.0940	0.0354	-11003.33	-0.6814	-14.4163	2	329.3	3.5705	32.974	0.3382

B100 BP kW	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA					ANÁLISIS
	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final
0.8	1.8500	595.1	0.0384	0.0452	0.0175	-11054.13	-0.6499	-7.6150	2	162.5	0.8208	13.877	0.7456
1.0	2.0707	595.1	0.0430	0.0506	0.0195	-11054.07	-0.6499	-8.4875	2	171.7	1.0260	15.584	0.6676
1.4	2.2853	595.1	0.0474	0.0558	0.0216	-11054.14	-0.6499	-9.2831	2	191.0	1.4365	20.006	0.5263
1.6	2.3699	595.1	0.0492	0.0579	0.0224	-11054.08	-0.6499	-9.5900	2	199.1	1.6417	22.161	0.4775
2.0	2.6843	595.1	0.0557	0.0656	0.0253	-11054.08	-0.6499	-10.7840	2	214.3	2.0522	24.692	0.4327
2.1	2.7677	595.1	0.0574	0.0676	0.0261	-11054.11	-0.6499	-11.0924	2	219.4	2.1549	25.226	0.4249
2.9	3.4189	595.1	0.0710	0.0835	0.0322	-11054.10	-0.6499	-13.4007	2	265.1	2.9761	29.053	0.3800
3.0	3.4914	595.1	0.0725	0.0853	0.0329	-11054.14	-0.6499	-13.6305	2	273.2	3.0788	29.589	0.3752
3.5	3.9146	595.1	0.0812	0.0956	0.0369	-11054.11	-0.6499	-15.0274	2	306.7	3.5921	31.495	0.3605

Apéndice II D

Tablas de resultados de los análisis de validación 26 - 31, a diferentes concentraciones de mezcla B0 – B100, para el caso biodiesel/ricino – aceite/ricino – pentanol – diésel.

B0	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA				ANÁLISIS	
	BP kW	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI
0.8	1.6072	595.1	0.0311	0.0412	0.0143	-10831.49	-0.8113	-6.5053	2	191.0	0.8000	16.3329	0.5500
1.0	1.7533	595.1	0.0339	0.0450	0.0156	-10831.47	-0.8113	-7.0709	2	198.8	1.0000	18.8056	0.4800
1.4	1.8410	595.1	0.0356	0.0472	0.0164	-10831.58	-0.8113	-7.3569	2	218.1	1.4000	25.3812	0.3600
1.6	1.9287	595.1	0.0373	0.0495	0.0172	-10831.56	-0.8113	-7.6705	2	228.0	1.6000	27.8658	0.3300
2.0	2.2647	595.1	0.0438	0.0581	0.0201	-10831.56	-0.8113	-8.9160	2	249.0	2.0000	30.0693	0.3100
2.1	2.3396	595.1	0.0453	0.0600	0.0208	-10831.61	-0.8113	-9.1971	2	252.1	2.1000	30.6233	0.3050
2.9	2.9872	595.1	0.0578	0.0767	0.0266	-10831.58	-0.8113	-11.5531	2	285.1	2.9000	33.8552	0.2820
3.0	3.0683	595.1	0.0594	0.0787	0.0273	-10831.58	-0.8113	-11.8255	2	292.0	3.0000	34.2575	0.2800
3.5	3.4519	595.1	0.0668	0.0886	0.0307	-10831.50	-0.8113	-12.9803	2	340.1	3.5000	36.7323	0.2700

B20	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA				ANÁLISIS	
	BP kW	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI
0.8	1.6167	595.1	0.0315	0.0416	0.0146	-10871.96	-0.8092	-6.5410	2	187.0	0.7985	16.2459	0.5761
1.0	1.7502	595.1	0.0341	0.0450	0.0158	-10871.94	-0.8092	-7.0547	2	195.0	0.9981	18.8519	0.4989
1.4	1.8697	595.1	0.0364	0.0481	0.0169	-10871.92	-0.8092	-7.4581	2	217.0	1.3974	25.0520	0.3807
1.6	1.9681	595.1	0.0383	0.0506	0.0178	-10871.95	-0.8092	-7.8169	2	226.0	1.5970	27.3565	0.3506
2.0	2.3548	595.1	0.0458	0.0606	0.0213	-10871.90	-0.8092	-9.2665	2	245.0	1.9963	28.9364	0.3356
2.1	2.4356	595.1	0.0474	0.0626	0.0220	-10871.89	-0.8092	-9.5613	2	250.0	2.0962	29.4709	0.3306
2.9	3.0577	595.1	0.0595	0.0786	0.0277	-10871.89	-0.8092	-11.8085	2	283.0	2.8947	33.1397	0.3005
3.0	3.1420	595.1	0.0611	0.0808	0.0284	-10871.91	-0.8092	-12.0922	2	289.9	2.9945	33.5189	0.2985
3.5	3.5058	595.1	0.0682	0.0901	0.0317	-10871.90	-0.8092	-13.1637	2	338.0	3.4936	36.2398	0.2855

B40 BP kW	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA				ANÁLISIS	
	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final
0.8	1.6481	595.1	0.0323	0.0425	0.0152	-10912.07	-0.8122	-6.6660	2	182.0	0.7969	0.6124	15.9429
1.0	1.7899	595.1	0.0350	0.0461	0.0165	-10912.13	-0.8122	-7.2125	2	190.0	0.9961	0.5321	18.4414
1.4	1.8912	595.1	0.0370	0.0487	0.0174	-10912.13	-0.8122	-7.5416	2	211.9	1.3946	0.4015	24.7771
1.6	2.0263	595.1	0.0397	0.0522	0.0187	-10912.13	-0.8122	-8.0457	2	220.8	1.5939	0.3764	26.5810
2.0	2.3843	595.1	0.0467	0.0614	0.0220	-10912.15	-0.8122	-9.3802	2	239.8	1.9924	0.3543	28.5882
2.1	2.4681	595.1	0.0483	0.0636	0.0227	-10912.47	-0.8123	-9.6863	2	244.8	2.0921	0.3493	29.0930
2.9	3.0557	595.1	0.0598	0.0787	0.0282	-10912.39	-0.8123	-11.7979	2	277.8	2.8891	0.3132	33.1724
3.0	3.1408	595.1	0.0615	0.0809	0.0289	-10912.13	-0.8122	-12.0840	2	284.7	2.9887	0.3112	33.5453
3.5	3.5461	595.1	0.0694	0.0914	0.0327	-10912.13	-0.8122	-13.3113	2	332.7	3.4868	0.3011	35.8415

B60 BP kW	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA				ANÁLISIS	
	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final
0.8	1.6718	595.1	0.0329	0.0432	0.0157	-10955.55	-0.8186	-6.7648	2	174.9	0.7951	15.7077	0.6489
1.0	1.8306	595.1	0.0361	0.0473	0.0172	-10955.54	-0.8186	-7.3725	2	184.8	0.9939	18.0442	0.5684
1.4	1.9277	595.1	0.0380	0.0498	0.0181	-10955.57	-0.8186	-7.6980	2	202.7	1.3916	24.2622	0.4276
1.6	2.0476	595.1	0.0403	0.0529	0.0192	-10955.59	-0.8186	-8.1416	2	211.7	1.5904	26.2555	0.3974
2.0	2.3651	595.1	0.0466	0.0611	0.0222	-10955.57	-0.8186	-9.3093	2	232.6	1.9882	28.8013	0.3672
2.1	2.4494	595.1	0.0483	0.0633	0.0230	-10955.54	-0.8186	-9.6175	2	237.5	2.0876	29.2965	0.3621
2.9	3.0630	595.1	0.0604	0.0791	0.0288	-10956.25	-0.8187	-11.8202	2	272.6	2.8830	33.1157	0.3279
3.0	3.1395	595.1	0.0619	0.0811	0.0295	-10955.55	-0.8186	-12.0721	2	279.6	2.9823	33.5847	0.3249
3.5	3.5153	595.1	0.0693	0.0908	0.0330	-10955.58	-0.8186	-13.1744	2	329.5	3.4795	36.2353	0.3118

B80 BP kW	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA				ANÁLISIS	
	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final
0.8	1.7995	595.1	0.0357	0.0466	0.0173	-11002.65	-0.8284	-7.2966	2	163.8	0.7932	14.5532	0.7312
1.0	1.9701	595.1	0.0391	0.0510	0.0189	-11002.72	-0.8284	-7.9510	2	173.8	0.9915	16.7200	0.6404
1.4	2.0632	595.1	0.0409	0.0534	0.0198	-11002.66	-0.8284	-8.2522	2	192.7	1.3883	22.6208	0.4790
1.6	2.1594	595.1	0.0429	0.0559	0.0207	-11002.72	-0.8284	-8.6000	2	201.6	1.5866	24.8425	0.4387
2.0	2.4945	595.1	0.0495	0.0646	0.0239	-11002.70	-0.8284	-9.8395	2	221.4	1.9834	27.2293	0.4054
2.1	2.5736	595.1	0.0511	0.0666	0.0247	-11002.71	-0.8284	-10.1218	2	227.4	2.0827	27.8210	0.3983
2.9	3.1761	595.1	0.0630	0.0822	0.0305	-11001.46	-0.8282	-12.2459	2	267.3	2.8760	31.9744	0.3559
3.0	3.2484	595.1	0.0645	0.0841	0.0312	-11002.70	-0.8284	-12.4815	2	274.3	2.9754	32.4920	0.3519
3.5	3.7464	595.1	0.0743	0.0970	0.0360	-11002.71	-0.8284	-14.0641	2	319.5	3.4707	33.9222	0.3479

B100 BP kW	COMPRESOR		REACTOR CSTR					TURBINA				ANÁLISIS	
	Hp comp kW	Tout °C	CO2	Wáter out	O2 out	h cal/mol	S in cal/mol	Hp turbina kW	Presión bar	Tout °C	W REAL SIM	eficiencia SI	BSFC final
0.8	1.8147	595.1	0.0363	0.0471	0.0178	-11054.02	-0.8444	-7.3712	2	152.8	0.7911	14.3977	0.7736
1.0	2.0312	595.1	0.0406	0.0527	0.0199	-11053.98	-0.8444	-8.2160	2	161.7	0.9889	16.1688	0.6927
1.4	2.2418	595.1	0.0448	0.0582	0.0220	-11053.95	-0.8444	-8.9867	2	180.6	1.3846	20.7561	0.5460
1.6	2.3248	595.1	0.0465	0.0603	0.0228	-11054.01	-0.8444	-9.2841	2	188.5	1.5824	22.9909	0.4954
2.0	2.6332	595.1	0.0527	0.0683	0.0258	-11053.96	-0.8444	-10.4407	2	203.4	1.9782	25.6164	0.4489
2.1	2.7150	595.1	0.0543	0.0705	0.0266	-11053.96	-0.8444	-10.7394	2	208.3	2.0772	26.1700	0.4408
2.9	3.3537	595.1	0.0671	0.0870	0.0329	-11054.01	-0.8444	-12.9761	2	253.1	2.8689	30.1379	0.3942
3.0	3.4249	595.1	0.0685	0.0889	0.0336	-11053.98	-0.8444	-13.1988	2	261.0	2.9679	30.6940	0.3892
3.5	3.8400	595.1	0.0768	0.0997	0.0377	-11053.99	-0.8444	-14.5520	2	293.9	3.4626	32.6737	0.3740