



Universidad de Valladolid

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y
FLUIDOMECÁNICA

TESIS DOCTORAL:

**COMBUSTIÓN DE MEZCLAS DE
GASÓLEO Y ACEITES VEGETALES PARA
SU USO COMO COMBUSTIBLE EN
CALDERAS DE BAJA POTENCIA**

Presentada por **Ismael Gobernado Arribas** para
optar al grado de doctor por la Universidad de
Valladolid

Dirigida por:
Dr. Julio San José Alonso
Dr. Fco. Javier Rey Martínez

CONTENIDO

CAPITULO 1

ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES.....	6
1.1.1.Introducción	6
1.1.2.Escenarios energéticos.	9
1.1.2.1. Factores económicos.....	9
1.1.2.2. Factores medioambientales.....	12
1.1.2.3. Limitaciones tecnológicas.....	14
1.1.3.La biomasa en el contexto energético.....	16
1.1.4.Los biocombustibles.....	18
1.2 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	21
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS	22
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 1	26

CAPITULO 2

POTENCIAL DE BIOMASA EN CASTILLA Y LEÓN

2.1 INTRODUCCIÓN	29
2.2 CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA	30
2.2.1.Clasificación de la biomasa por su origen.....	30
2.2.2.Clasificación de los biocombustibles según su estado	32
2.3 VALORACIÓN DE LOS POTENCIALES DE BIOMASA.	33
2.4 DISPONIBILIDAD DE BIOMASA EN CASTILLA Y LEÓN.	35
2.4.1.Biomasa forestal	35
2.4.2.Cultivos energéticos.....	37
2.4.3.Restos agrícolas.....	42
2.4.4.Biomasa ganadera.....	43
2.4.5.Restos de la industria de la madera.....	47
2.4.5.Biomasa de origen urbano y de otras industrias.....	48
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 2	50

CAPITULO 3

COMBUSTIBLES

3.1 INTRODUCCIÓN	51
3.2 NATURALEZA DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS.....	52
3.2.1.El aceite vegetal.....	53
3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS COMBUSTIBLES.	57
3.3.1.Densidad	57
3.3.2.Viscosidad	59
3.3.3.Poder calorífico.	62
3.3.4.Contenido de azufre.....	63
3.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE COMBUSTIBLES A ESTUDIAR.....	63
3.4.1.Aceites a estudio.....	63
3.4.2.Caracterización de los aceites como combustibles.....	68

3.5. MISCIBILIDAD Y/O SOLUBILIDAD DE ACEITES EN GASÓLEO.....	69
3.5.1. Caracterización de las mezclas.....	71
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 3	74

CAPITULO 4

COMBUSTION

4.1 INTRODUCCIÓN.....	75
4.2 COMBUSTIÓN POR DIFUSIÓN.....	76
4.2.1 Atomización.....	78
4.2.2 Atomizador de presión con rotación (PSN) utilizado	87
4.3 ESTEQUIOMETRÍA	89
4.3.1 Determinación del aire de combustión	90
4.3.2 Determinación de los productos de la combustión.....	92
4.4 HOJA DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN DE LAS MEZCLAS.....	93
4.4.1 Propiedades termoquímicas.....	95
4.4.2 Poder calorífico de las muestras.....	96
4.4.3 Rendimiento de la combustión	96
4.5 EMISIONES DE GASES DE COMBUSTIÓN.....	99
4.5.1 Gases de efecto invernadero.....	100
4.5.2 Óxidos de nitrógeno.....	101
4.5.3 Monóxido de carbono.....	102
4.5.4 Óxidos de azufre.....	102
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 4	103

CAPITULO 5

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUCCIÓN.....	104
5.2 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	104
5.2.1 Sistema de alimentación de la mezcla.....	105
5.2.2 Conjunto quemador-caldera.....	108
5.2.3 Instalación de disipación.....	114
5.2.4 Sistema de control y medida.....	114
5.3 METODOLOGÍA DE ENSAYO.....	116
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 6	118

CAPITULO 6

DISEÑO DE EXPERIMENTOS

6.1 INTRODUCCIÓN.....	119
6.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	120
6.1 Introducción	120
6.2 Terminología.....	121
6.3 Técnicas de diseño de experimentos	122
6.3 FACTORES Y NIVELES	124
6.4 MATRIZ DE EXPERIMENTOS.....	127
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 6	131

CAPITULO 7

MEDIDAS EXPERIMENTALES

7.1 INTRODUCCIÓN	132
7.2 PROCESO DE ENSAYOS	133
7.3 PROBLEMÁTICA EN LA FASE DE EXPERIMENTACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	134
7.4 TOMA DE DATOS	134
7.5 ANÁLISIS DE COMBUSTIÓN	135
7.5.1.Emisiones de gases contaminantes.....	135
7.5.2.Eficiencia de la combustión	136
7.5.3.Gases de efecto invernadero	136
7.6 RESULTADOS.....	137

CAPITULO 8

ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. INTRODUCCIÓN.....	149
8.2. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS ANOVA	150
8.3. ESTUDIO DEL RENDIMIENTO.....	152
8.3.1.Análisis del rendimiento para p=10 bar.....	152
8.3.2.Análisis del rendimiento para p=12bar.....	168
8.3.2.1. Conclusiones	183
8.5.1.Análisis del rendimiento para p=14 bar.....	184
8.3.3.1. Conclusiones	199
8.5.2.Análisis del rendimiento para A=3,5	200
8.3.4.1. Conclusiones	214
8.4. ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE CO.....	215
8.5.1.Análisis a de las emisiones de CO a P=10 BAR.....	215
8.4.1.1. Conclusiones	230
8.5.2.Análisis a de las emisiones de CO a P=12 BAR.....	231
8.4.2.1. Conclusiones	245
8.5.3.Análisis de las emisiones de CO a P=14 BAR.....	246
8.4.3.1. Conclusiones	261
8.5.4.Análisis de las emisiones de CO para a =3,5.....	262
8.4.4.1. Conclusiones	277
8.5. ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE NO _x	278
8.5.1.Análisis de las emisiones de NO _x para P=10bar.....	278
8.5.1.1. Conclusiones	293
8.5.2.Análisis a de las emisiones de NO _x a P=12 BAR	294
8.5.2.1. Conclusiones	309
8.5.3.Análisis de las emisiones de NO _x a P=14 BAR	310
8.5.3.1. Conclusiones	325
8.5.4.Análisis de las emisiones de NO _x para A=3,5.....	326
8.5.4.1. Conclusiones	341

CAPITULO 9

CONCLUSIONES

9.1 INTRODUCCIÓN.....	343
9.2 CONCLUSIONES	344
9.2.1. Los biocombustibles como recurso energético.	344
9.2.2. Caracterización de los biocombustibles.....	344
9.2.3. Adecuación del combustible	345
9.2.4. Combustión de las mezclas	345
9.2.5. Análisis de los resultados.....	346
9.3 DESARROLLOS FUTUROS	347
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 9	349

ANEXOS

A1. ANÁLISIS DE LOS ACEITES.....	351
A2. CALIBRACIÓN DEL ANALIZADOR	357

CAPITULO 1

ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES.

1.1.1. Introducción

En el siglo XX la evolución de la sociedad ha estado estrechamente relacionado con la innovación tecnológica, que ha obligado a la explotación cada vez más intensa de las fuentes de energía¹, esto ha dado protagonismo a las fuentes de energía y a su repercusión sobre el medio ambiente².

Este problema se espera se agrave durante el siglo XXI, debido al acceso al desarrollo económico y tecnológico de nuevas áreas geográficas del planeta, además las primeras etapas de desarrollo económico de los países vienen caracterizados por fuertes consumos de energía³.

El modelo actual puede clasificarse de injusto, limitado e insostenible económica y medioambientalmente. El desequilibrio entre países pobres y ricos, productores y consumidores es fuente de inestabilidad y conflictos.

¹ Price, David, Energy and human evolution. Population and environment: a journal of interdisciplinary studies, vol. 16, Num. 4 (1995).

² Robert A. Hefner, the grand energy transition: the rise of energy gases, sustainable life and growth, and the next great economic expansion, John Wiley & Sons. (2009).

³ Dopazo, Cesar, Tendencias en el Sector Energético, Congreso la Energía, un Sector en transformación: Retos y Oportunidades, Valladolid (2010)

El modelo energético por otra parte es decisivo para el crecimiento económico.⁴

En este contexto, el modelo energético de los países desarrollados fija como estrategias: i) disponibilidad a medio y largo plazo, ii) confiabilidad, iii) coste y iv) impacto ambiental. Este nuevo enfoque se inscribe dentro del concepto de desarrollo sostenible. El término desarrollo sostenible se aplica al desarrollo socio-económico y fue formulado por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland⁵ (1987) fruto de los trabajos de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas en 1983. El concepto de desarrollo sostenible se asumiría en el Principio 3º de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992).

La preocupación por el agotamiento progresivo de las energías fósiles, junto con los problemas de cambio climático causados por el uso de dichas energías y el principio de sostenibilidad, requieren un nuevo escenario energético.

La política energética europea aborda este nuevo escenario sobre tres conceptos: diversificación energética, eficiencia energética y sostenibilidad, la **diversificación** sigue siendo uno de los criterios fundamentales a la hora del planteamiento de una estrategia energética asumible, al tener obligatoriamente que seguir utilizando a medio plazo las fuentes fósiles e ir incrementando otras fuentes de origen renovable y energía nuclear⁶.

La eficiencia energética a escala de país se valora como la relación entre la energía primaria y el P.I.B. España presenta un ratio más desfavorable que el resto de la Unión Europea, la **Intensidad energética** es de las más altas, aunque también en los últimos años ha bajado. Aún así se sitúa muy por encima de los valores medios europeos, baste señalar, que España es el país europeo que menos mercancías transporta por ferrocarril aún siendo éste más eficiente que el transporte por carretera.⁷ Como se puede ver en la gráfica 1.1.

La **sostenibilidad energética** representada por el uso de energías renovables no presenta en España tampoco perspectivas económicas demasiado estables. Se han modificando primas con carácter retroactivo, recientemente se han suspendido temporalmente las primas a las

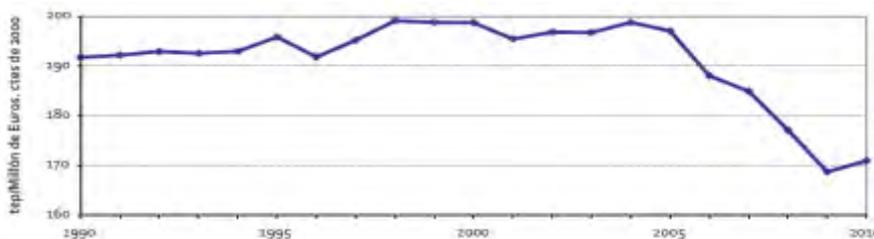
⁴ Eurostat, Sustainable development indicators, Web Eurostat (2005).

⁵ H. Brundtland, Informe "Our Common Future", ONU (1987).

⁶ Becerril, Carmen, Opciones energéticas para la década 2010-2020: el lugar de las energías renovables, Congreso la Energía, un Sector en transformación: Retos y Oportunidades, Valladolid (2010)

⁷ Club español de la energía, Conceptos de ahorro y eficiencia energética: Evolución y oportunidades, (2010).

renovables para generación eléctrica por lo que se ha creado un marco de inseguridad que aleja posibles inversiones en ese campo al reducirse la rentabilidad y como consecuencia se producirán retrasos en alcanzar los objetivos⁸.



Gráfica 1.1: Intensidad energética en España (energía primaria/PIB)⁹

La evolución de la incidencia de las energías renovables en P.I.B. de España se presenta en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Contribución directa al P.I.B. por tecnologías en millones de euros¹⁰

Millones de €	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Biocarburantes	71,4	81,7	87,5	90,2	2009,1	334,8
Biomasa	665,6	657,5	668,3	698,6	661,3	702,9
Eólica	1.444,1	1.728,3	1.933,1	2.311,0	1.953,0	1.813,3
Geotermia alta temp.	3,8	6,4	8,0	10,7	12,0	13,6
Geotermia baja temp.	1,2	1,5	2,1	4,0	8,0	14,4
Minihidráulica	351,2	403,4	328,6	375,4	348,2	406,4
Marina	2,6	3,6	4,4	5,0	6,0	7,7
Minieólica	30,1	26,1	29,4	32,8	33,8	39,0
Solar fotovoltaica	228,7	253,1	300,2	1.216,6	2.716,9	2.774,9
Solar termoelectrica	---	3,9	34,9	61,1	212,2	637,1
Contribución directa al PIB	2.798,7	3.165,7	3.396,4	4.805,4	6.170,5	6.744,0

La respuesta Europea desde el tratado de Lisboa es utilizar la política energética y las energías renovables como la locomotora del desarrollo

⁸ Secretaría de Estado de energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Informe de Sostenibilidad Ambiental del Plan de Energías Renovables 2011-2020 Gobierno de España 2011.

⁹ Secretaría de Estado de Energía Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Energía en España 2010, Gobierno de España (2011).

¹⁰ APPA Estudio del impacto Macroeconómico de las energías renovables en España, año 2010, Madrid, 2010

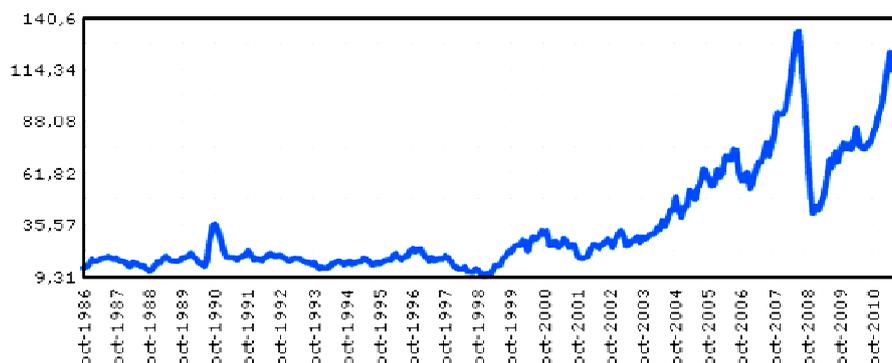
económico, La Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, el SET Plan (EuropeanStrategicEnergyTechnology Plan) marcan los objetivos de la política energética comunitaria y establecen los objetivos que deberán cumplirse en los próximos años¹¹.

1.1.2. Escenarios energéticos.

Cualquier escenario energético debe responder a tres retos: el económico, el medioambiental y el tecnológico, aunque en muchos casos no es fácil la separación de los campos por las interrelaciones entre ellos.

1.1.2.1. Factores económicos.

La crisis energética de los años 1973 y 1974 hizo que los países industrializados orientaran sus políticas energéticas hacia escenarios de menor consumo relativo de energía y a una mayor seguridad en los suministros. Casi cincuenta años después los países desarrollados siguen buscando tanto la estabilidad en el consumo energético como la seguridad de los suministros de energía¹². Baste observar la gráfica 1.2 de precios del **petróleo crudo Brent en los últimos 30 años** en dólares por barril para observar la poca estabilidad del mismo.



Gráfica 1.2: Evolución del precio del petróleo crudo Brent. Fuente: US EnergyInformationAdministration¹³.

Sería fácil identificar por las fechas de los repuntes del precio las distintas crisis mundiales, Guerra entre Irán e Irak, Invasión de Irak a Kuwait, Crisis de Irán, etc.

¹¹ Diario Oficial de la Unión Europea C 306, de 17/12/2007 "Tratado de Lisboa" 2007.

¹² Club español de la energía, Política energético y medioambiental en la Unión Europea. Situación y perspectivas, 2009.

¹³ <http://www.platts.com>

Estos problemas se ven agravados por la forma tan heterogénea en que los recursos están repartidos en el planeta, lo que provoca que existan países con un alto consumo energético sin reservas energéticas y viceversa, en la figura 1.1 se puede observar cómo se distribuyen las diferentes fuentes fósiles en el planeta.¹⁴

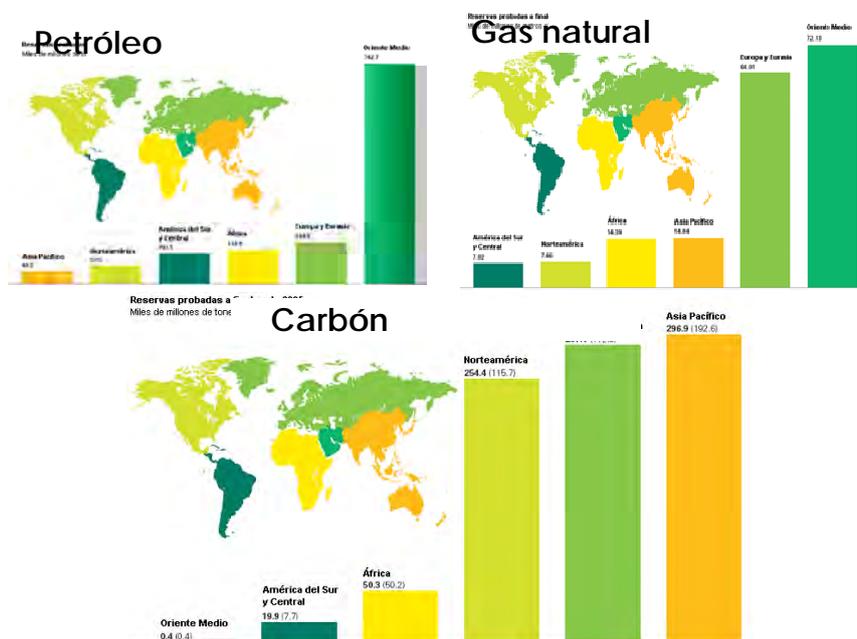


Figura 1.1: Localización geográfica de las reservas en el planeta.

La elevada **dependencia energética** es una constante en los países de la OCDE, España se sitúa entre los de cabeza con una dependencia sobre el 80%. La dependencia ha bajado en los últimos años debido a la reducción del consumo total lo que hace que la contribución de las energías renovables aumentara y disminuyera la dependencia, se puede observar en la tabla 1.2¹⁵.

¹⁴ BP Statistical Review of World Energy 2006.

¹⁵ IDAE, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Observatorio de energías renovables, julio 2010.

Tabla 1.2: Evolución de la energía primaria en España.¹⁶

Energía primaria	2008		2009		Variación 08/09
	ktep	Estruct.	ktep	Estruct.	
Carbón	13.983	9,8%	10.353	7,9%	-26,0%
Petróleo	68.182	47,9%	63.673	48,8%	-6,6%
Gas natural	34.782	24,4%	31.104	23,8%	-10,6%
Nuclear	15.368	10,8%	13.750	10,5%	-10,5%
Energías renovables	10.942	7,7%	12.325	9,4%	12,6%
Saldo eléctrico	-949		-697		
Total	142.308		130.508		-8,3%

En el año 2010 las importaciones de petróleo y gas por valor de 34.500 M€ ha supuesto el 66% del déficit comercial total, la reducción de consumo y el cambio de las fuentes de energía fósiles por renovables se hace inevitable a corto plazo.

A todo lo anterior hay que añadir, el agotamiento de las fuentes de energías fósiles debido a la sobre explotación durante todo el siglo XX, existen multitud de estudios que fijan un periodo de máximo consumo y después prevén la desaparición de estas fuentes, si bien el incremento de costes provoca que año tras año se incrementan las reservas energéticas, en la figura 1.2, se observa una de estas previsiones.¹⁷

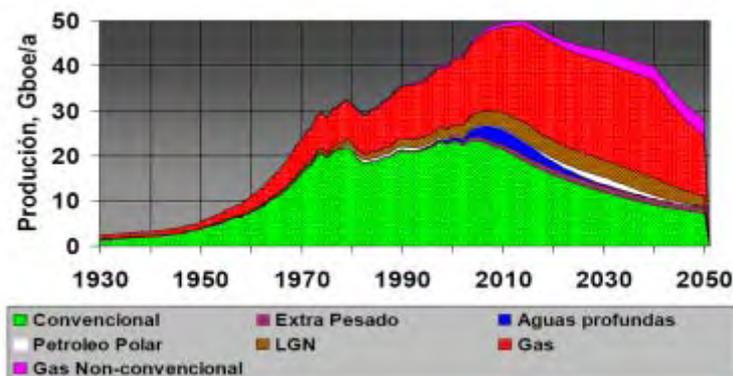


Figura 1.2: Evolución de la producción de combustibles en el mundo

¹⁶ APPA, Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España, año 2010, Madrid 2010.

¹⁷G. Wolff, ¿Se puede prescindir de los combustibles derivados del petróleo? Jornadas Retos y problemas de combustibles actuales, Universidad de Valladolid, noviembre 2009.

Las energías fósiles presentan los siguientes problemas: i) la inestabilidad y aumento de los precios, ii) la excesiva dependencia de un recurso distribuido de forma heterogénea en el planeta y iii) la previsión de agotamiento de las fuentes. Estas amenazas han provocado que desde 1991 el Consejo Europeo hiciera el primer programa europea de ahorro y eficiencia energético conocido como SAVE (“SpecificActionsforVigorousEnergyEfficiency”), que sucesivamente ha ido actualizando hasta el actual programa Energía Inteligente- Europa (2007-2013).¹⁸

El Consejo Europeo ha adoptado unos objetivos ambiciosos para el 2020: los objetivos 20-20-20, que representan: reducir el consumo previsto para el 2020 en un 20%, reducción al menos un 20% las emisiones de efecto invernadero de 2020 en comparación con 1990 y lograr que las energías renovables representen el 20% del consumo energético de la EU en 2020. Estos objetivos se recogen en el Libro Verde sobre la estrategia europea para la energía, que perfila la nueva política energética europea,¹⁹ y la Comunicación de la comisión “Dos veces 20 para el 2020 – El Cambio Climático una oportunidad para Europa”²⁰.

1.1.2.2. Factores medioambientales.

Las estrategias energéticas y medioambientales de los países desarrollados van encaminadas a la reducción del consumo de energía y a la reducción del impacto ambiental que generan sobre todo el empleo de combustibles fósiles.

El protocolo de Kioto, vencido recientemente (2012) y prorrogado en la cumbre de Durban hasta 2015, los compromisos de la Cumbre de Bali de diciembre de 2007 y los de la Cumbre de Copenhague, diciembre de 2009, fijan objetivos hasta el año 2020, aunque dichos compromisos no son vinculantes marcan una tendencia de fuerte reducción de las emisiones para que la temperatura media del planeta no supere los 2°C²¹.

En el caso de la Unión Europea, junto con la disminución de emisiones de GEI se plantean retos en la política energética respecto a la seguridad del

¹⁸ R. Sánchez Durán, Marco legal Europeo y Español, Conceptos de ahorro y eficiencia energética: Evolución y oportunidades, Club Español de la energía (2010).

¹⁹ Superficies y producciones de cultivos agrícolas de tipo herbáceo en Castilla y León. Instituto Tecnológico Agrícola de Castilla y León (ITACYL), 2005- 2007

²⁰ DIRECTIVA 2003/30/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 8 de mayo de 2003 relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte 2003

²¹Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009.

suministro y a la dependencia exterior de sus fuentes de energía ya recogidos en el **Libro Verde**²² del año 2001.

El Consejo Europeo en la “Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social y al Comité de las Regiones”, dos veces 20 para el 2020, El cambio Climático, una oportunidad para Europa, fija los dos objetivos fundamentales²³:

- Reducción de al menos un 20% de emisiones de GEI.
- La aportación al consumo de energía de la UE en 2020 de las energías renovables sea de un 20%.

Para el cumplimiento de este último objetivo la UE articula la **Directiva 2009/28/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009 con el objetivo del fomento de las energías renovables.

La transposición a la legislación española se realiza a través del Artículo 78 de la **Ley 2/2011** de 4 de Marzo, de Economía Sostenible donde se fijan los objetivos nacionales en materia de ahorro y eficiencia energética y energías renovables. Reconoce esta Ley la necesidad de orientar las políticas y los incentivos públicos al desarrollo de las diversas fuentes de energía y a la mejora de la eficiencia energética. Las medidas concretas se recogen en el PANER²⁴ (Plan de Acción nacional de energías renovables) y en el PER

Estos objetivos en resumen, suponen un 20 por ciento de participación en el consumo de energía final de las energías renovables, incluyendo una participación en todos los tipos de transportes de un mínimo equivalente al 10 % del consumo total de energía del sector transporte.

Al mismo tiempo fija un objetivo general de reducción de demanda de energía primaria de acuerdo con el objetivo de la Unión Europea del 20 % en 2020.

Para dar cumplimiento a la Directiva 2009/28/CE sobre la adopción por cada estado miembro de un plan de acción en materia de energía renovable se aprueba el **PANER 2011-2020** (Plan de Acción Nacional de Energías Renovables) desarrollado según los requerimientos y la metodología de la Directiva Europea, recogiendo en él las aportaciones de las distintas Comunidades Autónomas.

²²Hacia una estrategia Europea de seguridad del abastecimiento energético. (2001).

²³ Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, “Dos veces 20 para el 2020 El cambio climático, una oportunidad para Europa” Bruselas, 23.1.2008 COM 2008

²⁴ Plan de Acción nacional de energías renovables 2011-2020 (30 de Junio 2010)

El PER, (Plan de energías renovables) pendiente de su aprobación, desarrolla los elementos esenciales del PANER junto con análisis adicionales no contemplados en él y un estudio por sectores conteniendo las perspectivas de evolución tecnológica y la evolución esperada en costes.

1.1.2.3. Limitaciones tecnológicas.

La tecnología es elemento fundamental en la mejora de la eficiencia energética y en el aprovechamiento de las energías renovables, la utilización de tecnologías inadecuadas produce: reducción en la eficiencia del sistema, incremento de costes e incrementa el impacto medioambiental. Así la inversión requerida por las instalaciones de producción de energía final hace que, en general, el coste total de producción de un kWh de electricidad sea alrededor del doble del coste que supone ahorrar ese kWh. Desde este punto de vista, las inversiones en la mejora de la eficiencia energética tienen casi siempre un efecto positivo en el empleo.²⁵

La clasificación de las tecnologías se realiza atendiendo a la cadena de valor de la energía. Así se distingue entre tecnología de: oferta, demanda y consumo.

Dentro de las tecnologías de **oferta** se incluirán aquellas que transforman la energía primaria en final, es decir las referidas a la transformación de la energía.

Las tecnologías de **demanda** se refieren a la utilización a la que está destinada la energía como las del sector servicios: rendimiento de generadores térmicos, sistemas de control de la instalación, etc.

Las tecnologías de **consumo** se refieren al estilo de vida, ocio, hábitos, así, las que ofrecen alternativas a los hábitos de uso permiten un consumo más racional y por tanto un comportamiento eficiente. Éstas tienen un efecto multiplicador ya que evitan producirla y, por tanto, también se evita las consiguientes pérdidas en transformación y su distribución para el consumo.

La tecnología de oferta se ve influenciada por el origen de la fuente primaria y la energía final a obtener, existiendo una gran variedad de posibilidades y tecnologías asociadas, la situación actual se puede resumir en la figura 1.3.

²⁵ SAVE study, ACE, UK. National and local employment impacts of energy efficiency investment programmers, (2000).

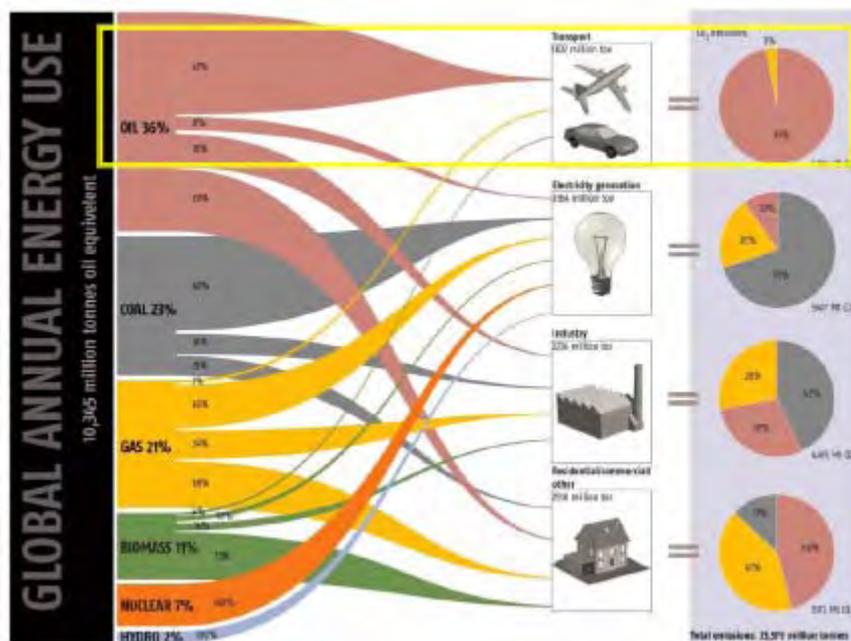


Figura 1.3: relación entre fuente de energía primaria y fuente de energía final.²⁶

El desarrollo de la presente tesis se basa en el estudio de la combustión de mezclas de aceites vegetales con gasóleo, incide por lo tanto directamente en el empleo de biomasa aunque de forma complementaria al uso de combustible fósil, al objeto de aprovechar la tecnología desarrollada y existente para estos combustibles.

La utilización de la biomasa requiere un análisis detallado del tipo de biomasa y el proceso de transformación más adecuado. En la tabla 1.3 se presenta la tecnología más adecuada según el origen de la biomasa, *Tinaut*²⁷.

La biomasa puede tener que ser transformada en un producto energético intermedio (biocombustibles, pellets, etc.); este proceso debe ser lo más simple posible, repetitivo y que no incida excesivamente en el precio final de la energía. El uso final de la biomasa o de su producto intermedio puede ser obtener energía mecánica u obtener energía térmica. La obtención de energía mecánica requiere de motores térmicos, los cuales han llegado a un punto de ajuste, que obliga a los biocarburantes a poseer unas propiedades con límites muy estrechos, que requiere de

²⁶EIQ. Energy International Quarterly Mayo/Junio 2010

²⁷Tinaut F., "Biomasa: la energía renovable con mayor potencial", Jornadas sobre Energías Renovables, Cátedra de Energías Renovables de la Universidad de Valladolid, Abril de (2004).

elevados controles en toda la cadena de valor de los biocarburantes²⁸, lo que encarece el producto. La obtención de energía térmica permite muchas más posibilidades, aunque el valor de esta energía es inferior.

Tipo de Biomasa	Tecnología más adecuada						
	Termoquímicas			Químicas y biológicas			Extracción directa
	Combustión	Gasificación	Pirólisis	Digestión anaerobia	Hidrólisis y/o fermentación	Transesterificación	Aceites de oleaginosas
Residuos forestales							
Residuos agrícolas							
Cultivos energéticos							
Residuos ganaderos							
Industria agroforestal y alimentaria							

Tabla 1.3: Tecnología más adecuada según el origen de la biomasa.

1.1.3. La biomasa en el contexto energético.

El uso de la biomasa con fines energéticos hoy día tiene dos limitaciones: la sostenibilidad de la biomasa²⁹ y no ser usada otros fines³⁰, especialmente alimentarios, con estas restricciones la definición de biomasa sería el conjunto de materia orgánica renovable, de origen vegetal o animal no utilizable para consumo humano o industrial y que mediante procesos fisicoquímicos o bioquímicos puede transformarse en energía.

²⁸European Norm 14214, Automotive fuels – Fatty Acid Methyl Esters (FAME) for Diesel Engines, Requirements and Test Methods, EU, 2009.

²⁹ Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the council of 23 April 2009.

³⁰ Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, “El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2008”, Roma 2008.

La reserva de biomasa es enorme, aunque la valoración del potencial energético presenta serias dificultades por la diversidad de su origen y por las múltiples formas de aprovechamiento, hay cierto consenso entre los criterios de instituciones internacionales AIE, ONU y sus órganos encargados el medio ambiente, la UE, etc. en que la biomasa representa la de mayor peso, con un objetivo para el 2020 del 60% de las energías renovables y el 12-15% del consumo total de energía primaria. Estos valores varían sustancialmente de unos países a otros, en la actualidad constituye un 3% de la demanda total de energía primaria en los países desarrollados, un 4% en la UE, frente a un 30-35% en países subdesarrollados³¹.

Las sociedades desarrolladas no solo se caracterizan por el enorme consumo energético sino que también son generadores de una gran cantidad de **residuos**, muchos de ellos orgánicos, con un contenido elevado de energía y de materias primas. Es necesario el desarrollo de técnicas de valorización de dichos residuos como fuente de energía y de materias primas y que al mismo tiempo den solución a la acumulación de residuos, en el caso de los orgánicos son fuente de generación de Gases de Efecto Invernadero, GEI de gran Potencial de Calentamiento Global, PCG, como el caso del Metano, con un índice de PCG de 62. Otros residuos son causa de otros problemas, como el caso de los residuos forestales que pueden ser fuentes de incendios forestales³².

La biomasa puede también provenir de cultivos específicos para producción de combustibles, a modo general las plantas pueden ser fermentables como los cereales o la caña de azúcar, que dan origen a alcoholes o plantas oleaginosas para producción de aceites como colza, girasol, soja, etc. que pueden ser utilizados directamente como combustibles en calderas o mediante procesos como la transesterificación para su uso como biodiesel.

La política de desarrollo de la biomasa debe seguir estrictos criterios de **sostenibilidad**, desde organizaciones como la Food and Agriculture Organization de Naciones Unidas FAO en la Conferencia de Alto Nivel sobre Seguridad Alimentaria Mundial se alerta sobre la incidencia en los precios de los alimentos por el aumento de cultivos energéticos³³.

Las políticas energéticas a las que estamos sujetos en nuestro ámbito próximo emanan de las Directivas de la CE que dejan la consecución de los objetivos globales a los distintos Estados miembros y son estos

³¹ D.L. Klass, Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals, ISBN 10:0-12-410950-0 Londres 1998.

³² M. Lauer, Current terrestrial methods and activities for biomass potential assessment in Europe, 17th European Biomass Conference & Exhibition, Hamburg 2009.

³³ Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, "El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2008", Roma 2008.

últimos los que han de establecer la cuota de energía procedente de fuentes renovables.

La Comunidad establece a través de la Directiva 2009/28/CE los mecanismos de supervisión, control y procedimientos y criterios de valoración, cálculo de parámetros, criterios de sostenibilidad, métodos de cálculo de emisiones de GEI, etc³⁴.

En el PANER se recoge la estimación de la contribución total previsible de cada tecnología de energía renovable en España al cumplimiento de los objetivos vinculantes para 2020 y trayectoria indicativa correspondientes a las cuotas de energía procedentes de recursos renovables en los distintos sectores³⁵.

1.1.4. Los biocombustibles.

Los denominados biocombustibles son todos aquellos combustibles líquidos obtenidos a partir de productos agrícolas, grasas animales y plantas marítimas. Como criterio general, se considera cualquier biocombustible líquido, aquel que pueda ser utilizado en una central térmica en sustitución de combustibles fósiles.³⁶

Los aceites vegetales y animales han sido empleados comúnmente por el hombre como combustible para iluminación. Se datan lámparas de terracota de 7.000 a 8.000 A.C. encontradas en las planicies de Mesopotamia. Las colecciones de lámparas de aceite de todos los materiales y estilos constituyen piezas habituales en todos los museos arqueológicos.

Todas las culturas han utilizado aceites para las lámparas, junto con las velas y se han esforzado en aumentar la eficiencia de la iluminación, Hero de Alejandría en el siglo I D.C. inventó una lámpara alimentada por una columna de aceite en la que la presión de la columna alimentaba la mecha, Leonardo Da Vinci perfeccionó el invento añadiendo una lente de cristal. Las aportaciones continuaron consiguiendo lámparas con iluminación constante y de gran eficacia.

En el año 1830 Reichenbach y el Dr. Christiandescubrieron el queroseno y el uso de las lámparas de petróleo y queroseno se universalizaron desplazando al aceite al producir mejor iluminación.

³⁴DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE

³⁵Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011 - 2020 , 30 de Junio de 2010

³⁶European Biodiesel Board General Assembly, Annual Report 2006-07, p. 73, Nov. 2007.

En la actualidad el empleo de biomasa para usos térmicos está muy extendido y constituye una de las herramientas para hacer frente a la dependencia energética de los combustibles fósiles, a la reducción de la emisión de GEI y para contribuir al desarrollo agrario.

Obernberger I. realiza una exhaustiva revisión sobre las tecnologías asociadas a cada tipo de biomasa para su combustión con fines térmicos, estableciendo sus pros y sus contras³⁷, los trabajos realizados en el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE) de la Universidad de Zaragoza sobre la Co-combustión³⁸ y la revisión bibliográfica realizada por Spliethoff³⁹

Existen trabajos sobre el aprovechamiento de la biomasa con fines térmicos, Batey⁴⁰ realiza estudios sobre la combustión de biodiesel y mezclas de aceite y gasóleo en instalaciones residenciales de combustión, Vanlaningham⁴¹ estudia la combustión con fines térmicos del aceite de semilla de soja, San José⁴² que estudia la combustión de mezclas de aceite de soja, colza y girasol con gasóleo en diferentes proporciones y con diferentes parámetros de combustión en un quemador de pulverización mecánica por presión y también estudia la combustión de biodiesel que no cumple con las especificaciones para biocarburante⁴³.

Respecto al uso de grasas animales existen poca bibliografía, entre la que cabe destacar los trabajos realizados en la Universidad de Budapest el Dr. FerencLezsovits⁴⁴ utilizó la grasa animal para investigar acerca de su utilización en generadores de vapor industriales que trabajaban originalmente con gasóleo o gas natural. La utilización de este subproducto se hizo no sólo con el propósito de deshacerse y eliminar estos residuos, sino también con el de utilizar un combustible no fósil.

³⁷ I. Obernberger, Reached developments of biomass combustion technologies and future outlook, 17th European Biomass Conference and Exhibition, Hamburgo 2009.

³⁸ J. Royo, D. García, F. Sebastián y P. Canalís, La co-combustión: una alternativa para incrementar la contribución de la biomasa en el mercado eléctrico español. Centro de Investigación de Recursos y consumo Energéticos (CIRCE) (Universidad de Zaragoza), 2004.

³⁹Spliethoff, H.; Hein, K.R.G. "Co-combustión of coal and Biomass. Suitability of Combustion Systems and State of the Art".IVD, University of Stuttgart. Symposium Co-combustion and Gbiofuels, Nijmegen/NL, 8-9 November 1995.

⁴⁰Batey J., Combustión testing of a bio-diesel fuel oil blend in residential oil burning equipment, Tech. rep., Energy Research Center, prepared for: Massachusetts Oil heat Council & National Oil heat Research Alliance,2003.

⁴¹Vanlaningham N., Gibson H., Kaufman B., "Evaluación of soyben heating oil blends for use in residential applications", no. 046082, ASAE Paper, annual meeting held on August 23-24, 2004.

⁴² San José Alonso J.F, LópezSastre J.A., Romero-Avila C., "A note on the combustion of blends of diesel and soya, sunflower and rapeseed vegetable oils in a light boiler", Biomass & Bioenergy 32880–886, 2008.

⁴³ San José J., Awf Al-Kassir, LópezSastre J.A., Gañán J. "Analysis of biodiesel combustion in a boiler with a pressure operated mechanical pulverization burner", Fuel Processing Technology 92 271–277, 2011.

⁴⁴Lezsovits F., Könczöl S., Sagát L.. "Animal-fat firing investigation and realization in industrial steam generators".16th European Biomass Conference & Exhibition. Valencia 2008.

Para aplicar esta tecnología fue necesario realizar una clasificación en función de las propiedades de cada grasa (por ejemplo, la evolución de la viscosidad y de la densidad con la temperatura). Posteriormente se comparó el funcionamiento de los generadores de vapor con dichas grasas con el de los combustibles de trabajo originales; se obtuvieron unos resultados prometedores pero hubo ciertos problemas en la regulación de potencia así como en el abastecimiento del combustible debido a la reducción de la vida útil de algunos elementos del quemador. Finalmente se modificaron los quemadores por otros rotatorios e integrados en la caldera, satisfaciendo así todos los requisitos, incluidos los ambientales.

En Alemania *F. Pfab*⁴⁵ realizó un tratamiento y una posterior combustión de la grasa animal, proveniente de las plantas de transformación, para la generación de vapor en una caldera tubular. Antes de introducir la grasa en el quemador debe ser limpiada utilizando un decantador y un separador. La innovación introducida en la tecnología de este estudio fue realizar la combustión de la grasa animal con una presión de inyección por debajo de los 10 bar, comparada con la presión convencional de 30 bar; esto fue posible gracias a inyecciones adicionales de vapor. Esta variación permitió reducir el desgaste de elementos como la bomba de combustible y la boquilla de inyección, a la vez que se redujeron las emisiones de NOx gracias a la disminución de temperaturas en la reacción. De esta forma se alcanzaron los valores límite de emisiones permitidas y se redujeron los costes de operación al mismo tiempo que se fueron ampliando las posibilidades de generación de vapor con combustible no fósil. Esta tecnología se ha desarrollado comercialmente con más de 12 sistemas instalados y operando en plantas de transformación.

*J. San José*⁴⁶, realizó varios estudios sobre la combustión de manteca de cerdo en un quemador comercial y sobre la miscibilidad de la manteca de cerdo en gasóleo, estos estudios planteaban un importante campo de trabajo en la caracterización de grasas animales y su utilización como combustibles en instalaciones convencionales de gasóleo.

El profesor AfshinGhorbani de la Universidad Tecnológica del Petróleo de Irán ha realizado múltiples estudios comparativos de la eficiencia y emisiones de combustión de biodiesel y aceites vegetales⁴⁷, los estudios

⁴⁵ Pfab F. "Processing and combustion of animal fat from animal waste rendering plants for steam generation in a smoke tube boiler". 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Roma 2004.

⁴⁶ San José J., López J.A., Romero-Ávila C. y San José L.M., "Combustion of Animal Fat and Diesel Mixtures in a Mechanical Pulverization Burner", 5 th Annual Symposium on Environment Environmental Engineering and Sustainability. Atenas 2010.

⁴⁷ AfshinGhorbani, Combustion Performance and Emissions of Methyl Ester of Some Vegetable Oils in a Water-Cooled Furnace, Society of Petroleum Engineers, ISBN: 978-1-55563-260-1, 2009.

del profesor N. Vanlaningham y otros sobre la evaluación de la combustión de mezclas de soja gasóleo en generadores térmicos para climatización⁴⁸ y los trabajos realizados por Bemtgen sobre la combinación en la combustión de biomasa y combustibles fósiles⁴⁹.

1.2 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.

En la actualidad, los mayores esfuerzos en el uso de combustibles procedentes de biomasa están siendo dirigidos al empleo de biocombustibles para la obtención de energía mecánica. Los fuertes compromisos en este sentido limitan el uso de biolíquidos para otros usos como la obtención de energía térmica.

En el contexto internacional, europeo, nacional y regional se sigue apostando por la biomasa como una energía que posee gran potencial lo que justifica investigaciones y estudios sobre desarrollos de nuevas alternativas energéticas.

La tecnología utilizada, combustión directa de biolíquido en calderas de baja potencia, es una tecnología ampliamente desarrollada y usada para combustibles fósiles, sobre todo en zonas rurales sin acceso al gas natural, que utilizan como combustible el gasóleo, lo que permite poder utilizar directamente los equipos de generación sin ninguna transformación dando a las instalaciones una flexibilidad de uso en función de las condiciones sociales, económicas y políticas.

Al poderse usar los biolíquidos sin ninguna transformación, salvo el filtrado y el precalentamiento, con poca incidencia del transporte, se genera una mejora importante en los índices de sostenibilidad obtenidos a partir de la reducción de los GEI.

Las menores exigencias en cuanto a las especificaciones de los combustibles para uso térmico frente a las de uso mecánico, la posibilidad de valoración de residuos como aceites usados, grasas animales y subproductos de difícil reciclaje como biodiesel, abren una puerta a su uso y justifican el estudio de la combustión directa de dichos productos como combustibles líquidos. Es frecuente el uso en centrales térmicas de carbón y de fuel, así como en los hornos de plantas cementeras el uso de co-combustión con combustibles procedentes de

⁴⁸ N. Vanlaningham, h. Gibson, B. Kaufman, Evaluation of soybean heating oil blens for use in residential applications, no. 0460082, ASAE Paper, annual Meeting held on August 23-24, 2004.

⁴⁹Bemtgen, J.M.; Hein, K.R.G., Minchener, A.J. "Combined combustion of Biomass/Sewage Sludge and Coal. Volume II: Final Reports" IVD, University of Stuttgart, 1995. ISBN 3-928123-16-5.

residuos de distintos orígenes, más que para valorizar dichos residuos para deshacerse de ellos.

Frente a los biolíquidos, la técnica de **obtención** de biodiesel partiendo de aceites vegetales como colza, soja o girasol es la reacción de transesterificación que es la obtención de metilésteres o ésteres ligeros de los ácidos grasos, obtenidos por reacción de los aceites con metanol, produciéndose glicerina como subproducto, están ampliamente desarrolladas a nivel industrial, en la actualidad en España la capacidad de producción de biodiesel supera tanto la demanda como la producción de materia prima, lo que implica necesidad de importar aceite y exportar biodiesel. Los rechazos procedentes de dicha transformación industrial son fácilmente reconducibles a su uso como biolíquido para la obtención de energía térmica.

La combustión de mezclas de gasóleo y aceites vegetales se inscribe dentro de la nuevo escenario energético al utilizar energía renovable lo que logra una reducción de la dependencia energética, una reducción de emisiones y asegura el uso de los excedentes agrícolas, sin exigir inversión alguna, al no tener que transformar el aceite en biocombustible y no requerir instalaciones específicas para su utilización.

El objetivo general de la tesis es el estudio de la combustión de mezclas de aceites vegetales con gasóleo en un generador con una cámara de combustión a presión constante, con un quemador de pulverización mecánica por presión. Se buscará los parámetros que permitan obtener una combustión estable y eficiente y que reduzca las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Para la consecución del objetivo general la tesis desarrolla los siguientes apartados:

1º) Realización de un estudio, desarrollado en el Capítulo 2, de los recursos disponibles en Castilla y León, con el fin de establecer el alcance que podría llegar a tener la combustión con fines térmicos de los aceites vegetales.

2º) Estudio de los combustibles en el Capítulo 3, comenzando con el acopio de muestras, el aceite vegetal usado se ha solicitado a una empresa de transformación de aceites vegetal usado en biodiesel, que tiene como materia prima el aceite vegetal usado, que les suministran los

gestores de aceites usados y como subproducto del proceso de la planta se obtiene glicerina. Las muestras llegaron al laboratorio el día 18 de noviembre de 2009, en garrafas de 5 litros de capacidad y suministraron glicerina y aceite vegetal usado, se nos facilita algunos datos de las muestras.

Los aceites vegetales de soja, girasol y colza se han solicitado al Grupo SOS Aceites IbéricosAcisa a la factoría de Andújar (Jaén), la cual nos suministra el producto elaborado.

Las muestras llegaron al laboratorio el día 20 de noviembre de 2009 en garrafas de 5 litros de capacidad y suministraron Aceite de soja crudo y refinado, aceite de girasol crudo y refinado y aceite de colza crudo.

Se determinan de las propiedades físico-químicas de las muestras, especialmente en lo referente a su utilización como combustible, puesto que lo que se pretende es hacer una sustitución de un combustible fósil por biocombustibles. Las principales características físico-químicas que se deben tener en cuenta en las muestras son: composición elemental, densidad, viscosidad, y poder calorífico inferior. Así se calcularán las propiedades físicas y químicas de mayor importancia en su aplicación como combustibles en calderas.

3º) Realización de un estudio de la combustión en el Capítulo 4 de las mezclas de los aceites con gasóleo, este estudio permite determinar los límites de miscibilidad y las condiciones en que se debe mantener la mezcla para que la misma sea homogénea, buscar las propiedades termoquímicas de dichas mezclas, la estequiometría de la combustión así como las emisiones de los gases de combustión

4º) En el Capítulo 5 se describe el diseño y montaje de una instalación que permita: la alimentación de las diferentes mezclas en las condiciones fijadas en el estudio de miscibilidad, regular los parámetros de combustión y realizar el análisis de los productos de la combustión para lo que se requiere:

- a) Diseño y montaje de un sistema de mezclado y mantenimiento de la homogeneidad de la mezcla de aceite con gasóleo, para ello se requiere disponer de un sistema de alimentación que permita cambiar de combustible sin tener que detener el quemador, para conseguir un régimen estacionario sea logrado sin necesidad de utilizar grandes cantidades de mezclas.
- b) Introducción de sensores de medida en el quemador de pulverización mecánica por presión, que permitan conocer las condiciones de funcionamiento del equipo y poder

- modificar las, estas variables sirven para poder realizar un plan de ensayos
- c) Establecer los parámetros necesarios para caracterizar los productos de la combustión de las muestras y el proceso de medida que se realizará en cada ensayo.

5°) Elaborar el plan de ensayos a realizar, recogido en el Capítulo 6, que permita analizar los resultados de la combustión de las diferentes muestras y comparar los resultados obtenidos, lo que se conseguirá mediante:

- a) Análisis de las principales variables a considerar en la combustión de cada muestra y se fijan el número de mezclas a ensayar, los parámetros a controlar durante los ensayos y los datos a medir en cada ensayo.
- b) Determinación del número de ensayos a realizar: definidos el número de mezclas a ensayar, los parámetros a variar en cada experimento se fija el número total de ensayos, que permitirían caracterizar la combustión de estas mezclas.
- c) Realización de un análisis estadístico sobre el número de ensayos, que incluye el diseño de parámetros, los factores y niveles, para determinar si el número obtenido anteriormente es necesario para caracterizar los ensayos.

6°) En el Capítulo 7 se recogen los datos experimentales, siguiendo un protocolo para la preparación de la instalación, la preparación de las mezclas, la realización de la combustión de las diferentes mezclas, el control de variables de la instalación y la adquisición de datos.

- a) Se determinan las condiciones que debe tener la instalación en los ensayos, por lo que requerirá de un ajuste previo, una puesta en funcionamiento y estabilización y finalmente un ajuste de parámetros.
- b) Las mezclas deben ser preparadas conforme a unos porcentajes previamente definidos y homogenizadas antes de ser introducidas en el quemador.
- c) Realización de la combustión de las muestras conforme a las especificaciones del ensayo, controlando la estabilidad del proceso.
- d) Se realiza el análisis de los productos de la combustión, la toma de datos y su almacenamiento..

7°) En el Capítulo 8 se procede al análisis de los resultados obtenidos, se pretende realizar una caracterización energética del proceso de combustión de las muestras y evaluar las emisiones de gases de efecto

invernadero y por último analizar las emisiones contaminantes del proceso.

- a) La caracterización energética de la combustión se realiza mediante la determinación de la eficiencia de combustión, evaluando las pérdidas por calor sensible en humos y los inquemados del proceso.
- b) La medición de las emisiones de gases de efecto invernadero se realizará mediante el porcentaje de CO₂ en humos, que se verá influenciado por el tipo de grasa y el porcentaje de mezcla.
- c) Las emisiones serán evaluadas para cada grasa y porcentaje.
- d) Se realizará un estudio estadístico de los resultados medidos en función de las variables de control y un estudio multivariable, este estudio permite obtener la tendencia en los procesos de combustión.

8°) Finalmente en el Capítulo 9 se presentan las conclusiones y los desarrollos futuros, con toda la experiencia adquirida se está en condiciones de extraer y elaborar un resumen donde se pongan de manifiesto los conocimientos adquiridos en el desarrollo de los trabajos realizados y proponer líneas que sería interesante estudiar y ampliar en posibles trabajos futuros.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 1

- 1) Price, David, Energy and human evolution. Population and environment: a journal of interdisciplinary studies, vol. 16, Num. 4 (1995).
- 2) Robert A. Hefner, the grand energy transition: the rise of energy gases, sustainable life and growth, and the next great economic expansion, John Wiley & Sons. (2009).
- 3) Dopazo, Cesar, Tendencias en el Sector Energético, Congreso la Energía, un Sector en transformación: Retos y Oportunidades, Valladolid (2010)
- 4) Eurostat, Sustainable development indicators, Web Eurostat (2005).
- 5) H. Brundtland, Informe "Our Common Future", ONU (1987).
- 6) Becerril, Carmen, Opciones energéticas para la década 2010-2020: el lugar de las energías renovables, Congreso la Energía, un Sector en transformación: Retos y Oportunidades, Valladolid (2010)
- 7) Club español de la energía, Conceptos de ahorro y eficiencia energética: Evolución y oportunidades, (2010).
- 8) Secretaría de Estado de energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Informe de Sostenibilidad Ambiental del Plan de Energías Renovables 2011-2020 Gobierno de España 2011.
- 9) Secretaría de Estado de Energía Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Energía en España 2010, Gobierno de España (2011).
- 10) APPA Estudio del impacto Macroeconómico de las energías renovables en España, año 2010, Madrid, 2010
- 11) Diario Oficial de la Unión Europea C 306, de 17/12/2007 "Tratado de Lisboa" 2007.
- 12) Club español de la energía, Política energético y medioambiental en la Unión Europea. Situación y perspectivas, 2009.
- 13) <http://www.platts.com>
- 14) BP Statistical Review of World Energy 2006.
- 15) IDAE, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Observatorio de energías renovables, julio 2010.
- 16) APPA, Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España, año 2010, Madrid 2010.
- 17) G. Wolff, ¿Se puede prescindir de los combustibles derivados del petróleo? Jornadas Retos y problemas de combustibles actuales, Universidad de Valladolid, noviembre 2009.
- 18) R. Sánchez Durán, Marco legal Europeo y Español, Conceptos de ahorro y eficiencia energética: Evolución y oportunidades, Club Español de la energía (2010).
- 19) Superficies y producciones de cultivos agrícolas de tipo herbáceo en Castilla y León. Instituto Tecnológico Agrícola de Castilla y León (ITACYL), 2005- 2007

- 20) DIRECTIVA 2003/30/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 8 de mayo de 2003 relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte 2003
- 21) Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009.
- 22) Hacia una estrategia Europea de seguridad del abastecimiento energético. (2001).
- 23) Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, “Dos veces 20 para el 2020 El cambio climático, una oportunidad para Europa” Bruselas, 23.1.2008 COM 2008
- 24) Plan de Acción nacional de energías renovables 2011-2020 (30 de Junio 2010)
- 25) SAVE study, ACE, UK. National and local employment impacts of energy efficiency investment programmers, (2000).
- 26) EIQ. Energy International Quarterly Mayo/Junio 2010
- 27) Tinaut F., “Biomasa: la energía renovable con mayor potencial”, Jornadas sobre Energías Renovables, Cátedra de Energías Renovables de la Universidad de Valladolid, Abril de (2004).
- 28) European Norm 14214, Automotive fuels – Fatty Acid Methyl Esters (FAME) for Diesel Engines, Requirements and Test Methods, EU, 2009
- 29) Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the council of 23 April 2009.
- 30) Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, “El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2008”, Roma 2008.
- 31) D.L. Klass, Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals, ISBN 10:0-12-410950-0 Londres 1998.
- 32) M. Lauer, Current terrestrial methods and activities for biomass potential assessment in Europe, 17th European Biomass Conference & Exhibition, Hamburg 2009.
- 33) Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, “El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2008”, Roma 2008.
- 34) DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE
- 35) Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011 - 2020 , 30 de Junio de 2010
- 36) European Biodiesel Board General Assembly, Annual Report 2006-07, p. 73, Nov. 2007.
- 37) I. Obernberger, Reached developments of biomass combustion technologies and future outlook, 17th European Biomass Conference and Exhibition, Hamburgo 2009.
- 38) J. Royo, D. García, F. Sebastián y P. Canalís, La co-combustión: una alternativa para incrementar la contribución de la biomasa en el mercado

eléctrico español. Centro de Investigación de Recursos y consumo Energéticos (CIRCE) (Universidad de Zaragoza), 2004.

39) Spliethoff, H.; Hein, K.R.G. "Co-combustión of coal and Biomass. Suitability of Combustion Systems and State of the Art". IVD, University of Stuttgart. Symposium Co-combustion and Gbiofuels, Nijmegen/NL, 8-9 November 1995.

40) Batey J., Combustión testing of a bio-diesel fuel oil blend in residential oil burning equipment, Tech. rep., Energy Research Center, prepared for: Massachusetts Oil Heat Council & National Oil Heat Research Alliance, 2003.

41) Vanlaningham N., Gibson H., Kaufman B., "Evaluation of soybean heating oil blends for use in residential applications", no. 046082, ASAE Paper, annual meeting held on August 23-24, 2004.

42) San José Alonso J.F, LópezSastre J.A., Romero-Avila C., "A note on the combustion of blends of diesel and soya, sunflower and rapeseed vegetable oils in a light boiler", Biomass & Bioenergy 32880-886, 2008.

43) San José J., Awf Al-Kassir, LópezSastre J.A., Gañán J. "Analysis of biodiesel combustion in a boiler with a pressure operated mechanical pulverization burner", Fuel Processing Technology 92 271-277, 2011.

44) Lezsovits F., Könczöl S., Sagát L. "Animal-fat firing investigation and realization in industrial steam generators". 16th European Biomass Conference & Exhibition. Valencia 2008.

45) Pfab F. "Processing and combustion of animal fat from animal waste rendering plants for steam generation in a smoke tube boiler". 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Roma 2004.

46) San José J., López J.A., Romero-Ávila C. y San José L.M., "Combustion of Animal Fat and Diesel Mixtures in a Mechanical Pulverization Burner", 5th Annual Symposium on Environment Environmental Engineering and Sustainability. Atenas 2010.

47) Afshin Ghorbani, Combustion Performance and Emissions of Methyl Ester of Some Vegetable Oils in a Water-Cooled Furnace, Society of Petroleum Engineers, ISBN: 978-1-55563-260-1, 2009.

48) N. Vanlaningham, h. Gibson, B. Kaufman, Evaluation of soybean heating oil blends for use in residential applications, no. 0460082, ASAE Paper, annual Meeting held on August 23-24, 2004.

49) Bemtgen, J.M.; Hein, K.R.G., Minchener, A.J. "Combined combustion of Biomass/Sewage Sludge and Coal. Volume II: Final Reports" IVD, University of Stuttgart, 1995. ISBN 3-928123-16-5.

CAPITULO 2 POTENCIAL DE BIOMASA EN CASTILLA Y LEÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

La Agencia Internacional de la Energía AIE⁵⁰ ha valorado las previsiones de potencial de biomasa a largo plazo en seis tipos de recursos: restos forestales, cultivos energéticos biomasa en terrenos marginales, restos agrícolas, residuos ganaderos y residuos urbanos orgánicos⁵¹.

Los escenarios geográficos para el análisis de los potenciales de biomasa interesan que sean localistas, los datos globales sobre generación y consumo de bioenergía a nivel mundial e incluso a nivel nacional carecen de precisión, encontrándonos valores muy distintos según las fuentes consultadas.

Usando la definición establecida por la Unified Bioenergy Terminology, UBET, la FAO y el Comité Europeo de Estandarización CEN, la **biomasa** es el material de origen biológico excluido el procedente de formaciones

⁵⁰ Agencia Internacional de la Energía, Renewable Energy: Policy Considerations for Deploying Renewables, París 2011.

⁵¹ Especificación Técnica Europea CEN/TS 14961:(Clasificación y especificaciones).

geológicas y que se ha fosilizado. El combustible elaborado directa o indirectamente a partir de biomasa es **biocombustible** y su energía la **bioenergía**⁵².

2.2 CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA

En la actualidad existe una cierta desarmonización en las definiciones, términos, unidades que usamos en la bioenergía. Los datos estadísticos facilitados por distintas agencias, instituciones o administraciones no corresponden a criterios uniformes por lo que las comparaciones no son fiables. Existe una necesidad de unificación de la terminología, recogida por la FAO en la IBEP⁵³ a través de la UBET⁵⁴ en colaboración con otras agencias (AIE, UNSO, EUROSTAT, CEPE, etc.).

2.2.1. Clasificación de la biomasa por su origen

Según el Plan de la Bioenergía en Castilla y León (**PBCyL**) la clasificación de biomasa por su origen es como sigue:

Tabla 2.1: Biomasa forestal

Fracción leñosa	Restos de tratamientos silvícolas
	Restos de aprovechamiento por el sistema tradicional
	Copas aprovechadas de forma integrada
Fracción maderable	Coníferas
	Frondosas

Tabla 2.2: Biomasa agrícola

Cultivo energético	Herbáceo de regadío
	Herbáceo de secano
	Leñoso
Resto agrícola	Resto agrícola herbáceo de regadío
	Resto herbáceo de secano
	Resto agrícola leñoso

⁵² Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588(Definición de los biocombustibles).

⁵³ Departamento Forestal de la FAO, Terminología unificada sobre la bioenergía, TUB, Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación Diciembre 2004.

⁵⁴ Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Presentación de la Plataforma Internacional de Bioenergía, ROMA, 2006

Tabla 2.3: Biomasa ganadera

Estiércol vacuno
Purín
Gallinaza

Tabla 2.4: Biomasa industrial

Industria de la madera	Subproducto de la madera
	Corteza
	Legía negra
Industria agroalimentaria	Residuo y subproducto de origen vegetal
	Subproducto animal
	Lodo de EDAR industrial

Tabla 2.5: Biomasa urbana

Fracción orgánica de residuos urbanos	
Aceite vegetal usado	
Lodo de EDAR urbanas	
Madera recuperada	Residuos de envases de madera
	Residuo de construcción y demolición
	Madera de podas en calles, parques y jardines
	Residuo voluminoso de madera

Tabla 2.6: Biomasa acuática

Alga
Fitoplancton

Con los criterios de la **UBET** se establece una clasificación de la biomasa atendiendo a la naturaleza básica de cada material:

- **WOODY BM** Biomasa leñosa
- **HERBACEOUS BM** Biomasa herbácea.
- **BM FROM FRUITS AND SEED** Biomasa de frutos y semillas.
- **OTHERS/MIXTURES** Otras y Mezclas

2.2.2. Clasificación de los biocombustibles según su estado

En el documento, Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León⁵⁵ se encuentra una comparación entre ambas clasificaciones.

Tabla 2.7: Biocombustible sólido

Grado de transformación bajo	Leña
	Paja
	Fruto o similar
	Cáscara o similar
Grado de transformación medio	Astilla
	Hebra
	Paca
	Harina
Grado de transformación alto	Pélet
	Briqueta
	Carbón vegetal
Otros	

Tabla 2.8: Biocombustible líquido

Sin transformación industrial bioenergética per se	Aceite vegetal puro
	Legía negra
Producto principal de una transformación industrial bioenergética	Biodiesel
	Bioetanol
	Biometanol
Subproducto de una transformación industrial bioenergética	Bio-EFBE
	Bio-DME
	Otros carburantes sintéticos
	Líquido piroleñoso
Otros	

⁵⁵ Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León (Decreto 2/2011, de 20 de enero, BOCyL nº 17 de 26 de enero de 2011).

Tabla 2.9: Biocombustible gaseoso

Digestión anaerobia	Gas de vertedero
	Gas de tratamiento biológico
Otros procesos	Gas de tratamiento termoquímico
	Biohidrógeno
	Otros gases sintéticos
Otros	

Con los criterios de la **UBET** se establece una clasificación de los biocombustibles

- **WOODFUELS** Biocombustibles leñosos
- **AGROFUELS** Agrocombustibles.
- **MUNICIPAL BY-PRODUCTS** Subproductos municipales
- **OTHERS/MIXTURES** Otras y Mezclas

2.3 VALORACIÓN DE LOS POTENCIALES DE BIOMASA.

La valoración de los potenciales de biomasa presenta una gran complejidad en cualquier escenario y para cualquiera de los tipos de recursos considerados.

Desde el año 2007 para los recursos de biomasa forestal en Castilla y León se está procediendo a la aplicación de la metodología WISDOM⁵⁶ que es una herramienta espacial creada por la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Fue desarrollada por la FAO junto con el Instituto de Ecología de las Universidad Nacional de México (UNAM) y hasta la fecha se ha aplicado a nivel **Supranacional** en la Costa Oriental de los países de África Central, Sudeste Asiático, a nivel **Nacional** en Eslovenia (2006), Italia, México, Mozambique y Senegal y a nivel **sub-nacional** en la **Comunidad Autónoma de Castilla y León** y Emilia Romagna de Italia.

⁵⁶ Food and Agriculture Organization of the United Nations, Methodology WISDOM: Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview mapping.

Esta metodología permite la integración de información estadística y espacial de la producción y del consumo de dendrocombustibles, permitiendo la modelización con lo que podemos generar distintos escenarios de decisión.

Es por lo tanto una herramienta de planificación energética que facilita el análisis espacial de la oferta y demanda de combustibles leñosos con la resolución deseada, local, regional o nacional.

Estos modelos son especialmente útiles en la valoración de la biomasa forestal, para la que fueron creados, trabajando con datos reales de inventario, zonas de abastecimiento, competencia con otras industrias y los costes de aprovechamiento específicos de una zona permite, aplicando los modelos correspondientes, calcular los resultados para cada parcela y al mismo tiempo permite la inclusión en los análisis espaciales de variables como carreteras, ferrocarriles, espacios protegidos, etc. que pudieran tener significación en el aprovechamiento o los costes de explotación.

La metodología WISDOM, creada específicamente para la programación y desarrollo de la dendroenergía, está siendo aplicada a otras fuentes de bioenergía, por ejemplo en el INTA⁵⁷ en proyectos sobre biocombustibles PNEG1411⁵⁸, se valora la eficiencia energética de los distintos combustibles, la idoneidad de los cultivos para su producción, sistema agrícola más eficiente, implicaciones socio-ambientales, valoración de residuos, etc.

Para el cálculo de la oferta forestal se han desarrollado aplicaciones específicas para la evaluación de recursos biomásicos que partiendo de datos de inventario permiten conocer las existencias de biomasa y sus aprovechamiento sostenible, zonas de abastecimiento, competencia con otras industrias y los costes de aprovechamiento específicos de una zona.

Este tipo de herramientas está permitiendo generar modelos de gestión integrados tanto para el sector energético como para el sector agrícola.

⁵⁷ INTA: Instituto Nacional de Ingeniería Agropecuaria (Argentina), Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina - WISDOM Argentina - Buenos aire 2009.

⁵⁸ INTA: Instituto Nacional de Ingeniería Agropecuaria (Argentina), Programa Nacional de Bioenergía del INTA, PNEG1411 Residuos y cultivos agrícolas para la producción de bioenergía, Resoluciones consejo directivo 2008/09.

2.4 DISPONIBILIDAD DE BIOMASA EN CASTILLA Y LEÓN.

La metodología antes expuesta está proporcionando datos cada vez más fiables sobre los recursos existentes.

La Junta de Castilla y León a través del Plan de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León (PBCyL) proporciona los valores estimados en biomasa del aprovechamiento actual y las previsiones para los próximos años.

Se incluye para cada sector los costes de obtención y los mercados competidores para cada una de las distintas formas de biomasa: forestal, cultivos energéticos, restos agrícolas, biomasa ganadera, biomasa de la industria agroalimentaria, restos de la industria de la madera y biomasa de origen urbano y de otras industrias.

2.4.1. Biomasa forestal

Se entiende por biomasa forestal cualquier vegetal procedente de terrenos forestales que sea apto para generar energía, quedan incluidos árboles completos, parte de ellos, tocones y matas.

Atendiendo a la forma de extracción el PBCyL clasifica la biomasa forestal en producto forestal o en subproducto. En Castilla y León el 52% del territorio es forestal y el 32% corresponde a superficie arbolada⁵⁹. Se entiende por **biomasa forestal potencial** el crecimiento anual total de los montes de Castilla y León, en la tabla 2.10 se recogen los recursos forestales de Castilla y León.

⁵⁹ Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León (Decreto 2/2011, de 20 de enero, BOCyL nº 17 de 26 de enero de 2011).

Tabla 2.10: Previsiones de biomasa forestal potencial en Castilla y León

			2009	2011	2013	2015	2020	2025	2030	
Existencias	Volumen maderable (10 ³ x m ³ /año cc)		167.551	175.286	180.556	186.556	199.790	211.103	222.202	
	Biomasa Total	Material anhidra (10 ³ x t/año)	219.563	229.699	237.083	244.809	261.809	276.634	291.179	
		Material Verde (10 ³ x t/año)	439.125	459.397	474.165	488.934	523.618	553.267	582.357	
Potencial existencias	Crecimiento medio de volumen maderable (10 ³ x m ³ /año cc)		7.850	8.212	8.476	8.740	9.360	9.890	10.410	
	Biomasa potencial Total	Material anhidra	10 ³ x t/año	10.287	10.762	11.108	11.454	12.266	12.961	13.642
			ktep/año	4.700	4.900	5.000	5.200	5.600	5.900	6.200
		Material Verde	10 ³ x t/año	20.573	21.523	22.215	22.907	24.532	25.921	27.284
			ktep/año	4.200	4.400	4.500	4.600	5.000	5.200	5.500

La cantidad de biomasa fácilmente valorizable, estimando un escenario realista se muestra en la tabla 2.11:

Tabla 2.11: Previsiones de biomasa forestal fácilmente valorizable en Castilla y León

			2009	2011	2013	2015	2020	2025	2030
Biomasa forestal fácilmente valorizable (10³ x t/año en verde)	Fracción leñosa	Restos de tratamientos selvícolas	12	29	39	48	60	60	60
		Restos de aprovechamiento por el sistema tradicional	57	72	84	95	124	123	133
		Copas aprovechables de forma integrada	225	288	336	380	494	490	529
		total	291	389	459	523	678	673	722
		Coníferas	0	73	206	306	474	632	829
		Fronosas	439	652	706	837	1.025	1.135	1.223
		Total	439	725	912	1.143	1.499	1.767	2.052
TOTAL			733	1.114	1.371	1.666	2.177	2.440	2.774
Energía Primaria anhidra de la biomasa forestal fácilmente valorizable (ktep/año)	Fracción leñosa	Restos de tratamientos selvícolas	3	6	9	11	14	14	14
		Restos de aprovechamiento por el sistema tradicional	13	16	19	21	28	28	30
		Copas aprovechables de forma integrada	53	55	75	85	111	110	119
		Total	70	77	103	117	153	152	163
	Fracción maderable	Coníferas	59	69	98	121	159	194	230
		Fronosas	44	94	107	117	178	203	223
		Total	102	163	205	257	337	397	452
TOTAL			172	250	308	374	490	549	625

Los costes son difíciles de conocer, la extracción y el transporte tienen una influencia importante en la valoración final del producto, la viabilidad varía en función del uso final, es decir, de la oferta del demandante y de las posibles bonificaciones existentes. Como valor de referencia en euros

por tonelada seca puesta en fábrica se estima entre 30 y 60 €/t con radios de transporte a planta de menos de 30Km.

En cuanto a los mercados competidores están constituidos por los aserraderos, fábrica de tableros, y fábricas de pasta de papel.

Las características de los recursos de los distintos sectores son variados desde la industria el desenrollo con diámetros mayores de 35 cm a la industria de desintegración con diámetros de hasta 5cm.

La incorporación del sector bioenergético en el mercado puede producir un aumento de precios de la materia prima y como consecuencia un desabastecimiento para la industria de la madera, industria muy consolidada en la región con importante transcendencia económica y de puestos de trabajo.

Es necesario que el desarrollo de la biomasa forestal se haga de forma progresiva, cuidando que la política de ayudas no cause efectos desfavorables en el resto de la industria.

2.4.2. Cultivos energéticos

Utilizando la definición que se establece en la Directiva 2003/30 CE⁶⁰ entendemos por cultivos energéticos aquellos cultivos no alimentarios destinados a la producción de energía que se utilizan fundamentalmente en la producción de biocarburantes o energía térmica y eléctrica producida a partir de la biomasa. Se pueden clasificar los cultivos energéticos con diferentes criterios, siguiendo el criterio del aprovechamiento final del cultivo distinguimos entre:

Cultivos herbáceos. Se trata de cultivos de especies herbáceas de ciclo anual. Se pueden dividir en:

Oleaginosos: obtención de biodiesel a partir de semillas de plantas oleaginosas como son el girasol y la colza.

Amiláceos: obtención de bioetanol a partir de semillas con grandes concentraciones de almidón, como son las de los cereales, trigo y cebada.

Oligosacáridos: Obtención de bioetanol a partir de materia rica en inulina y azúcares simples como la remolacha o la patata.

⁶⁰ Directiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte, de 8 de mayo de 2003.

Lignocelulósicos: Obtención de bioetanol o directamente producción de calor y electricidad a partir de cultivos con alta concentración de celulosa, como el sorgo papelero.

Cultivos leñosos de corta rotación. Se trata de cultivos de especies leñosas de crecimiento rápido capaces de rebrotar de cepa en turnos cortos (normalmente de 3 a 5 años). Son cultivos de especies forestales gestionados bajo un sistema agrícola, como el chopo, sauce, paulonia y eucalipto.

Los cultivos energéticos en Castilla y León son principalmente las oleaginosas (colza y girasol) o cereales (cebada y trigo) orientados a la producción de grano para la elaboración de biocarburantes sustitutivos del gasóleo.

Cultivos como la remolacha, patata, etc. tradicionales en Castilla y León, y que podrían dedicarse a la producción de bioetanol y etiliterbutileter por fermentación de azúcares no se producen en la comunidad más que para fines alimentarios.

Los cultivos energéticos leñosos de corta duración son, salvo alguna excepción de carácter experimental, inexistentes en Castilla y León. También existen a nivel experimental otros cultivos herbáceos, como cardo, pataca, etc.

La evolución de los cultivos energéticos desde el año 2005 en el que el FEGA⁶¹ distribuye en España las ayudas del PAC⁶² viene reflejada en la tabla 2.12 relativa a las superficies en ha que han recibido las ayudas, estas superficies se refieren a terrenos de retirada.

⁶¹ FEGA: Fondo Español de Garantía Agraria, CAMPAÑA 2005/2006 (Cosecha 2005) Ayuda a los cultivos energéticos Capítulo 5 del TÍTULO IV del R(CE) 1782/2003 Art. 44 del R(CE) 1973/2004: superficies definitivas de la campaña

⁶² PAC Política Agraria Común, ayudas concedidas, desde 1997, http://www.fega.es/PwfGcp/es/financiacion_de_la_pac

Tabla 2.12: Ayudas del PAC a los cultivos energéticos en Castilla y León de 2005 a 2009(Fuente FEGA).

		2005	2006	2007	2008	2009
Oleaginosas (ha)	Colza		570,83	3.607,00	2.996,76	5.319,51
	Girasol	1.605,18	26.717,69	31.957,09	2.613,23	14.985,46
	Cárcamo					816,76
Cereales (ha)	Trigo	788,29	22.661,41	717,93	14,74	
	Cebada	1.911,14	35.929,78	2.206,33	17,46	
	Avena				7,75	15,68
	Centeno				102,53	37,72
	Triticale				7,82	13,00
	Sorgo					
	Maíz					
Otras				36,77	138,50	
Total		4.304,61	85.879,71	38.488,35	5.797,06	21.026,63
Total España		26.510,24	216.269,47	108.079,12	9.782,23	35.591,32

La ayuda a los cultivos energéticos se estableció en el Capítulo 5 del Título IV del Reglamento (CE) 1782/2003, del Consejo. Este reglamento ha sido derogado por el Reglamento (CE) 73/2009. Aunque en este último se establece que en el año 2009 seguiría siendo de aplicación, por lo que la campaña 2009/2010 sería la última en estar en vigor dicha ayuda.

El aumento de los precios de los cereales en el mercado internacional ha hecho que los agricultores dediquen la superficie de cultivo a la producción para consumo humano en detrimento de los cultivos energéticos.

Las continuas modificaciones en las normativas agrícolas comunitarias, reforma del PAC, modificación de los mecanismos de pago, la poca adaptación de algunos de los cultivos a las condiciones edafoclimáticas de la región, la falta de tradición y el desconocimiento de los nuevos cultivos por parte de los agricultores, la competencia del mercado alimentario y sobre todo la baja rentabilidad de los cultivos hacen que estos no tenga el desarrollo previsto.

Para la determinación de la producción potencial energética de los cultivos es necesaria la estimación del rendimiento del cultivo (t/ha) en cada zona, y la valoración del rendimiento del proceso de transformación para su conversión en biocombustible.

Han sido tan variables las superficies de cultivo en los últimos años que las estimaciones basadas en tendencias no puedan aplicarse de una forma fiable.

Desde el lado de la demanda, con la capacidad de generación de biodiesel de las plantas instaladas en la actualidad y las que pronto estarán en funcionamiento, las necesidades de superficie de cultivo para suministro de materia prima de dichas plantas se aproxima a 0,9 millones de ha en la Comunidad de los 2,3 millones de ha de la superficie total dedicada a tales cultivos⁶³.

Considerando la **producción potencial** como la que podría aportar la superficie agrícola de Castilla y León, de secano y regadío, que actualmente se usa para cultivos cuya semilla o biomasa podría usarse para fines energéticos, más el barbecho cuyas características edáficas son adecuadas y la **producción fácilmente valorizable** como la producción obtenida con este tipo de cultivos a partir de una superficie agrícola realista y bastante conservadora.

La estimación de la producción potencial unitaria para cada tipo de cultivo en secano y regadío es recogida en la tabla 2.13 para el año 2.008

Tabla 2.13: Producción potencial de cultivos energéticos herbáceos en Castilla y León de 2008 (Fuente: PBCyL)

	Superficie (ha)	Producción semilla en verde(t/año)	Producción potencial en verde(t/año)	Humedad en origen(%)	Producción potencial restos anhidro(t/año)	Energía primaria (ktep/año)	
HERBÁCEOS	Cereal	1.684.834	2	3.369.668	13	2.931.611	1.173
	Girasol	243.614	1	243.614	9	221.689	89
	Leguminosas	134.583	0,7	94.208	10	84.787	34
	Colza	6.852	3,2	14.720	9	13.395	5
	TOTAL SECANO	2.069.883	-	3.722.210	-	3.251.482	1.301
	Maiz	103.299	10	1.008.903	14	867.657	347
	Remolacha	34.262	90,5	3.100.711	25	2.325.533	930
	Cereal	179.180	4	716.720	13	623.546	249
	Patata	23.237	44,6	1.035.758	30	725.031	290
	TOTAL REGADÍO	339.978	-	5.862.092	-	5.541.767	1.816
	TOTAL BARBECHO	745.934	1,5	1.118.901	13	973.444	389
	TOTAL SEMILLA	3.155.795	-	10.703.203	-	8.766.693	3.506

Sirve de base para la estimación de las superficies y producción de energía hasta el año 2.030 que se recoge en la tabla 2.14.

⁶³ Los cultivos energéticos en Castilla y León Fdo. Rodríguez López y J. Ignacio Sánchez Macías. Universidad de Salamanca

Tabla 2.14: Previsiones de cultivos energéticos herbáceos fácilmente valorizables en Castilla y León (Fuente: PBCyL)

Origen de la producción		2009	2011	2013	2015	2020	2025	2030
SECANO	Superficie secano potencial (barbecho incluido)	2.897.347						
	% fácilmente valorizable	0,5%	5%	8%	11%	15%	16%	17%
	Superficie de secano(ha)	14.487	144.867	231.788	318.708	434.802	483.576	492.549
	Producción en verde (t/año)	34.044	340.438	544.701	748.964	1.021.315	1.089.402	1.157.490
	Producción anhidra (t/año)	29.818	295.181	473.890	851.599	888.544	947.780	1.007.016
	E. primaria anhidra (ktep/año)	12	118	190	261	356	379	403
REGADÍO	Superficie regadío potencial (ha)	476.823	480.000	510.000				
	% fácilmente valorizable	0%	2%	4%	4,5%	8%	9%	11%
	Superficie de regadío(ha)	0	10.200	20.400	22.950	40.800	45.900	56.100
	Producción en verde(t/año)	0	51.100	102.000	114.750	204.000	229.500	280.500
	Producción anhidra (t/año)	0	44.370	88.740	99.833	177.480	199.665	244.035
	E. primaria anhidra (ktep/año)	0	18	35	40	71	80	98
TOTAL	Superficie (ha)	14.487	155.067	252.188	341.658	475.402	509.476	548.649
	Producción (t/año)	29.618	340.551	562.630	751.431	1.066.024	1.147.445	1.251.051
	E. primaria anhidra (ktep/año)	12	136	225	301	426	459	501

El mercado agrícola y el cerealista en particular es un mercado muy sensible y con un desequilibrio creciente entre oferta y demanda creado fundamentalmente por cosechas más bajas, consecuencia de sequías y otros fenómenos climáticos, junto con la creciente demanda de las economías emergentes como China e India.

El incremento de los precios agrícolas favorece un aumento de rentas en el sector agrícola y una pérdida de competitividad del sector de los biocarburantes.

El importante consumo de cereal, cerca del 90%, para alimentación animal en Castilla y León, hace que difícilmente se dedique esta producción a otros usos como los biocombustibles, esta dificultad se agrava al haber aumentado el precio del cereal para alimentación en los últimos años.

El agricultor dispone de un mercado adicional, el energético, para colocar sus productos al mismo tiempo al aumentar la demanda aumentará el

precio lo que permitirá en ambos casos un mayor desarrollo agrario en la región.

La competencia del resto de los mercados agrícolas hace que las ayudas por superficie cultivada, con independencia de la producción, sea una ventaja competitiva en Castilla y León con unos rendimientos productivos por debajo de la media de la UE.

Estas ayudas de 45€/ha para los cultivos energéticos han desaparecido para la campaña 2010/2011, lo que crea una gran incertidumbre, se espera en breve una nueva modificación del PAC con nuevas ayudas específicas para cultivos energéticos.

En el momento que redacto estas líneas los borradores de la reforma de la PAC prevén ayudas de hasta 400€/ha, lo que puede modificar sustancialmente el panorama sobre determinados cultivos de tipo leñoso

2.4.3. Restos agrícolas

Se incluyen en esta categoría de biomasa los residuos agrícolas procedentes de cultivos herbáceos como la paja del cereal, los cañotes de maíz, etc., como los precedentes de cultivos leñosos como la vid, los frutales, el olivo.

La cuantificación de los potenciales energéticos viene definida por la de los cultivos de los que proceden. La estimación potencial viene reflejada en la tabla 2.15:

Tabla 2.15:Previsiones de restos agrícolas en Castilla y León (Fuente: PBCyL)

		2011	2015	2020	2025	2030	
HERBÁCEOS SECAÑO	Potencial potencial	Superficie (ha)	2.069.883				
		t/ha y año, en verde	2				
		t/año, en verde	4.139.766				
		t/año, anhidras	3.642.994				
		E. primaria anhidra (ktep/año)	1.455				
	Producción fácilmente valorizable	Restos fácilmente valorizables (%)	4	9	12	13	13
		t/año, en verde	165.591	372.579	496.772	538.170	538.170
		t/año, anhidra	145.720	327.869	437.159	473.589	473.589
		E. primaria anhidra (ktep/año)	58.3	131.1	174.9	189.4	189.4
		Barbecho (producción potencial cereales-ha/año)	300.000				
Producción potencial en verde (t/año)		600.000					
Energía primaria anhidra (ktep/año)		240					
HERBÁCEOS REGADÍO	Potencial potencial	Superficie (ha)	400.000	510.000			
		t/ha y año, en verde	6.75				
		t/año, en verde	2.700.000	3.442.500			
		t/año, anhidras	2.241.000	2.857.275			
		E. primaria anhidra (ktep/año)	955	1.058			
	Producción fácilmente valorizable	Restos fácilmente valorizables (%)	4	9	12	13	
		t/año, en verde	108.000	309.825	413.100	447.525	447.525
		t/año, anhidra	89.640	257.155	342.873	371.446	171.437
		E. primaria anhidra (ktep/año)	36	103	137	149	69
		Superficie (ha)		85.943			
LEÑOSOS	Potencial potencial	t/ha y año, en verde	2.8				
		t/año, en verde	240.640				
		t/año, anhidras	214.856				
		E. primaria anhidra (ktep/año)	86				
		Producción fácilmente valorizable	Restos fácilmente valorizables (%)	3	6	8	10
	t/año, en verde		7.219	14.438	19.251	24.064	26.470
	t/año, anhidra		6.446	12.891	17.188	21.486	23.634
	E. primaria anhidra (ktep/año)		2.6	5.2	6.9	8.6	9.5
	t/año, en verde		880.810	1.296.842	1.529.123	1.609.759	1.612.165
	E. primaria anhidra (ktep/año)		352	519	612	644	645
TOTAL FÁCILMENTE VALORIZABLE (incluido barbecho)							
t/año, en verde		280.810	696.842	929.123	1.009.759	1.021.155	
E. primaria anhidra (ktep/año)		112	279	372	404	405	

Los mercados competidores para estos restos agrícolas son en el caso de la paja de los cereales el mercado ganadero que lo utiliza de alimento y como cama para ganado.

En cuanto a los restos leñosos su aprovechamiento es en calderas y chimeneas domésticas y en el caso de los sarmientos para elaboración de platos típicos en gastronomía.

2.4.4. Biomasa ganadera

La biomasa ganadera está constituida por todos aquellos restos orgánicos procedentes de las explotaciones ganaderas intensivas y de las industrias de transformación de alimentos de origen animal que podrían ser susceptibles de valoración energética. Son subproductos animales no destinados al consumo humano (SANDACH).

En las explotaciones ganaderas podemos diferenciar distintos subproductos:

- **Purín.** Residuo formado por las deyecciones líquidas y las aguas de limpieza de establos.
- **Gallinaza.** Residuo compuesto por deyecciones sólidas y líquidas, restos de alimentos, plumas y huevos rotos en las granjas avícolas.
- **Estiércol.** Residuo originado por las deyecciones líquidas y sólidas con material de las camas del ganado y aguas de limpieza.

Subproductos en la industria agroalimentaria clasificados por la industria que los genera:

- Residuos de la industria láctea.
- Residuos y subproductos animales de la industria cárnica.
- Residuos de la industria vitivinícola.
- Residuos de la industria de panificadora.
- Residuos de la industria molinera.
- Residuos de la industria de conservas vegetales.
- Residuos de la industria de alimentación animal.

Con el censo actual de las cabañas y los ratios medios de producción de subproductos animales se obtiene la producción total de biomasa generada en las explotaciones ganaderas intensivas que se presenta en la tabla 2.16.

Tabla 2.16: Producción actual de residuos ganaderos en explotaciones en Castilla y León (Fuente: PBCyL)

CABAÑA GANADERA	Nº DE CABEZAS DE GANADO POR TIPO DE ANIMALES		TIPO DE BIOMASA	BIOMASA PRODUCIDA (t/año. Humedad origen)
Bovino	Carne	889.761	Estiércol bovino	5.790.947
	Cebo	212.174		
	Leche	201.446		
Porcino	Reproductores	475.827	Purines	10.637.2299
	Cebo	3.546.503		
Avícola	Pollos	10.877.765	Gallinaza	604.449
	Ponedoras	13.410.328		
Ovino			Estiércol ovino	3.965.359
TOTAL				20.998.054

En cuanto a las previsiones de biomasa ganadera en explotaciones se presenta la tabla 2,17.

Tabla 2.17: Previsiones de biomasa ganadera en explotaciones en Castilla y León (Fuente: PBCyL).

			2011	2015	2020	2025	2030
ESTIÉRCOL BOVINO	Potencial	Producción total anual (t/año humedad en origen)	5.804.859	5.814.153	5.825.490	5.837.451	5.849.135
		Energía primaria anhidra (ktep/año)	488	488	489	490	491
	Fácilmente valorizable	% fácilmente valorizable	8	12	14	15	16
		Producción total anual (t/año humedad en origen)	464.389	697.698	815.611	875.618	935.862
		Energía primaria anhidra (ktep/año)	39	59	68	74	79
PURINES	Potencial	Producción total anual (t/año humedad en origen)	11.867.021	12.764.837	13.983.221	15.317.898	16.779.968
		Energía primaria anhidra (ktep/año)	184	198	217	237	260
	Fácilmente valorizable	% fácilmente valorizable	16	18	19	20	21
		Producción total anual (t/año humedad en origen)	1.898.723	2.297.671	2.656.812	3.063.580	3.523.793
		Energía primaria anhidra (ktep/año)	29	36	41	48	55
GALLINAZA	Potencial	Producción total anual (t/año humedad en origen)	680.708	736.820	813.509	898.179	991.663
		Energía primaria anhidra (ktep/año)	52	56	62	68	75
	Fácilmente valorizable	% fácilmente valorizable	13	17	19	20	21
		Producción total anual (t/año humedad en origen)	88.492	125.259	154.567	179.636	208.249
		Energía primaria anhidra (ktep/año)	7	10	12	14	16
ESTIÉRCOL OVINO	Potencial	Producción total anual (t/año humedad en origen)	4.005.013				
		Energía primaria anhidra (ktep/año)	307				
	Fácilmente valorizable	% fácilmente valorizable	0				
		Producción total anual (t/año humedad en origen)	0				
		Energía primaria anhidra (ktep/año)	0				
TOTAL FÁCILMENTE VALORIZABLE		t/año humedad en origen	2.451.604	3.120.628	3.262.990	4.118.833	4.667.904
		Energía primaria anhidra (ktep/año)	75	105	121	135	149

Para la cuantificación de la producción media de las explotaciones de la industria agroalimentaria utilizamos los valores unitarios de la tabla 2.18.

Tabla 2.18: Producción media de biomasa de industria agroalimentaria en Castilla y León (Fuente: PBCyL).

TIPO DE INDUSTRIA	TIPO DE BIOMASA	PRODUCCIÓN UNITARIA
Láctea	Sólidos no conformados, suero lácteo	20-0,15 kg/t leche recibida. Valor medio 10Kg/t
Cárnica	Sólidos cárnicos	41% de las toneladas de producto final
Vitivinícola	Vegetales	251 kg/ha de viñedo
	Residuos prensado bodega. Vegetales	2.088 kg/ha de viñedo
Pan, bollería y galletas	Sólidos	11% de las toneladas de producto final
Molinería	Sólidos	5% de las toneladas de producto final
Conservas vegetales	Sólidos orgánicos	20% de las toneladas de producto final
Alimentación animal	Sólidos	5% de la producción final

Con la producción unitaria de la tabla anterior se puede establecer la cuantificación de biomasa actual y las previsiones de biomasa de la industria agroalimentaria:

Tabla 2.19: Producción total de biomasa de industria agroalimentaria en Castilla y León (Fuente: PBCyL)

TIPO DE INDUSTRIA	TIPO DE BIOMASA	PRODUCTO PRINCIPAL (t/año)	BIOMASA FRESCA (t/año)
Láctea	Sólidos no conformados, suero lácteo	1.425.000.000*	14.687
Cárnica	Sólidos cárnicos	560.000	229.600
Vitivinícola	Vegetales	200.000.000*	17.969
	Residuos prensado bodega. Vegetales		149.482
Pan, bollería y galletas	Sólidos	205.000	20.705
Molinería	Sólidos	456.845	22.842
Conservas vegetales	Sólidos orgánicos	1.836.000	367.200
Alimentación animal	Sólidos	1.997.804	99.890
TOTAL			922.366

*Valor expresado en litros

Las previsiones para producciones de biomasa fácilmente valorizables vienen expresadas en la tabla 2:20:

Tabla 2.20: Previsiones de producción fácilmente valorizable de biomasa agroalimentaria en Castilla y León (Fuente: PBCyL)

		2011	2015	2020	2025	2030
Tipo de industria	Tipo de biomasa	t/año	t/año	t/año	t/año	t/año
Láctea	Sólidos no conformados, suero lácteo	2.231	3.450	4.217	4.436	5.061
Cárnica	Sólidos cárnicos	34.921	54.121	66.342	69.705	79.611
Vitivinícola	Vegetales	2.692	3.930	4.546	4.917	5.455
	Residuos prensado bodega. Vegetales	22.395	32.689	39.491	41.328	47.389
Pan, bollería y galletas	Sólidos	3.156	4.930	6.108	6.394	7.330
Molinería	Sólidos	0	0	0	0	0
Conservas vegetales	Sólidos orgánicos	55.982	87.573	108.756	113.726	130.507
Alimentación animal	Sólidos	0	0	0	0	0
TOTAL		121.377	186.693	229.491	240.505	275.353
Tipo de industria	Tipo de biomasa	ktep/año	ktep/año	ktep/año	ktep/año	ktep/año
Láctea	Sólidos no conformados, suero lácteo	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5
Cárnica	Sólidos cárnicos	6.4	9.9	12.1	12.7	14.5
Vitivinícola	Vegetales	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5
	Residuos prensado bodega. Vegetales	2.0	2.9	3.6	3.7	4.3
Pan, bollería y galletas	Sólidos	1.0	1.6	2.0	2.1	2.4
Molinería	Sólidos	-	-	-	-	-
Conservas vegetales	Sólidos orgánicos	4.3	6.7	8.3	8.6	9.9
Alimentación animal	Sólidos	-	-	-	-	-
TOTAL		14	22	27	28	32

2.4.5. Restos de la industria de la madera.

La biomasa procedente de la industria de la madera son los residuos y subproductos que se generan en el desarrollo de la actividad industrial y que pueden ser valorizados energéticamente. Estos restos pueden ser procedentes de la industria de primera transformación como aserraderos, industria del desarrollo y fábricas de tableros y está constituida por madera. También consideramos los residuos de la industria de segunda transformación, industria de carpintería y ebanistería.

Se incluye en la biomasa como resto los residuos procedentes de la industria de la pasta de papel como las legías negras que se generan en el proceso productivo.

Los restos procedentes de la segunda transformación no se valoran, por su menor relevancia frente a los restos de la primera y por la existencia de barnices y otras sustancias que normalmente contienen estos restos.

Partiendo de los datos de volumen de madera de las cortas realizadas en Castilla y León que se adjuntan en la tabla 2.21.

Tabla 2.21: Flujo actual de madera en Castilla y León (Fuente: PBCyL)

Destino de La madera	FLUJO DE MADERA (m ³ /año sc)							SUBP	TOTAL
	MADERA EN ROLLO			MADERA RECICLADA					
	Cortas CyL	Import	Export	Región	Import	Export			
Aserrío y traviesas	358.000	520.000	50.000	0	0	0	290.000	1.118.000	
Desenrollo (chapas)	201.000	4.000	120.000	0	0	0	24.000	109.000	
Apeas, postes y estacas	29.000	80.000	10.000	0	0	0	24.000	123.000	
Trituración (tablero o pasta)	327.000	396.000	20.000	40.000	280.000	0	244.000	1.267.000	
Otros usos industriales	25.000	0	0	0	0	0	1.000	26.000	
Bioenergía	80.000	0	0	0	0	0	131.000	191.000	
TOTAL	1.000.000	1.000.000	200.000	40.000	280.000	0	714.000	2.834.000	

Para estimar el potencial fácilmente valorizable hay que precisar que la gran mayoría del material que se genera es autoconsumido como subproductos para su incorporación al proceso productivo y para su uso energético por lo que el margen para la producción de restos es muy estrecho.

En el PBCyL se hace una estimación para los años 2010/2030 con unas hipótesis de crecimiento del sector maderero, aumento de las cortas en los montes de Castilla y León y una reducción de importaciones tanto de madera en rollo como de madera reciclada.

Estas estimaciones pueden sufrir un significativo vuelco como consecuencia de las previsiones de ayudas del PAC a los cultivos leñosos de ciclo corto lo que modificaría al alza las estimaciones residuos susceptibles de valoración energética.

2.4.5. Biomasa de origen urbano y de otras industrias.

Constituye la biomasa de origen urbano todos aquellos residuos catalogados como urbanos y que por su contenido orgánico pueden ser valorizables energéticamente. Se incluyen en este grupo residuos industriales no peligrosos, biodegradables no procedentes de la industria

de la madera ni de la agroalimentaria, como son lodos de plantas depuradoras, madera de construcción y demolición y residuos de envases de madera.

Podemos clasificar dichos restos agrupándoles en:

- **Grupo A:** Fracción orgánica de restos sólidos urbanos, FORU, residuos biodegradables generados en cocinas, restaurantes, residuos de mercados y similares.
- **Grupo B:** Aceites vegetales usados. Aceites y grasas comestibles generados en domicilios particulares o en actividades de servicios.
- **Grupo C:** Lodos de plantas de depuración de aguas residuales, EDAR urbanas o industriales.
- **Grupo D:** Residuos de envases de madera, madera procedente de construcción y demolición, restos de poda y jardinería urbanos y residuos voluminosos de madera.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 2

- 50) Agencia Internacional de la Energía, Renewable Energy: Policy Considerations for Deploying Renewables, París 2011.
- 51) Especificación Técnica Europea CEN/TS 14961:(Clasificación y especificaciones).
- 52) Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588(Definición de los biocombustibles).
- 53) Departamento Forestal de la FAO, Terminología unificada sobre la bioenergía, TUB, Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación Diciembre 2004.
- 54) Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Presentación de la Plataforma Internacional de Bioenergía, ROMA, 2006
- 55) Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León (Decreto 2/2011, de 20 de enero, BOCyL nº 17 de 26 de enero de 2011).
- 56) Food and Agriculture Organization of the United Nations, Methodology WISDOM: Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview mapping.
- 57) INTA: Instituto Nacional de Ingeniería Agropecuaria (Argentina), Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina - WISDOM Argentina - Buenos Aires 2009.
- 58) INTA: Instituto Nacional de Ingeniería Agropecuaria (Argentina), Programa Nacional de Bioenergía del INTA, PNEG1411Residuos y cultivos agrícolas para la producción de bioenergía, Resoluciones consejo directivo 2008/09.
- 59) Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León (Decreto 2/2011, de 20 de enero, BOCyL nº 17 de 26 de enero de 2011).
- 60) Directiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte, de 8 de mayo de 2003.
- 61) FEAGA: Fondo Español de Garantía Agraria, CAMPAÑA 2005/2006 (Cosecha 2005) Ayuda a los cultivos energéticos Capítulo 5 del TÍTULO IV del R(CE) 1782/2003 Art. 44 del R(CE) 1973/2004: superficies definitivas de la campaña
- 62) PAC Política Agraria Común, ayudas concedidas, desde 1997, http://www.fega.es/PwfGcp/es/financiacion_de_la_pac
- 63) Los cultivos energéticos en Castilla y León Fdo. Rodríguez López y J. Ignacio Sánchez Macías. Universidad de Salamanca.

CAPITULO 3 COMBUSTIBLES

3.1 INTRODUCCIÓN

Interesa conocer las características físicas y químicas de los combustibles que se van a utilizar, sobre todo aquellas características que intervienen en los procesos de mezcla y los de combustión.

Para las características de los combustibles de origen fósil (gasóleo) utilizaremos las especificaciones que se fijan en el RD 61/2006 de 31 de Enero donde se transponen las exigencias de calidad de la Directiva Europea 2003/17/CE relativas a la calidad de la gasolina y el gasóleo⁶⁴.

Se recogen en este capítulo también las propiedades de distintos aceites y grasas caracterizados en el Laboratorio Regional de Combustibles de Castilla y León.

Se estudia el proceso de mezcla al objeto de obtener una disolución estable y homogénea necesaria para una combustión así mismo estable.

Se estudian aquellas propiedades de las mezclas que intervienen en el proceso de combustión como la miscibilidad y la viscosidad.

⁶⁴ Council Directive no 2003/17/CE "relating to the quality of petrol and diesel fuels".

3.2 NATURALEZA DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

La composición de los combustibles líquidos de origen fósil están formados por hidrocarburos, los hidrocarburos se clasifican en⁶⁵:

- **Hidrocarburos alifáticos**
 - Hidrocarburos saturados. Posen solamente enlaces simples
 - Alcanos
 - Lineales: CH_3CH_3 etano; $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$, propano;
 - Ramificados: $\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_3)_2$, 2-metilpropano
 - Cicloalcanos:  ciclopentano  ciclohexano
 - Hidrocarburos insaturados. Posen enlaces dobles o triples.
 - Alquenos: $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ eteno; $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2\text{CH}_3$ propeno
 - Alquinos: $\text{H}-\text{C}\equiv\text{CCH}_3$ propino
- **Hidrocarburos aromáticos**
 - Benceno, tolueno y naftaleno.

Es también frecuente clasificar los hidrocarburos por la forma de su cadena en hidrocarburos de cadena abierta o cerrada.

Es interesante resaltar que en los hidrocarburos saturados la relación C/H es más pequeña que en los insaturados y menos aún que en los aromáticos.

De los combustibles líquidos el más usado tanto para transporte como para usos térmicos es el gasóleo que es un derivado del petróleo compuesto por una mezcla de hidrocarburos cuyo número de átomos de carbono está comprendido entre C14 y C20 lo que caracteriza tanto su poder calorífico como otras propiedades como su temperatura de inflamación, viscosidad, etc⁶⁶.

⁶⁵Lapueta M. y Hernández J.J., Lapuerta Amigo M. y Hernández Adrover J.J.. "Tecnologías de la combustión. Capítulo 2. Caracterización de los combustibles", Ediciones de la Universidad de Castilla – La Mancha. pp 39 – 66, 1998.

⁶⁶ REAL DECRETO 61/2006, de 31 de enero, por el que se determinan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo y se regula el uso de determinados biocarburantes. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2006

3.2.1. El aceite vegetal

El aceite vegetal se extrae por un método usado desde la antigüedad, sin embargo, ampliamente mejorado y mucho más eficiente. Además, hoy el proceso de extracción de aceite se emplean solventes orgánicos para obtener virtualmente el 100% de aceite contenido en las semillas. El proceso no se detiene con la extracción del aceite vegetal, sino que luego es refinado para remover los ácidos grasos y otras impurezas que están adicionadas y que produce que el aceite tenga olores y una apariencia desagradables y que puede en algunos casos ser peligroso para la salud.

El proceso de elaboración de aceites para uso alimenticio comienza por el cultivo de las semillas y termina con la puesta en el mercado del aceite. En todo el proceso hay diferentes criterios de actuación los cuales sin lugar a duda determinaran la calidad final del aceite. La legislación Europea permite diferentes posibilidades para la puesta en el mercado de los aceites de semillas.

Proceso de obtención del aceite:

El método usado para extraer el aceite de las semillas comienza con una separación de restos de metales, pequeñas piedras y arenillas, que haya sido mezclada con las semillas desde la granja antes del descascarillado, seguido de las siguientes fases, en la figura 3.1 se puede ver un diagrama del proceso de obtención del aceite.

Preparación de las semillas. Descascarillado, separación de cáscaras, limpieza por criba, aplastado del grano mediante molino de cilindros.

Calentamiento de las semillas. Se calientan mediante el paso por tubos de vapor a temperatura $> 100^{\circ}$.

Prensado. Obtención del aceite mediante presión en prensa sinfín de gran potencia. El líquido resultante suele superar los 60° de temperatura, Se suele producir que a partir de 45° la molécula de los ácidos grasos insaturados se altera de su forma natural "Cis" a su forma "Trans".

Filtro por centrifugado, se obtiene aceite en bruto de presión. Los restos del prensado (la torta), son mezclados con disolventes (Hexano). Resulta una mezcla de aceite + Hexano que es destilada y pasada a través de vapor. Se obtiene aceite en bruto de extracción.

Mezclado del aceite en bruto. Se mezcla el aceite en bruto de extracción con el de presión.

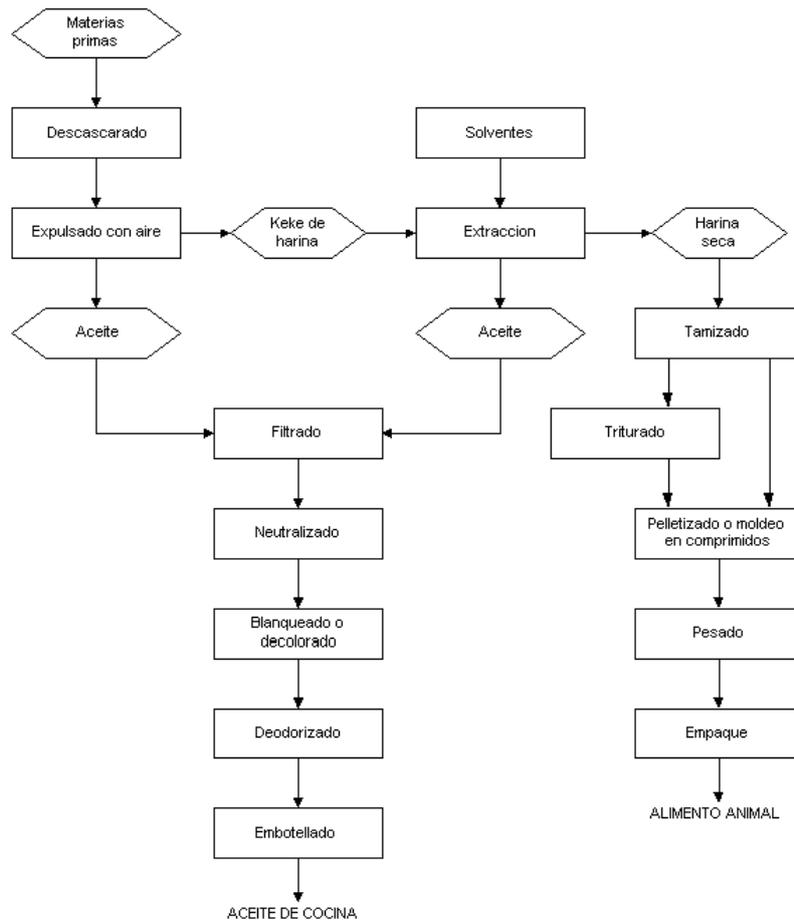


Figura 2.1. Esquema de principio de obtención de aceite de semillas.

Desmucilagínación. Mediante sales inorgánicas o ácidos diluidos.

Neutralización. El aceite resultante es sometido a la neutralización mediante lejías acuosas alcalinas y el uso de ciertas sustancias jabonosas.

Lavado y secado. El aceite neutro obtenido es lavado en agua, quedando restos de sustancias jabonosas.

Decoloración. Se decolora el aceite mediante el uso de tierras decolorantes y carbón activo.

Filtrado. Se filtra mediante el paso a través de tierras usadas y pigmentadas obteniéndose un aceite neutro y claro.

Eliminación de ceras. Este proceso no es obligatorio.

Desodorización. Mediante la inyección de vapor (180° a 200°) al vacío se elimina las sustancias volátiles.

Composición del aceite vegetal

Los aceites y las grasas están formados por ésteres de la glicerina (triglicéridos) y ácidos grasos saturados o insaturados. Los aceites contienen mayor proporción de ácidos no saturados que las grasas por lo que presentan un punto de fusión más bajo.

Los tres ácidos que más frecuentemente se encuentran en las grasas y aceites son el palmítico, esteárico y oleico, los dos primeros a temperatura ambiente son sólidos y el tercero es líquido.

La nomenclatura utilizada para nombrar a los distintos ácidos grasos varía según su campo de aplicación, distinguiéndose:

- **La nomenclatura sistemática de Ginebra⁶⁷.** Muy específica pero escasamente utilizada por los técnicos por su complejidad aunque en algunos casos es la única posible para ácidos grasos escasamente difundidos en la naturaleza. Consiste fundamentalmente para nombrar al ácido graso elegir como función principal la función ácido considerando entre todas las cadenas posibles la cadena lineal con mayor nº de átomos de carbono que contiene a la función ácido.
- **Nombre común.** Utilizado tanto por científicos como técnicos del campo de los aceites y las grasas y menos difundida fuera de ese campo. El nombre generalmente impuesto por el descubridor deriva en muchos casos de la planta donde se descubrió.
- **Nomenclatura abreviada.** Se indica en primer lugar el nº de átomos de carbono de la cadena más larga con el grupo carboxílico seguido por “:” y el nº de enlaces diferentes a C-C de la misma. A continuación entre paréntesis y separados por comas se expresa la posición en la cadena del primer átomo de carbono con una función distinta al enlace saturado y la naturaleza de dichos enlaces distintos (enlaces cis “c” y enlaces trans “t” y triple enlace “a”).

Relación de algunos ácidos grasos más comunes entre grasas y aceites en sus distintas nomenclaturas se recogen en la tabla 3.1:

⁶⁷ International Union of Pure and Applied Chemistry, “The Congress of Chemistry, Ginebra 1892.

Tabla 3.1: Ácidos grasos más comunes.⁶⁸

NOMBRE COMÚN	NOMENCLATURA SISTEMÁTICA	NOMENCLATURA ABREVIADA	PROCEDENCIA
Ácidos grasos saturados			
Butírico	Butanoico	4:0	Leche de rumiantes
Caproico	Hexanoico	6:0	Leche de rumiantes y palmáceas.
Caprílico	Octanoico	8:0	Leche de rumiantes y palmáceas
Láurico	Dodecanoico	12:0	Laureáceas, coco y palmiste
Mirístico	Tetradecanoico	14:0	Miristáceas, coco y palmiste
Palmítico	Hexadecanoico	14:0	Todas las grasas
Ácidos grasos monoinsaturados			
Palmitoleico	Hexadec-9c-enoico	16:1(9c)	Grasas y aceites animales, vegetales, marinas
Oleico	Octadec-9c-enoico	18:1(9c)	Todas las grasas
Vaccénico	Octadec-11t-enoico	18:1(11t)	Mantequilla
Ácidos grasos poliinsaturados			
Linoleico	Octadeca-9c, 12c-dienoico	18:2(9c, 12c)	Todas las grasas
Linolénico	Octadeca-6c,9c	18:3(9c, 12c, 15c)	Todas las grasas

El número de ácidos grasos distintos es bastante elevado hay caracterizados en la actualidad más de cuatrocientos ácidos grasos distintos.

A continuación se exponen para las grasas y los aceites más usuales su composición media en ácidos grasos, esta composición en algunos casos es muy variada dependiendo de la variedad de semilla, de las técnicas de cultivo y de la edafología.

⁶⁸ Enrique Graciani Constante, Los aceites y grasas: composición y propiedades. Editor, AMV, 2006

Tabla 3.2: Composición en Ácidos grasos de los aceites y grasas más comunes.

	Manteca de cerdo	Sebo de Vacuno	Aceite de soja	Aceite de Colza	Aceite de Girasol	Aceite de Oliva
Mirístico		1,1				
Palmítico	28,3	24,6	7,0-14,0	2,8	3,0-10,0	6,9
Esteárico	11,9	30,5	1,5-5,5	1,1	1,0-10,0	
Oleico	47,5	36,0	19,0-30,0	10,9	14,0-65,0	84,4
Linoleico	6,0	4,3	44,0-62,0	11,6	20,0-75,0	4,6
Linoléico			4,0-11,0	9,9		34,1
Araquídico				1,2		
Gadolénico				9,5		
Erúcido				51,6		

3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS COMBUSTIBLES.

En los procesos de combustión junto con las características químicas del combustible, sobre todo su composición, es importante el conocimiento de algunas características físicas.

3.3.1. Densidad

La densidad de una sustancia a una temperatura se define como el cociente entre su masa y su volumen a dicha temperatura, en el S.I. la densidad se mide en Kg/m³.

La dependencia de la densidad con la presión se considera despreciable.

Es muy usual utilizar el concepto de densidad relativa frente al de densidad absoluta que es el anterior. La densidad relativa es el cociente entre la densidad absoluta de una sustancia a una temperatura y la densidad a esa misma temperatura de una sustancia de referencia, en el caso de líquidos la sustancia de referencia suele ser el agua. La densidad relativa es una variable adimensional.

Es frecuente en hidrocarburos utilizar para la medida de la densidad relativa los grados API de sus siglas en inglés American Petroleum Institute, definidos como:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\text{sp.gr}_{60/60^{\circ}\text{F}}} - 131,5$$

En la que: sp.gr_{60/60°F} es la densidad relativa del hidrocarburo respecto del agua a 60°F (15,56°C).

Para la determinación de la densidad de un combustible existen distintos métodos como la Norma UNE 51156⁶⁹ y ASTM⁷⁰ D4052-96

La figura 3.2 permite obtener la densidad relativa cuando variamos la temperatura, tomando como base la densidad a 15,56°C (60°F).

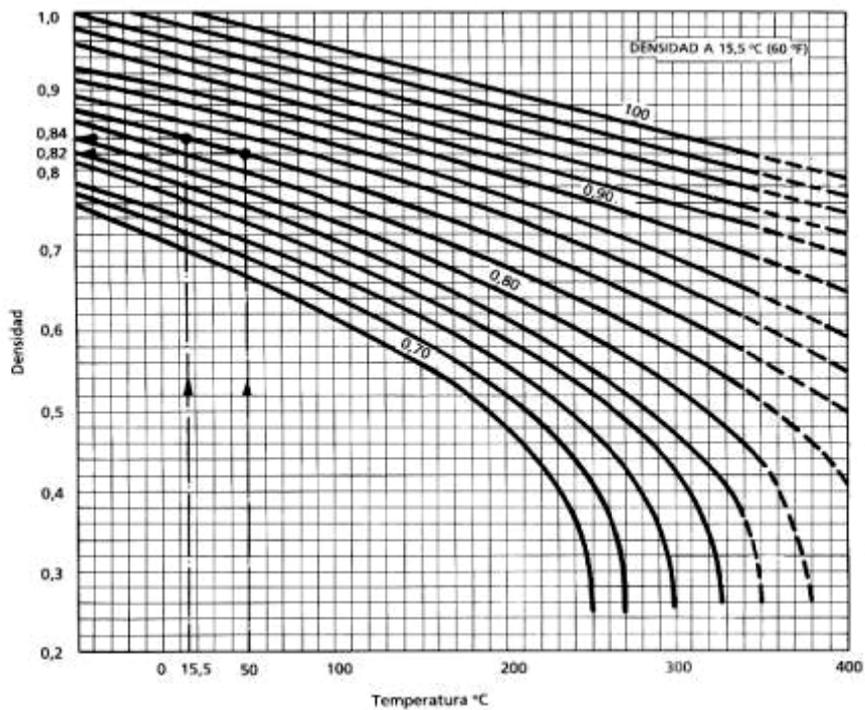


Figura 3.2: Variación de la densidad relativa con la temperatura⁷¹.

⁶⁹ Norma UNE 51116, de 15 de septiembre de 1998. Petróleos crudos y productos petrolíferos líquidos. Determinación de la densidad y de la densidad relativa en el laboratorio. Método del areómetro, 1998.

⁷⁰ ASTM D4052 - 96, 2002.)e1 Standard Test Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter, 2002.

3.3.2. Viscosidad

La viscosidad es la resistencia que ofrece internamente un fluido cuando se le aplica una fuerza exterior. A causa de la viscosidad es necesario aplicar una fuerza para obligar a una capa de fluido a deslizar sobre otra.

La fuerza que hay que aplicar es proporcional al gradiente de velocidad, el coeficiente de proporcionalidad es la viscosidad dinámica o absoluta y se mide en Poises. (En el S.I. se mide en Pa.s)

La viscosidad es consecuencia de las fuerzas de cohesión entre las moléculas del fluido, en los líquidos, las fuerzas de cohesión son mucho más grandes que en los gases, al igual que la viscosidad. Los efectos de la temperatura sobre la cohesión y sobre la viscosidad en el caso de líquidos es disminuir notablemente con el aumento de la misma. Las variaciones de presión no tienen apenas influencia en la viscosidad de líquidos.

La viscosidad y la adherencia son factores muy importantes en el uso de combustibles líquidos, para su trasiego, y para la pulverización en quemadores.

En las especificaciones se suele emplear la viscosidad cinemática que es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad. La unidad empleada es el Stoke. (En el S.I. m^2/s).

Es frecuente la utilización en Europa de los grados Engler ($^{\circ}E$) medida experimental tomada del aparato de medida llamado viscosímetro Engler. En la técnica de aceites lubricantes se utiliza para el grado de viscosidad el número SAE (Society of Automotive Engineers).

La variación de la viscosidad con la temperatura en un aceite genérico tiene una gráfica similar a la figura 3.3:

⁷¹ ASTM D4052 – 96, 2002.)e1 Standard Test Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter, 2002.

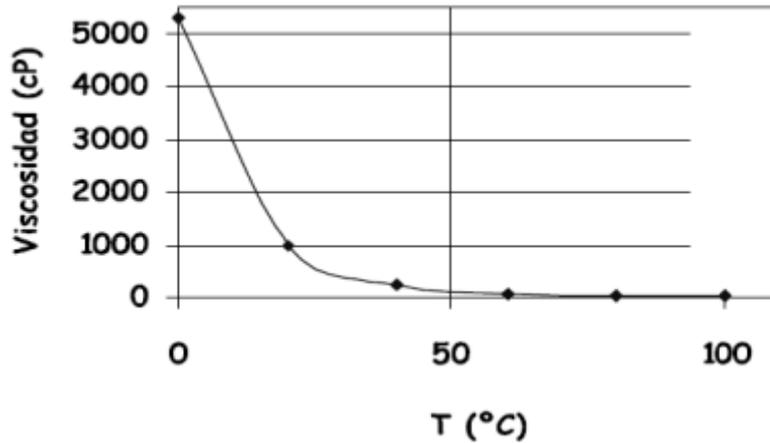


Figura 3.3: Típica variación de la viscosidad con la temperatura en aceites

Es frecuente la utilización de escalas logarítmicas para representar la variación de viscosidad con la temperatura de forma que la representación sea una recta.

En la figura 3.4 podemos observar la variación de la viscosidad con la temperatura de distintos tipos de combustibles comerciales con sus valores límites de uso para verano e invierno y la clasificación de dichos combustibles por su viscosidad.

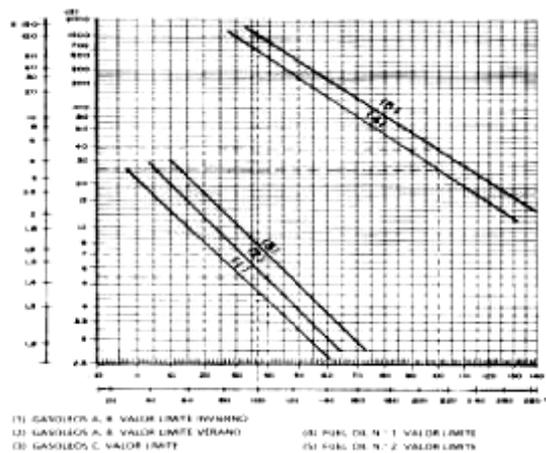


Figura 3.4: Variación de la viscosidad con la temperatura⁷².

⁷² Norma UNE 51108, de 15 de marzo de 1983. Productos petrolíferos. Determinación de la viscosidad cinemática y cálculo de la viscosidad dinámica. Líquidos opacos y transparentes, 1983.

Para determinar la viscosidad de la mezcla de dos combustibles distintos podemos utilizar la figura 3.5 en función de los porcentajes de mezcla. Así mismo la gráfica nos permite determinar los porcentajes para alcanzar una determinada viscosidad.

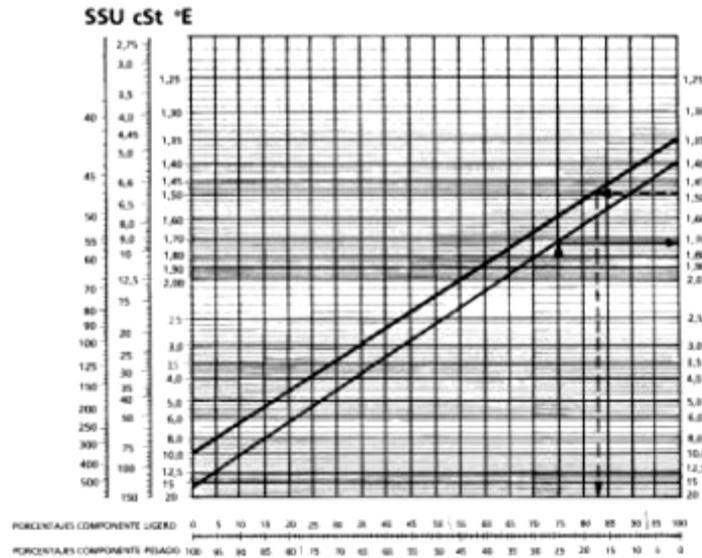


Figura 3.5: Viscosidad de la mezcla de dos combustibles⁷³.

En la gráfica anterior se representan las viscosidades de los dos componentes, a la derecha el ligero y a la izquierda el pesado, en el eje de abscisas se representa los porcentajes de cada uno de los componentes.

La determinación de la viscosidad de una determinada mezcla se consigue trazando la recta que une los puntos de viscosidad e ambos componentes, llevando los porcentajes de la mezcla en una vertical hasta cortar a la anterior, trazándola horizontal nos determina la viscosidad de la mezcla.

Así mismo podemos determinar partiendo de una determinada viscosidad los porcentajes de mezcla para conseguirla.

En el gráfico están determinados la mezcla de 75% y 25% de dos combustibles de viscosidad a 50°C de 1,4°E y 17°E. La viscosidad resultante es de 1,74°E.

⁷³ ASTM D341 - 09 Standard Practices for Viscosity-Temperature Charts for Liquid Petroleum Products, 2009.

Para la determinación del porcentaje de mezcla usamos combustibles de viscosidad 1,35°E y 10°E, queriendo obtener una viscosidad de mezcla de 1,5°E, siguiendo el procedimiento anterior determinamos los porcentajes de mezcla, siendo 83% y 17%.

3.3.3. Poder calorífico.

El poder calorífico representa la energía específica liberada como consecuencia de la reacción de combustión completa, en la que se forman como productos de la combustión CO₂ y H₂O. En condiciones estándar se considera al combustible en estado líquido, a una temperatura de 25°C, el aire y los productos de la combustión se consideran a esa misma temperatura.

Cabe distinguir entre el Poder Calorífico Inferior (PCI) y el Poder Calorífico superior (PCS) dependiendo de que el agua formada en la combustión esté en fase líquida o gaseosa.

La determinación del Poder calorífico se hace en laboratorio utilizando una bomba calorimétrica. La combustión de una muestra de carburante en atmósfera de oxígeno en un recipiente sumergido en agua permite la determinación de la energía liberada por el incremento de temperatura del agua, corregido con las características calóricas del dispositivo.

Los dispositivos calorimétricos proporcionan el PCS del combustible, para la determinación del PCI es necesario conocer el contenido de hidrógeno del combustible. La masa de agua producida por la combustión de un kg de comburente cuyo contenido másico de hidrógeno es M_H puede expresarse como:

$$M_{H_2O} = \frac{M_H}{100} * \frac{18}{2}$$

Como la entalpía de vaporización del agua a 25°C es de 2.443 kJ/kg obtenemos:

$$PCI = PCS - 220 * M_H$$

Con PCI y PCS expresados en kJ/kg.

Existen correlaciones para la determinación del PCI en función de ciertos parámetros, por ejemplo en la formula de Sirtori⁷⁴:

$$PCI_m = 4,18 \cdot (106,38 \cdot \text{Parafinas} + 105,76 \cdot \text{Olefinas} + 95,55 \cdot \text{Aromáticos})$$

El PCI medido en kJ/kg y Parafinas, Olefinas y aromáticos el tanto por ciento en peso de estos compuestos en el combustible.

3.3.4. Contenido de azufre

El contenido de azufre, característico de los derivados del petróleo se determina mediante la Norma ASTM 1552⁷⁵, su presencia en los combustibles es fuente de contaminación ambiental y de problemas de corrosión.

Los problemas de corrosión pueden originarse a baja temperatura por condensación del ácido sulfúrico al alcanzar los humos el punto de rocío ácido o a alta temperatura produciendo en turbinas y calderas con alto grado de recalentamiento corrosión por sulfatos de metales alcalinos.

Las cantidades máximas de azufre en los combustibles comerciales se han ido reduciendo drásticamente en los últimos años.

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE COMBUSTIBLES A ESTUDIAR.

Las muestras de combustibles que se van a estudiar son mezclas de aceite vegetal y gasóleo en diferentes proporciones, para caracterizar las mezclas se comienza con la caracterización cada aceite vegetal y el gasóleo, de forma independiente, para luego poder determinar las propiedades de las diferentes mezclas

3.4.1. Aceites a estudio

Los aceites vegetales de soja, girasol y colza se han solicitado al Grupo SOS Aceites Ibericos Acisa a la factoría de Andujar (Jaén), la cual nos suministra el producto elaborado.

⁷⁴ Sirtori, S., Garibaldi P. y Vicenzetto F.A., "Prediction of the combustion properties of gasoline from the analysis of their composition". SAE paper n. 74-1058, International automobile Engineering and Manufacturing Meeting. Toronto, Ontario, 1974.

⁷⁵ ASTM D1552 - 08 Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products (High-Temperature Method), 2008.

Aceite de colza

El aspecto que presenta el aceite de colza se muestra en la foto 3.1:



Foto 3.1: Aceite de colza, según ha sido recibido.

Apariencia de la muestra de aceite de colza recibido se recoge en la tabla 3.3:

Tabla 3.3: Apariencia de la muestra de aceite de colza.

CARACTERIZACIÓN	
Estado de agregación	Líquido
Apariencia	Homogénea
Olor	Aceite sintético
Impurezas	Presenta
Estratificación	No presenta
Color	Dorado y transparente

Aceite de soja

El aspecto que presenta el aceite de soja refinado se muestra en la foto 3.2:



Foto 3.2: Aceite soja, según ha sido recibido.

Apariencia de la muestra de aceite de soja recibido se recoge en la tabla 3.4:

Tabla 3.4: Apariencia de la muestra de aceite de soja.

CARACTERIZACIÓN	
Estado de agregación	Líquido
Apariencia	Homogénea
Olor	Inapreciable
Impurezas	No presenta
Estratificación	No presenta
Color	Dorado y transparente

Datos que nos facilita el suministrador:

- Acidez 0,11
- Color Lovibond (5 ¼ “)
 - UU Rojas 1,5
 - UU Amarillas 15
- Composición de ácidos grasos:
 - C 14:0 Mirístico (%) 0,08
 - C 16:0 Palmitico (%) 10,91
 - C16:1 Palmitoleico (%) 0,09
 - C18:0 Esteárico (%) 3,00
 - C18:1 Oleico (%) 24,90

- C18:2 Linoleico(%) 54,23
- C18:3 Linolénico (%) 5,42
- C20:0 Aráquico (%) 0,32
- C20:1 Gadoleico (%) 0,25
- C22:0 Behénico (%) 0,45

Aceite de girasol

El aspecto que presenta el aceite de girasol refinado se muestra en la foto 3.3:



Foto 3.3: Aceite girasol, según ha sido recibido.

Apariencia de la muestra de aceite girasol recibido se recoge en la tabla 3.4:

Tabla 3.4: Apariencia de la muestra de aceite girasol.

CARACTERIZACIÓN	
Estado de agregación	Líquido
Apariencia	Homogénea
Olor	Pipas tostadas
Impurezas	No presenta
Estratificación	No presenta
Color	amarillo y transparente

Datos que nos facilita el suministrador:

- Acidez 0,12
- Color Lovibond (5 ¼ “)
 - UU Rojas 1,0
 - UU Amarillas 10,0
- Composición de ácidos grasos:
 - C 14:0 Mirístico (%) 0,08
 - C 16:0 Palmitico (%) 6,61
 - C16:1 Palmitoleico (%) 0,18
 - C18:0 Esteárico (%) 3,80
 - C18:1 Oleico (%) 30,53
 - C18:2 Linoleico(%) 57,17
 - C18:3 Linolénico (%) 0,07
 - C20:0 Aráquico (%) 0,28
 - C20:1 Gadoleico (%) 0,15
 - C22:0 Behénico (%) 0,72

Aceite vegetal usado

el aceite vegetal usado se han solicitado a una empresa de transformación de aceites vegetal usado en biodiesel, que tiene como materia prima el aceite vegetal usado, que les suministran los gestores de aceites usados y como subproducto del proceso de la planta se obtiene glicerina.

El aspecto que presenta el aceite vegetal usado se muestra en la foto 3.4:

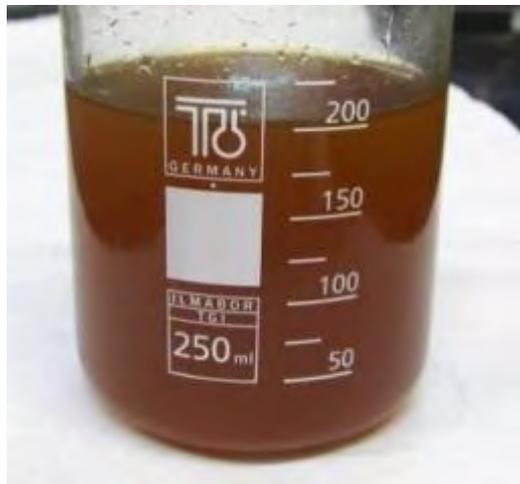


Foto 3.4: Aceite vegetal usado, según ha sido recibido.

Las características aparentes de la muestra de aceite vegetal usado que se recibió se recoge en la tabla 3.5:

Tabla 3.5: Características aparentes de la muestra de aceite vegetal usado.

CARACTERIZACIÓN	
Estado de agregación	Líquido
Apariencia	Homogénea
Olor	Frito
Impurezas	No presenta
Estratificación	No presenta
Color	Dorado y transparente

Datos que nos facilita el suministrador:

- Agua 600 PPM
- Acidez 2,55 mg KH/g

3.4.2. Caracterización de los aceites como combustibles

El estudio se realiza sobre seis aceites vegetales:

- Aceite vegetal de colza crudo.
- Aceite vegetal de soja crudo.
- Aceite vegetal de soja refinado
- Aceite vegetal de girasol crudo.
- Aceite vegetal de girasol refinado.
- Aceite vegetal usado.

La caracterización como combustible de los aceites y el gasóleo de forma independiente se ha realizado en el Laboratorio Regional de Combustibles LARECOM, en la Tabla 3.7 se puede observar las características de los aceites y del gasóleo. (En el Anexo 2 se recogen todos los análisis).

Tabla 3.7: Características de los aceites y el gasóleo.

	Aceite Colza crudo	Aceite Soja crudo	Aceite Soja refinado	Aceite Girasol crudo	Aceite Girasol refinado	Aceite Vegetal Usado	Gasóleo
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	919,5	922,5	922,5	923	922,5	920	848
Densidad a 35 °C (kg/m ³)	906,5	909,5	910	910	909,5	907,5	635
Viscosidad cinemática a 40 °C (mm ² /s)	35,45	31,96	32,52	33,7	33,68	41,22	2,7
Viscosidad cinemática a 100 °C (mm ² /s)	8,24	7,67	7,95	7,98	8,25	8,87	1,2
% S en masa	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,03	<0,02	0,07
% C en masa	77,5	77,4	77,4	78,0	77,5	77,3	86,6
% H en masa	11,7	11,5	11,6	11,5	11,5	11,3	12,3
% O en masa	10,8	11,0	10,9	10,4	10,9	11,3	1,03
% N en masa	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	---
Cenizas	0,025		0,002		<0,001	0,012	---
P.C.S. (MJ/kg)	39,4	39,3	39,3	39,42	39,2	39,3	44,9
P.C.I. (MJ/kg)	36,9	36,9	36,8	37,0	36,7	36,9	42,3

En las características de las diferentes sustancias, que aparecen en la Tabla 3.7, se puede observar que los aceites poseen características muy similares. Las diferencias más significativas de estas con el gasóleo, corresponden a características como viscosidad y el porcentaje de oxígeno, de lo que se puede concluir que para el proceso de combustión se debe de emplear un quemador específico para este tipo de combustible, esto para el caso de la viscosidad y en cuanto al oxígeno, se debe trabajar con un índice de oxígeno más bajo.

3.5. MISCIBILIDAD Y/O SOLUBILIDAD DE ACEITES EN GASÓLEO.

Los aceites y las grasas a temperaturas superiores a su temperatura de fusión son totalmente miscibles con los disolventes orgánicos, la solubilidad aumenta con la temperatura⁷⁶. Existen algunas inmiscibilidades concretas como la del aceite de ricino, que no es completamente miscible con los hidrocarburos de cadena larga.

Con condiciones supercríticas se presentan así mismo situaciones de inmiscibilidad por lo que esta característica puede ser empleada para fraccionarlos en una extracción líquido-líquido.

⁷⁶ Formo M-W. Jungermann E., Norris F.A., Sonntag N.O. "Bailey's industrial oil and fat products" Eds. Swern D.Edn 4th Vol.1 ed. John Wiley and Sons. New York, USA, 1997

Los metilesteres de los aceites vegetales poseen características físico-químicas muy similares a las del gasóleo con el que pueden mezclarse en cualquier proporción no alterando muy significativamente las propiedades del gasoil como su poder calorífico o el índice de cetano.⁷⁷

Proceso de mezcla.

El estudio de mezcla permite concluir que para tener una mezcla homogénea de aceite y gasóleo no se puede pasar del 60% de mezcla, cada mezcla tiene un código de identificación. El código consta de tres letras y dos números:

- Las letras:
 - ACC Aceite de colza crudo
 - ASC Aceite de soja crudo.
 - ASR Aceite de soja refinado
 - AGC Aceite girasol crudo
 - AGR Aceite girasol refinado
 - AVU Aceite vegetal usado
- Los números representan el porcentaje (%) de aceite empleada en la mezcla. Se preparan cuatro mezclas por cada tipo de grasa en diferentes porcentajes (10, 20, 30, 40 %).



Foto 3.5: Aceite de colza crudo mezclado con gasóleo.

⁷⁷Guía completa de la biomasa y los biocombustibles. José M^a Fernández Salgado. AMV Ediciones2010 (1^a Edición). ISBN: 978-84-96709-62-1.

3.5.1. Caracterización de las mezclas.

La caracterización de cada una de las mezclas se realiza:

i) a partir del conocimiento de las propiedades de los componentes puros que forman la mezcla (teóricas), mediante la regla de la aditividad con respecto a una propiedad física:

$$P_{mt}(T) = x_a * P_a(T) + (1 - x_a) * P_d(T)$$

Donde: $P_{mt}(T)$ es la propiedad física de la mezcla teórica a la temperatura T , x_a es la fracción molar de la grasa en la mezcla, $P_a(T)$ y $P_d(T)$ son la propiedades físicas de la grasa y el gasóleo.

ii) a partir de medidas de laboratorio (empíricas), como es el caso de la viscosidad, la reología la ciencia de la deformación y del flujo de la materia en el caso de los aceites es extremadamente complicada, al no poder ser considerados fluidos Newtonianos⁷⁸, la viscosidad de cada una de las mezclas determinada en el LARECOM, presentan una gran desviación de la calculada partiendo de los valores de los compuestos de origen y su porcentaje.

En la Tabla 3.8, se presentan los resultados de las mezclas de aceite de colza **crudo** y gasóleo en diferentes proporciones.

Tabla 3.8: Características de las mezclas de aceite de colza y gasóleo.

Nombre	%C	%H	%O	%S	Densidad (15 °C) (kg/m ³)	Viscosidad (100 °C) (mm ² /s)	P.C.I. (MJ/kg)
ACC-00	86,6	12,3	—	0,07	848	1,2	42,3
ACC-10	85,7	12,2	1,1	0,065	855,4	1,9	41,8
ACC-20	84,8	12,1	2,2	0,060	862,7	2,6	41,2
ACC-30	83,9	12,0	3,3	0,055	870,1	3,2	40,7
ACC-40	83,0	11,9	4,4	0,050	877,4	3,9	40,2
ACC-50	82,1	11,9	5,6	0,045	884,8	4,6	39,7
ACC-100	79,0	11,5	10,4	<0,02	923	7,98	36,2

En la Tabla 3.9, se presentan los resultados de las mezclas de aceite de soja **crudo** y gasóleo en diferentes proporciones.

⁷⁸ Flores Luque V., Gómez Herrera C., Tabernero de la Linde P. Grasas y aceites. 26:216-220, 1975.

Tabla 3.9: Características de las mezclas de aceite soja crudo y gasóleo.

Nombre	%C	%H	%O	%S	Densidad (15 °C) (kg/m ³)	Viscosidad (100 °C) (mm ² /s)	P.C.I. (MJ/kg)
ASC-00	86,6	12,3	—	0,07	848	1,2	42,3
ASC-10	85,7	12,2	1,1	0,065	855,5	1,8	41,8
ASC-20	84,8	12,1	2,2	0,060	862,9	2,5	41,2
ASC-30	83,8	12,1	3,3	0,055	870,4	3,1	40,7
ASC-40	82,9	12,0	4,4	0,050	877,8	3,8	40,1
ASC-50	82,0	11,9	5,5	0,045	885,3	4,4	39,6
ASC-100	77,4	11,5	11,0	<0,02	922,5	7,67	36,9

En la Tabla 3.10: se presentan los resultados de las mezclas de aceite de soja refinado y gasóleo en diferentes proporciones.

Tabla 3.10: Características de las mezclas de aceite de soja refinado y gasóleo.

Nombre	%C	%H	%O	%S	Densidad (15 °C) (kg/m ³)	Viscosidad (100 °C) (mm ² /s)	P.C.I. (MJ/kg)
ASR-00	86,6	12,3	—	0,07	848	1,2	42,3
ASR-10	85,7	12,2	1,1	0,065	855,5	1,9	41,8
ASR-20	84,8	12,2	2,2	0,060	862,9	2,6	41,2
ASR-30	83,8	12,1	3,3	0,055	870,4	3,2	40,7
ASR-40	82,9	12,0	4,4	0,050	877,8	3,9	40,1
ASR-50	82,0	12,0	5,5	0,045	885,3	4,6	39,6
ASR-100	77,4	11,6	10,9	<0,02	922,5	7,95	36,8

En la Tabla 3.11: se presentan los resultados de las mezclas de aceite de girasol crudo y gasóleo en diferentes proporciones.

Tabla 3.11: Características de las mezclas de aceite de girasol crudo y gasóleo.

Nombre	%C	%H	%O	%S	Densidad (15 °C) (kg/m ³)	Viscosidad (100 °C) (mm ² /s)	P.C.I. (MJ/kg)
AGC-00	86,6	12,3	—	0,07	848	1,2	42,3
AGC-10	85,7	12,2	1,0	0,065	855,5	1,9	41,8
AGC-20	84,9	12,2	2,1	0,060	863,0	2,6	41,2
AGC-30	84,0	12,1	3,1	0,055	870,5	3,2	40,7
AGC-40	83,2	12,0	4,2	0,050	878,0	3,9	40,2
AGC-50	82,3	12,0	5,2	0,045	885,5	4,6	39,7
AGC-100	78,0	11,6	10,4	<0,02	923	7,98	37,0

En la Tabla 3.12: se presentan los resultados de las mezclas de aceite de girasol refinado y gasóleo en diferentes proporciones.

Tabla 3.12: Características de las mezclas de aceite de girasol refinado y gasóleo.

Nombre	%C	%H	%O	%S	Densidad (15 °C) (kg/m ³)	Viscosidad (100 °C) (mm ² /s)	P.C.I. (MJ/kg)
AGR-00	86,6	12,3	—	0,07	848	1,2	42,3
AGR-10	85,7	12,2	1,1	0,066	855,5	1,9	41,7
AGR-20	84,8	12,1	2,2	0,062	862,9	2,6	41,2
AGR-30	83,9	12,1	3,3	0,058	870,4	3,3	40,6
AGR-40	83,0	12,0	4,4	0,054	877,8	4,0	40,1
AGR-50	82,1	11,9	5,5	0,050	885,3	4,7	39,5
AGR-100	77,5	11,5	10,9	0,03	922,5	8,25	36,7

En la Tabla 3.13: se presentan los resultados de las mezclas de aceite vegetal usado y gasóleo en diferentes proporciones.

Tabla 3.13: Características de las mezclas de aceite vegetal usado y gasóleo.

Nombre	%C	%H	%O	%S	Densidad (15 °C) (kg/m ³)	Viscosidad (100 °C) (mm ² /s)	P.C.I. (MJ/kg)
AVU-00	86,6	12,3	—	0,07	848	1,2	42,3
AVU-10	85,7	12,2	1,1	0,065	855,2	2,0	41,8
AVU-20	84,7	12,1	2,3	0,060	862,4	2,7	41,2
AVU-30	83,8	12,0	3,4	0,055	869,6	3,5	40,7
AVU-40	82,9	11,9	4,5	0,050	876,8	4,3	40,1
AVU-50	82,0	11,8	5,7	0,045	884,0	5,0	39,6
AVU-100	77,3	11,3	11,3	<0,02	920	8,87	36,9

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 3

- 64) Council Directive no 2003/17/CE “relating to the quality of petrol and diesel fuels”.
- 65) Lapuerta M. y Hernández J.J., Lapuerta Amigo M. y Hernández Adrover J.J.. “Tecnologías de la combustión. Capítulo 2. Caracterización de los combustibles”, Ediciones de la Universidad de Castilla – La Mancha. pp 39 – 66, 1998.
- 66) REAL DECRETO 61/2006, de 31 de enero, por el que se determinan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo y se regula el uso de determinados biocarburantes. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2006
- 67) International Union of Pure and Applied Chemistry, “The Congress of Chemistry, Ginebra 1892.
- 68) *Enrique Graciani Constante, Los aceites y grasas: composición y propiedades. Editor, AMV, 2006.*
- 69) Norma UNE 51116, de 15 de septiembre de 1998. Petróleos crudos y productos petrolíferos líquidos. Determinación de la densidad y de la densidad relativa en el laboratorio. Método del areómetro, 1998.
- 70) ASTM D4052 – 96, 2002.)e1 Standard Test Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter, 2002.
- 72) Norma UNE 51108, de 15 de marzo de 1983. Productos petrolíferos. Determinación de la viscosidad cinemática y cálculo de la viscosidad dinámica. Líquidos opacos y transparentes, 1983.
- 73) ASTM D341 - 09 Standard Practices for Viscosity-Temperature Charts for Liquid Petroleum Products, 2009.
- 74) Sirtori, S., Garibaldi P. y Vicenzetto F.A., “Prediction of the combustion properties of gasoline from the analysis of their composition”. SAE paper n. 74-1058, International automobile Engineering and Manufacturing Meeting. Toronto, Ontario, 1974.
- 75) ASTM D1552 - 08 Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products (High-Temperature Method), 2008.
- 76) Formo M-W. Jungermann E., Norris F.A., Sonntag N.O. “Bailey´s industrial oil and fat products” Eds. Swern D.Edn 4th Vol.1 ed. John Wiley and Sons. New York, USA, 1997
- 77) Guía completa de la biomasa y los biocombustibles. José M^a Fernández Salgado. AMV Ediciones2010 (1^a Edición). ISBN: 978-84-96709-62-1.
- 78) Flores Luque V., Gómez Herrera C., Tabernero de la Linde P. Grasas y aceites. 26:216-220, 1975.

CAPITULO 4 COMBUSTIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo establece los fenómenos que influyen en el proceso de combustión de instalaciones térmicas convencionales, al objeto de poder seleccionar el proceso óptimo de combustión para las mezclas de aceite y gasóleo.

Los fenómenos implicados en la combustión son de distintos tipos, en primer lugar se estudiará los fenómenos de transporte asociados a la pulverización y a la evaporación del combustible, procesos previos a la combustión pero que influyen de forma fundamental en el proceso. Se hace una revisión de los principales trabajos sobre el tema, recogiendo los parámetros adimensionales más importantes que influyen en el proceso de pulverización.

La estequiometría de la reacción de combustión permite establecer las necesidades de aire y los caudales y composición de los humos de las mezclas de combustible. Se ha desarrollado una hoja de cálculo para determinar en función de los porcentajes de mezcla ensayados la composición elemental en tanto por uno de la mezcla así como las propiedades físicas de la misma.

Los procesos de combustión se analizan en función de tres aspectos, el rendimiento de la combustión de las diferentes mezclas de aceite vegetal

gasóleo, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y las emisiones de gases contaminantes, asociados al proceso de combustión y que limitan la posibilidad de usar dichas mezclas por aspectos medioambientales.

Para la determinación de los rendimientos de la combustión se utiliza el método indirecto, usual en este tipo de instalaciones, determinando el PC del combustible y las pérdidas en el proceso, que suelen ser: pérdidas sensibles por humos y pérdidas por quemados.

Los gases de efecto invernadero se cuantifican en función de la cantidad de CO₂, que aparece en los humos de origen fósil.

El análisis de las emisiones contaminantes más importantes asociadas al proceso de combustión, se realiza en función de la legislación en materia de emisiones para comprobar que los resultados están dentro de los límites establecidos en la citada legislación para el uso de generación térmica.

4.2 COMBUSTIÓN POR DIFUSIÓN

Los procesos de combustión se caracterizan atendiendo a distintos criterios: por su continuidad o discontinuidad tanto espacial como temporal; por la forma en que se realiza la mezcla de combustible-comburente; según la fase inicial del combustible y por el tipo de flujo del combustible y del comburente.

En la tabla 4.1, se ve las distintas clasificaciones de los procesos de combustión:

Tabla 4.1 Tipos de procesos de combustión.

Temporal	Espacial	Formación de la mezcla	Fase del combustible	Tipo de flujo
Localizada (Continuidad)	Deflagración (Discontinuidad de T)	Difusión	Gas/Gas	Laminar Turbulento
			Líquido/Gas	Laminar Turbulento
		Premezcla		Laminar Turbulento
	Detonación (Discontinuidad de P)			
Autoencendido (Discontinuidad)				

Los procesos de combustión que se van a experimentar en esta tesis son procesos continuos en el tiempo (combustión localizada) discontinuos en temperatura (deflagración), siendo la mezcla de combustible y comburente por difusión líquido /gas en régimen turbulento. El combustible, finamente atomizado se evapora absorbiendo calor, se mezcla con el aire y se produce la combustión.

En el proceso de combustión la etapa más lenta es la que controla el proceso, en nuestro caso, usando quemadores de pulverización por presión, es la evaporación la etapa que controla la combustión. Las gotas de combustible absorben calor por convección y fundamentalmente por radiación dada la alta temperatura existente en el hogar y en el frente de llama. Parte del líquido se vaporiza, alcanza la superficie de la gota donde existe una zona de vapor saturado y se difunde hacia el exterior.

Experimentalmente se ha comprobado que el diámetro de la gota decrece linealmente con el tiempo según la ley conocida como “ley d²”:

$$\frac{d(d_g^2)}{dt} = -K_v$$

En la que K_v es la constante de vaporización. Esa constante es función de las propiedades físico-químicas del líquido y del gas circundante. Spalding⁷⁹ determinó la constante de vaporización resolviendo las ecuaciones de la energía y de las especies bajo ciertas hipótesis encontrando la expresión:

⁷⁹ Spalding D. Brian, Combustión y transferencia de masa, CECSA 1.979

$$K_v = 8 * \frac{\rho_s}{\rho_f} * D_s * \ln(1+B)$$

Donde ρ_s y ρ_f son las densidades del aire y del líquido respectivamente, D_s es la difusividad másica y B se determina resolviendo un sistema de ecuaciones formado por la igualdad de números de transferencia, la ley de Dalton y la ecuación de Clausius-Clapeyron.

Admitiendo que la gota es esférica, inicialmente su masa será:

$$m_g = \frac{\pi}{6} * \rho_f * d_g^3$$

La velocidad con que su masa líquida se transforma en vapor:

$$m_{ev} = - \frac{dm_g}{dt} = \frac{\pi}{6} \rho_f \frac{d(d_g^3)}{dt} = \frac{\pi}{6} \rho_f \frac{d[(d_g^2)^{1.5}]}{dt} = \frac{\pi}{4} \rho_f d_g K_v$$

4.2.1 Atomización.

Para poder estimar el caudal de vapor generado es necesario determinar el número de gotas presentes en el chorro, su diámetro y las condiciones del ambiente que rodea a cada gota, es necesario estudiar el proceso de atomización, que es la desintegración de un caudal de líquido que se transforma en una dispersión de pequeños fragmentos o gotas.

La atomización es un proceso complejo en el que intervienen numerosos fenómenos físicos y en el que influyen parámetros relativos a la geometría del atomizador, a las propiedades del fluido atomizado y las del medio donde se atomiza. La vena fluida se disgrega por efecto de fuerzas centrífugas y aerodinámicas convirtiéndose en gotas o ligamentos, llamándose a este proceso atomización primaria, posteriormente las gotas se disgregan en gotas más pequeñas en el proceso llamado de atomización secundaria.

La mayoría de los atomizadores basan su funcionamiento en conseguir una alta velocidad relativa entre el líquido y el gas que lo rodea. En el tipo de atomizador que vamos a usar el líquido es descargado a alta velocidad sobre aire en reposo, este tipo de atomizador denominado de presión logra una mayor efectividad haciendo pasar el líquido por un pequeño orificio, cuando el líquido sale del atomizador al ambiente exterior solo está contenido por las fuerzas de tensión superficial, cuando estas fuerzas, por efecto centrífugo o aerodinámico son superadas se desfragmenta.

La energía en forma de presión suministrada al líquido se convierte en energía cinética al pasar por la tobera de dimensiones reducidas y el fluido se pulveriza en la expansión.

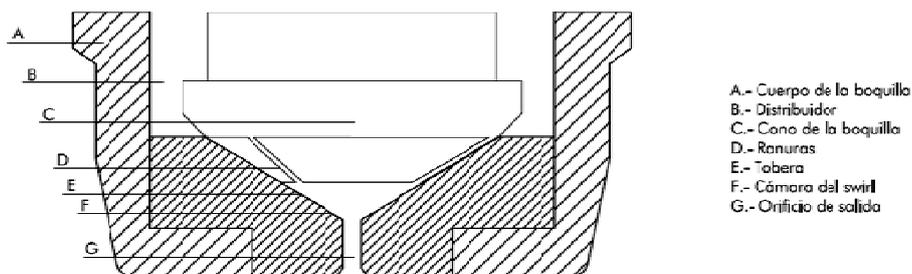
Otros métodos de atomización serían los de atomización con fluido auxiliar, generalmente aire o vapor, y la atomización mediante fuerza centrífuga. La combinación de distintos métodos de atomización, mejoran la eficiencia y flexibilidad de los atomizadores al tiempo que hacen su diseño más complejo.

Los atomizadores de presión pueden ser de chorro en los que la velocidad de salida es paralela al eje del atomizador y los de rotación en los que una componente rotacional hace que el fluido salga con una trayectoria helicoidal.

En los atomizadores de presión con rotación, el fluido pasa por unas ranuras que le proporcionan una elevada velocidad de rotación. La geometría de la tobera permite modelar la forma espacial del espray, si bien este tipo de atomizador es poco flexible no permitiendo más que límites de regulación muy pequeños, por lo que son utilizados en instalaciones de caudal constante.

Los atomizadores de presión con componente rotacional proporcionan una lámina cilíndrica en el interior del atomizador, la lámina se pega a las paredes y al abandonar el inyector la lámina se convierte en cónica, por lo que habitualmente se denominan de cono hueco, este tipo de atomizador suele denominarse PSN (pressureswirlnozzles)⁸⁰.

En la figura 4.1 puede observarse el diseño básico de un atomizador de presión con rotación. Los distintos fabricantes introducen modificaciones para mejorar la eficiencia de los mismos.



⁸⁰ Méndez C., "Modelado numérico de un chorro atomizado no estacionario", tesis doctoral, Universidad de Valladolid 2003.

Figura 4.1 Atomizador de presión con rotación (PSN)

Se va a caracterizar los parámetros geométricos que intervienen en la atomización

Parámetros geométricos:

- d_o : diámetro orificio de salida.
- d_d : diámetro vías tangenciales.
- d_s : diámetro de la cámara
- l_o : longitud orificio de salida.
- l_d : longitud vías tangenciales.
- l_s : longitud de la cámara
- A_o : área orificio de salida.
- A_d : área de vías tangenciales.
- N : número de vías tangenciales
- φ : ángulo vías tangenciales.
- ϵ : rugosidad de las superficies

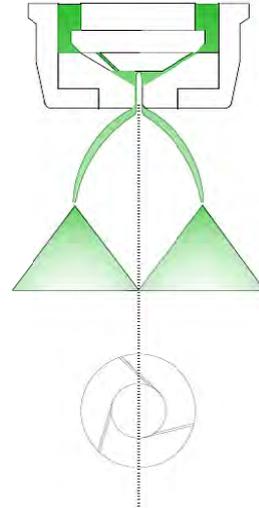


Figura 4.2 Atomizador con flujo (PSN)

Agrupando los parámetros geométricos característicos de los PSN formamos los grupos adimensionales que se muestran en la tabla 4.2:

Tabla 4.2 Grupos adimensionales geométricos (PSN)

Grupos adimensionales formados con los parámetros geométricos						
$K = \frac{N A_d}{d_s d_o}$	$\frac{l_d}{d_o}$	$\frac{d_o}{d_s}$	$\frac{l_d}{d_d}$	$\frac{l_s}{d_s}$	$\frac{\epsilon}{d_o}$	$N_s = \frac{\pi d_o d_s \cos \varphi}{4 N A_d}$

Debido a la excentricidad de las ranuras por las que circula el líquido y a la tobera que forman las paredes de la cámara del swirl el líquido se pega a las paredes del orificio de salida por lo que en su interior existe una

cámara de aire, denominándose por ello a este tipo de boquilla de cono hueco.

A la entrada de la cámara del swirl, las componentes de la velocidad del fluido serán⁸¹:

- U_{ts} = velocidad de rotación. (tangencial)
- U_{xs} = velocidad axial.
- U_s = módulo de velocidad.
- U_{bs} = velocidad media.
- $U_{bs} = \frac{Q}{N \cdot A_d}$

A la salida del orificio las componentes de la velocidad del fluido serán:

- U_{to} = velocidad de rotación. (tangencial)
- U_{xo} = velocidad axial.
- U_o = módulo de velocidad.
- U_b = velocidad media con orificio lleno.
- $U_b = \frac{Q}{A_o}$

Siendo Q el líquido inyectado.

Los procesos hidrodinámicos que se desarrollan en el interior de los atomizadores son muy complejos, en los análisis más simples se considera fluido no viscoso y el movimiento un vórtice libre al que se superpone un flujo axial.

La conservación del momento angular exige que se cumpla la ecuación siguiente:

$$U_{ts} \cdot r_s = U_{to} \cdot r_o.$$

Cuando la viscosidad no es despreciable se producen modificaciones importantes en el flujo interno como consecuencia del desarrollo de la capa límite. En trabajos recientes de simulación Dumouchel et al.⁸² Realizan el cálculo con fluido viscoso y considerando simetría axial y a la salida el orificio lleno de líquido. A pesar de las aproximaciones llegan a determinar los parámetros característicos del flujo en la salida como el ángulo de cono y el coeficiente de descarga.

⁸¹ Ruiz, F. y Chigier, N.A., Parametric experiments on liquid jet atomization spray angle, *Atomization and Sprays*, 1, 23-45, 1991.

⁸² Dumouchel C. Ledoux M. Bhor M.I.G. ,The design of pressure swirl atomizers, ASME International Gas Turbine Aeroengine Congress Exhibition 43 rd Stockholm Sweden (1998)

Consideraciones posteriores, Yule⁸³, ponen de manifiesto la existencia de flujo recirculante en las paredes de la cámara del swirl, así como diferentes perturbaciones en la superficie de la interface líquido-aire en la que aparecen ondas de pequeña amplitud que se propagan hacia la salida, influyendo en el desarrollo de la lámina y en su rotura.

Los parámetros característicos del flujo a la salida se reagrupan en los siguientes números adimensionales, tabla 4.3:

Tabla 4.3 Grupos adimensionales geométricos (PSN)

Grupos adimensionales del flujo de descarga		
Coefficiente de descarga $C_D = \frac{Q}{A_o \cdot \sqrt{2P/\rho_l}}$		Nº de flujo $FN = \frac{\dot{m}}{\sqrt{P \cdot \rho_l}} = \sqrt{2} C_D A_o$
Nº de Reynolds $Re_o = \frac{U_o \cdot d_o}{\nu_l}$	Coefficiente de velocidad $C_v = \frac{U_o}{\sqrt{2P/\rho_l}}$	Relación de Áreas $X = \frac{A_a}{A_o}$
<p> \dot{m}= flujo másico de líquido. Q= caudal de líquido. P= presión de inyección. U_b=velocidad media con orificio lleno. ρ_l=densidad del líquido. ν_l= viscosidad del líquido. A_a= área del núcleo de aire. </p>		

El coeficiente de descarga C_D relaciona el caudal inyectado con el caudal teórico de descarga considerando el orificio lleno y sin pérdidas.

El coeficiente de velocidad C_v expresa la reducción en la velocidad de descarga debido a las pérdidas internas del atomizador.

La geometría del flujo de salida se caracteriza por el ángulo de cono “α” y el espesor de la lámina.

Para la determinación de dichos parámetros se debe utilizar correlaciones empíricas más o menos complejas relacionadas con las características geométricas del atomizador, con las condiciones de la inyección (P, T) y con las propiedades del fluido.

⁸³ Yule A.J. Chinn J.J., The internal flow and exit conditions of pressure swirl atomizers, Atomization and Sprays, vol.10, no. 2, pp.121-146, 2000.

En la tabla 4.4, se recogen algunas de las correlaciones más importantes para caracterizar el flujo de salida:

Tabla 4.4 Parámetros característicos del flujo de salida

Correlaciones para la determinación del flujo de salida del atomizador		
Giffen y Muraszew ⁸⁴ Flujo viscoso	$C_D = \left[\frac{(1-X)^3}{1+X} \right]^{0,5}$	$\text{sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right) = \frac{C_D \cdot \pi / 2}{K(1 + \sqrt[2]{X})}$
Hay y Jones ⁸⁵	$C_D = 0,45 \cdot \text{Re}_o^{-0,02} \cdot K^{0,52} \cdot \left(\frac{l_o}{d_o} \right)^{-0,03} \left(\frac{l_s}{d_s} \right)^{0,05} \left(\frac{d_s}{d_o} \right)^{0,25}$	
Rizk y Lefebvre ⁸⁶	$C_D = 0,35 \cdot K^{0,5} \left(\frac{d_s}{d_o} \right)^{0,25}$	$t = 3,66 \left[\frac{d_o \cdot \dot{m} \cdot \mu_l}{P \cdot \rho_l} \right]^{0,25}$
	$\cos(\alpha/2) = \frac{C_D}{C_v(1-X)}$	$C_v = 0,00367 \cdot K^{0,29} \cdot \left(\frac{P \cdot \rho_l}{\mu_l} \right)^{0,2}$

La viscosidad tiene más influencia en los atomizadores de pequeño tamaño, al aumentar la viscosidad aumenta el espesor de la película de líquido.

En los atomizadores de pequeño caudal es necesario para un comportamiento estable alcanzar una presión de inyección mínima. Los parámetros de la descarga, ángulo de cono y coeficiente de descarga son independientes de la presión, es la zona de uso el atomizador. La presión de inyección mínima aumenta con la viscosidad del líquido.

El aumento del número de Reynolds, genera una disminución del C_D , pero a partir de un determinado valor se mantiene constante, en el trabajo de Ramamurthi⁸⁷, este valor marca la transición entre los diferentes tipos de lámina, al aumentar Reynolds se reduce el espesor de la lámina de líquido.

El número de rotación N_s influye sobre las características de la descarga, de forma que al aumentar N_s aumenta el ángulo de cono “ α ” y el C_D disminuye.

⁸⁴Edmund Giffen, A. Muraszew, The atomisation of liquid fuels, Chapman & Hall, 1953.
⁸⁵ Hay N. y Jones PL "Comparison of the various correlations for spray penetration". SAE, Paper 720776 1982.
⁸⁶ Rizk, N. K. and Lefebvre, A. H., Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers. *Journal of Propulsion and Power*, 1, 193-199. 1985.
⁸⁷ Ramamurthi K. Tharakan T.J. , Atomization characteristics of swirled annular liquid sheets, AIP Physcs of Fluids, 1997.

Alcanzado el orificio de salida, el líquido adquiere la forma cónica como puede verse en la figura 4.3.

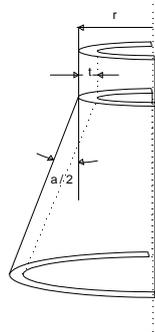


Figura 4.3 Geometría del flujo de salida.

El proceso de atomización pasa por la desintegración de las láminas, para convertirse en ligamentos o gotas y posteriormente en gotas más pequeñas.

La desintegración de láminas cónicas con elevada velocidad de rotación está influida por la presión de inyección, Lefevre⁸⁸ describe las distintas configuraciones que se muestran en la figura 4.4:

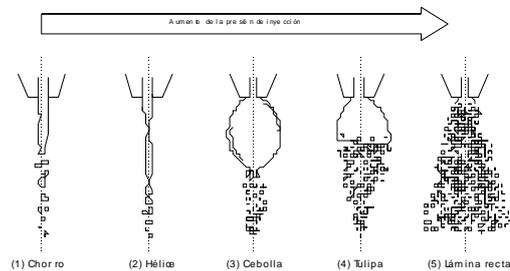


Figura 4.4 Influencia de la presión de inyección sobre el flujo.

⁸⁸ Lefebvre A.H. Atomization and Spray. Hemisphere Pub. Corp., 1989.

Al ir aumentando la presión de inyección, el flujo de descarga va pasando por las etapas siguientes:

1. Chorro que se desintegra según el régimen de Rayleigh⁸⁹ (baja velocidad).
2. Formación de estructuras helicoidales de líquido unidas por finas películas.
3. Tipo cebolla, la lámina se expande inicialmente pero se colapsa y adopta esa forma.
4. Tipo tulipa, la lámina tiende a cerrarse pero se rompe antes de colapsar.
5. Lámina cónica recta, las oscilaciones causan la rotura de la lámina a una distancia cada vez menor de la salida.

El objetivo de obtener un diámetro de gota y un número de gotas que aparecen en el chorro de atomización es solamente alcanzable determinando el diámetro medio de las gotas. Para este valor medio pueden tomarse distintos valores medios que responden a la expresión general:

$$D_{pq} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N_{cl}} N_i D_i^p}{\sum_{i=1}^{i=N_{cl}} N_i D_i^q}$$

En la tabla 4.5, puede verse los valores medios según el criterio elegido:

Tabla 4.5: Diámetros medios.

Diámetro medio	
D ₁₀	Diámetro de la distribución numérica
D ₂₀	Diámetro de una gota cuya superficie es el promedio de las superficies de todas las gotas del spray
D ₃₀	Diámetro de una gota cuyo volumen es el volumen medio de todas las gotas del spray.
D ₃₂	Diámetro de una gota cuya relación de superficie-volumen sea igual a la de toda la distribución
D ₄₃	Diámetro medio de la distribución de volúmenes
D _{50%}	Diámetro de gota tal que el 50% de las gotas del spray tengan un diámetro inferior

⁸⁹ Rayleigh Lord, on the instability of jet, Proc. London Math. Soc. (1878)

El diámetro D_{32} (DMS) llamado el diámetro de Sauter junto con el $D_{50\%}$ (DMV), son los valores más usados en la práctica.

En la tabla 4.6, se puede ver distintas correlaciones empíricas para la determinación del diámetro de Sauter en sprays generados con PSN, recopiladas por Lefebvre.

Tabla 4.6: Diámetro de Sauter generado con PSN

Diámetro medio de Sauter	
Jauja	$D_{32}=4,4\sigma_l^{0,6}u_l^{0,16}m^{0,22}p^{-0,43}$
Lefebvre	$D_{32}=2,25\sigma_l^{0,25}\mu_l^{0,25}m^{0,25}p^{-0,5}\rho_g^{-0,25}$
Wang y Lefebvre	$D_{32}=4,52\left[\frac{\sigma_l\mu_l^2}{\rho_g\cdot P^2}\right]^{0,25}(t\cdot\cos(\alpha/2))^{0,25}+0,39\left[\frac{\sigma_l\cdot\rho_l}{\rho_g\cdot P^2}\right]^2(t\cdot\cos(\alpha/2))^{0,25}$

La desintegración de la lámina de líquido genera un flujo bifásico gota-aire entre los que se desarrolla una interacción mutua con acciones aerodinámicas, generación de turbulencias, de forma que la distribución de tamaños puede verse alterada por otros fenómenos no contemplados hasta ahora como son.

- La rotura secundaria por interacción aerodinámica.
- Colisiones entre gotas que pueden producir coalescencia o fragmentación múltiple.
- Evaporación y condensación.

Los fenómenos de evaporación tienen mucha relevancia cuando las temperaturas son elevadas, como es el caso de los hogares donde están colocados los atomizadores.

En nuestros ensayos vamos a utilizar una boquilla comercial y los rangos de las propiedades de la mezcla y las condiciones de flujo que se desarrollen van a estar dentro del rango de los valores de uso de dicha boquilla recomendados por el fabricante. Al hacer el estudio de la instalación experimental se incluirán las características de la boquilla atomizadora empleada.

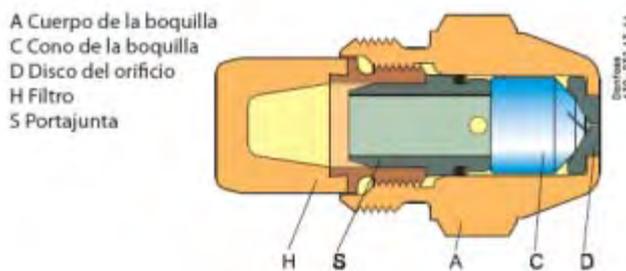
En forma de síntesis se incluye la tabla 4.7 con la influencia de los principales parámetros en la atomización para una boquilla dada:

Tabla 4.7: Influencia de la presión, viscosidad y densidad del combustible en la atomización.

	Presión	Viscosidad	Densidad
Caudal	Al crecer la presión el caudal crece proporcional a la raíz cuadrada	Al crecer la viscosidad el caudal decrece	Si la densidad crece el caudal crece directamente proporcional a la densidad
Ángulo	Si la presión crece el ángulo disminuye y la llama se alarga, con ángulos más abiertos los diámetros de gotas son mayores	Si crece la viscosidad el ángulo disminuye al disminuir la velocidad tangencial	No tiene efecto
Diámetro	Al aumentar la presión disminuye ligeramente la gota	Al aumentar la viscosidad el diámetro tiende a crecer	No tiene efecto

4.2.2 Atomizador de presión con rotación (PSN) utilizado

La boquilla de inyección seleccionada es comercial de la casa DANFOSS de 0,5 GPH, que ha sido caracterizada con un combustible de densidad 820 kg/m^3 , viscosidad $3,4 \text{ mm}^2/\text{s}$ y que ha sido inyectado a una presión de 7 bar, una representación de la misma se muestra en la Figura 4.5. La determinación del caudal inyectado para el gasóleo y a otras presiones los proporciona el fabricante y se presentan en la Tabla 4.8.



Tamaños de 0,65 a 35,00 USgal/h con rosca inferior

Figura 4.5: Boquilla de pulverización.

Tabla 4.8: Caudales de pulverización en función de la presión de inyección para un combustible de densidad 0,84.⁹⁰

Presión de inyección en kg/cm ²											
Caudal nominal en GPH	7		8		10		12		14		
	l/h	Kg/h									
0,40	1,5	1,3	1,7	1,4	1,8	1,5	1,9	1,6	2,0	1,7	
0,50	1,9	1,6	2,0	1,7	2,3	1,9	2,5	2,1	2,7	2,3	
0,60	2,3	1,9	2,4	2,0	2,7	2,3	3,0	2,5	3,2	2,7	
0,65	2,5	2,1	2,6	2,2	2,9	2,4	3,3	2,7	3,4	2,9	
0,75	2,8	2,4	3,1	2,6	3,5	2,9	3,8	3,2	4,0	3,4	
0,85	3,2	2,7	3,4	2,9	3,8	3,2	4,0	3,6	4,5	3,8	
1,00	3,8	3,2	4,0	3,4	4,5	3,8	5,2	4,2	5,2	4,4	
1,10	4,1	3,4	4,3	3,6	4,8	4,5	5,7	4,5	5,7	4,8	
1,20	4,5	3,8	4,9	4,1	5,5	4,8	6,3	5,0	6,3	5,3	

En los quemadores de pulverización mecánica la combustión está caracterizada por la evaporación y pulverización del combustible, al utilizar una boquilla comercial los grupos adimensionales de la Tabla 4.2 deben estar dentro de un rango próximos a los que el fabricante recomienda para su utilización.

Los parámetros geométricos de la boquilla son fijos y los parámetros que dependen de las propiedades de las mezclas, viscosidad y densidad, se mantienen en un rango semejante al gasóleo; es la razón por la que no se queman las grasas directamente, sino mezcladas con gasóleo para mantener las propiedades dentro de los rangos de uso de la boquilla y las condiciones de funcionamiento de boquilla se varían en tres presiones de inyección diferentes 10, 12 y 14 bar, rango que recomienda el fabricante de la boquilla.

Este criterio de mantener en un rango de variación las propiedades del fluido y las condiciones de funcionamiento, permite suponer que el proceso de evaporación y pulverización para este tipo de boquillas sea homogéneo.

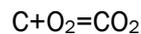
⁹⁰ Danfoss, "Practical tips Oil nozzles" burner.danfoss.com, 2010.

4.3 ESTEQUIOMETRÍA

La aplicación del principio de conservación de la masa a los componentes de las reacciones químicas se denomina estequiometría.

El ajuste de las ecuaciones permite determinar las cantidades de reactivos y de productos que participan en la reacción. En la reacción de combustión, permite, conocida la composición del combustible y la composición del aire comburente, determinar en el caso ideal, combustión completa, las cantidades de productos generados.

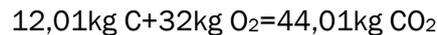
La ecuación de la combustión del carbono es:



El balance de materia de dicha reacción será:



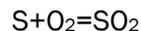
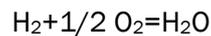
Sustituyendo los valores de sus masas molares:



Por cada kg de carbono que se quema:



Las reacciones básicas de la combustión son a parte de la combustión del carbono:



En las que el balance de masas será:



4.3.1 Determinación del aire de combustión

Para determinar la cantidad de oxígeno necesaria para la combustión completa de un combustible se suman las cantidades necesarias para cada uno de los elementos que participan y se resta la cantidad de oxígeno presente en el combustible.

Conocida la cantidad de oxígeno mínima se determina la cantidad de aire mínima, llamada también estequiométrica. Se utiliza para ello una composición estándar del aire que se incluye en la siguiente tabla 4.9.

Tabla 4.9. Composición estándar del aire.

Aire	% en volumen		% en peso	
	Real	Uso	Real	Uso
Nitrógeno	78,03	79	75,45	76,8
Oxígeno	20,99	21	23,2	23,2
Argón	0,94	0	1,3	0
CO ₂	0,030	0	0,05	0
Otros	0,001	0	despreciable	0
Peso molecular (kg/kmol) 28,967				

Utilizando el análisis elemental del combustible en tanto por uno, con la nomenclatura usual:

$$C+H+S+O+N+W+A=1$$

Determinamos que la cantidad de oxígeno mínimo será en kg de Oxígeno por kg de combustible:

$$O_{\min}=2,664 C +7,937 H +0,998 S -O$$

Y el consumo mínimo de aire seco (estequiométrico):

$$I_{\min}=\frac{O_{\min}}{0,232}$$

Para que una reacción de combustión sea completa, es decir todos los productos de la combustión están en el máximo estado de oxidación, es necesario que el aire utilizado I sea superior al estrictamente necesario, es decir al estequiométrico I_{\min} a la relación entre ambos:

$$\lambda=\frac{I}{I_{\min}}$$

Se le denomina exceso de aire, o dosado relativo. El dosado se llama al cociente entre las masas de aire y combustible, la relación entre el dosado absoluto y el estequiométrico es el dosado relativo.

La composición de los humos se resume en la tabla 4.10, dada en kg de /kg de combustible de composición elemental conocida:

Tabla 4.10: Composición de humos en kg/kg de combustible.

Componente	Se forma por combustión	En composición del combustible	Del aire introducido para la combustión
CO ₂	3,664 . C	-	-
H ₂ O	8,937 . B	W	seco
SO ₂	1,998 . S		-
O ₂	-		0,232(λ-1)l _{min}
N ₂	-	N	0,768 λl _{min}

En la tabla 4.11 se presentan las expresiones para la determinación de la masa y el volumen de aire seco y húmedo en la combustión estequiométrica:

Tabla 4.11: Aire de combustión estequiométrica.

Masa de O ₂ (M _{O2}) necesaria para la combustión por kg de combustible. (kg/kg).	$M_{O_2}=2,666 C + 8 H + S - O$
Masa de aire seco (M _{A⁰}) necesario para la combustión por kg de combustible. (kg/kg).	$M_{A^0}=11,52 C + 34,56 H + 4,32 S - 4,32 O$
Volumen de aire seco (V _{A⁰}) necesario para la combustión. (m ³ N/kg)	$V_{A^0}=8,885 C + 26,656 H + 3,332 S - 3,332 O$
Masa de aire húmedo (M _{Ax⁰}) necesario para la combustión por kg de combustible. (kg/kg).	$M_{Ax^0}= M_{A^0}+ V_{A^0}.x$ x= humedad específica del aire (kg _{agua} /m ³ _{de aire seco})
Volumen de aire húmedo (V _{Ax⁰}) necesario para la combustión. (m ³ N/kg).	$V_{Ax^0}= V_{A^0}+ 1,244 V_{A^0}. x$

4.3.2 Determinación de los productos de la combustión

Los productos de la combustión que se generan cuando no hay exceso de aire se recogen en la tabla 4.12:

Tabla 4.12: Productos de la combustión estequiométrica.

Masa total de gases secos (M_{Hs}^0) generados por kg de combustible. (kg/kg) .	$M_{Hs}^0 = 12,52 C + 26,56 H + 5,32 S + N - 3,32 O$
Volumen total de gases secos (V_{Hs}^0) generados por kg de combustible (m^3N/kg).	$V_{Hs}^0 = 8,89 C + 21,07 H + 3,33S + 0,8N - 2,63 O$
Masa total de gases húmedos (M_H^0) generados por kg de combustible (kg/kg).	$M_H^0 = M_{Hs}^0 + 9H + W + V_{A^0} \cdot x$
Volumen total de gases húmedos (V_H^0) generados por kg de combustible (m^3N/kg).	$V_H^0 = V_{Hs}^0 + 11,2 H + 1,224(W + V_{A^0} \cdot x)$

Cuando la combustión se hace con exceso de aire (λ) las masas y volúmenes de gases secos y húmedos se recogen en la tabla 4.13:

Tabla 4.13: Productos de la combustión con exceso de aire.

Masa total de gases secos (M_{Hs}^1) generados con exceso de aire por kg de combustible. (kg/kg) .	$M_{Hs}^1 = M_{Hs}^0 + M_{A^0} (\lambda - 1)$
Volumen total de gases secos (V_{Hs}^1) generados con exceso de aire por kg de combustible (m^3N/kg).	$V_{Hs}^1 = V_{Hs}^0 + V_{A^0} (\lambda - 1)$
Masa total de gases húmedos (M_H^1) generados con exceso de aire por kg de combustible (kg/kg).	$M_H^1 = M_H^0 + M_{Ax^0} (\lambda - 1)$
Volumen total de gases húmedos (V_H^1) generados con exceso de aire por kg de combustible (m^3N/kg).	$V_H^1 = V_H^0 + V_{Ax^0} (\lambda - 1)$

Conocida la composición elemental del combustible nos permite determinar los parámetros de la combustión y mediante un análisis elemental de humos estimar el coeficiente de exceso de aire.

4.4 HOJA DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN DE LAS MEZCLAS

Los analizadores de humos tienen una base de datos de los combustibles comerciales, con la que el analizador calcula los productos de la combustión al medir la concentración de oxígeno en humos. El problema aparece cuando los humos que tratamos de analizar provienen de un combustible que no está caracterizado en la base de datos del analizador y no es capaz de determinar todos los productos de la combustión.

Para la determinación de la composición de la mezcla necesitamos conocer y caracterizar a los distintos aceites que vamos a usar, esta caracterización se hace en laboratorio, las muestras de los aceites son enviadas al Laboratorio Regional de Combustibles de Castilla y León (LARECOM), los datos de los distintos análisis se adjuntan en el Anexo "1" de la tesis.

Como alternativa a los métodos experimentales para la obtención de las propiedades físico-químicas de los combustibles existen métodos estimativos que se basan en la resolución de ecuaciones teóricas como Clasius-Clapeyron, o semiempíricas como Grumberg-Nissan.

Se ha desarrollado una hoja Excel que nos permite determinar la composición elemental de la mezcla conocida la composición elemental de los componentes y el porcentaje de mezcla, al mismo tiempo usamos la hoja para la determinación de las características termoquímicas de la mezcla y para la determinación del rendimiento de la combustión.

La primera pantalla de la hoja de cálculo nos solicita las características de los combustibles que forman la mezcla y el porcentaje de mezcla, y determina: i) Las propiedades de la mezcla a estudio, ii) el caudal de aire necesario estequiométrico y iii) la composición y caudal humos estequiométricos. La figura 4.6 reproduce la mezcla al 10% de la mezcla de aceites vegetales al 33% y gasóleo al 90%.

El analizador de gases de combustión analiza los gases y determina el contenido de O_2 en los humos con lo que se puede calcular el exceso de aire o dosado relativo de la combustión:

$$(\lambda-1) = \frac{O_2}{V_A^0 \cdot 0,21}$$

A partir del conocimiento del exceso de aire nos permite determinar la masa y el volumen de humos secos por masa de combustible:

$$M_{Hs}^1 = M_{Hs}^0 + M_A^0 * (\lambda - 1) \text{ y } V_{Hs}^1 = M V_{Hs}^0 + M V_A^0 * (\lambda - 1)$$

	%
% en masa de comb.	90%
% en masa de media	90%

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL COMBUSTIBLE				
Elemento	Símbolo	Comb.	Acrite	CIÓN TOTAL DE COMB.
Carbono	C	0,86000	0,77500	0,852
Hidrógeno	H	0,1000	0,1000	0,10
Azufre	S	0,00800	0,1000	0,008
Nitrógeno	N	0,00000	0,00000	0,000
Oxígeno	O	0,00000	0,00000	0,000
Agua	H ₂ O	0,00000	0,00000	0,000
Cenizas		0,00000	0,00000	0,000
		1,000	1,000	1,000

REACTIVOS (combustión estequiométrica)		
Masa de O ₂ necesaria	M _{o2}	3,1794
Volumen de O ₂ necesario	V _{o2}	2,2256
Masa de aire atmosférico seco neces	M _{a*}	13,7042
Volumen de aire atmosférico seco neces	V _{a*}	10,5378
Masa de aire atmosférico húmedo neces	M _{as*}	13,7044(07)
Volumen de aire húmedo necesario	V _{as*}	10,5378888

GASES GENERADOS EN LA COMBUSTIÓN (combustión completa)		
Masa de CO ₂ formada	M _{co2}	3,1222
Volumen de CO ₂ formado	V _{co2}	1,5995
Masa de H ₂ O formada	M _{h2o}	TAELA
Volumen de H ₂ O formado	V _{h2o}	TAELA
Masa de SO ₂ formada	M _{so2}	0,0266
Volumen de SO ₂ formado	V _{so2}	0,028
Masa de N ₂ formada	M _{n2}	0,0090
Volumen de N ₂ formado	V _{n2}	0,0072

PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN (reacción estequiométrica)		
Masa total de gases secos producidos	M _{gs*}	13,6308
Volumen total de gases secos producidos	V _{gs*}	9,8631
Masa total de gases húmedos producidos	M _{gh*}	14,7035
Volumen total de gases húmedos producidos	V _{gh*}	10,2408

PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN (con exceso de aire)		
Masa total de gases secos producidos	M _{gs*}	TAELA
Volumen total de gases secos producidos	V _{gs*}	TAELA
Masa total de gases húmedos producidos	M _{gh*}	TAELA
Volumen total de gases húmedos producidos	V _{gh*}	TAELA

Figura 4.6: Pantalla para la introducción de datos del combustible a estudio.

4.4.1 Propiedades termoquímicas.

Para la determinación de la energía liberada en el proceso de combustión se aplican las leyes de Lavoassiare -Laplace y la de Hess que son consecuencia del primer principio de la termodinámica.

La ley de Lavoassiare y Laplace dice que: “el cambio energético que acompaña a una reacción química es de magnitud exactamente igual pero de signo opuesto al que va asociado a la misma reacción cuando se realiza en sentido opuesto”

Y la ley de Hess que “el cambio energético que acompaña a una reacción química a P o V constante, es independiente de si la reacción se produce en una o en varias etapas”.

Para el cálculo de la energía liberada en una combustión consideramos que el aire y el combustible, entran en la cámara de combustión en condiciones de presión y temperatura determinadas, los productos de la combustión, supuesta completa y con exceso de aire, abandonan la cámara la misma presión pero a temperatura distinta, suponiendo despreciable las variaciones de energía cinética y potencial para un sistema abierto el balance de energía es:

$$Q_n = \sum H_{\text{productos}}(t_2, p) - \sum H_{\text{reactivos}}(t_1, p)$$

La variación de entalpía es igual al calor de reacción a presión constante y se puede determinar partiendo de valores tabulados de otras reacciones.

Los combustibles son una mezcla de sustancias, en el que el análisis químico de las sustancias que componen los reactivos no es conocido, por lo que la variación de entalpía se determina experimentalmente mediante un equipo llamado calorímetro⁹¹.

El poder calorífico de un combustible, es la energía por unidad de masa del combustible que se libera cuando éste se somete al proceso de combustión y los productos obtenidos llegan a su estado final de oxidación, estando los reactivos y los productos a la temperatura y presión de referencia estándar y se expresa por unidad de masa de combustible quemado en kJ/kg, en un combustible se distingue dos poderes caloríficos:⁹²

⁹¹Caselles M.J., Gómez M.R., Molero M. y Sardá J., 2004. “Química aplicada a la ingeniería. Capítulo 6. Termodinámica química”, UNED. pp 231-245, 2004.

⁹²Norma UNE 9205:1987. Cálculos relativos a la combustión. AENOR, octubre 1987.

- Poder calorífico superior (P.C.S.). Es la cantidad total de calor de un combustible, incluyendo el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno contenido en dicho combustible.
- Poder calorífico inferior (P.C.I.). Es la cantidad de calor que resulta al restar del poder calorífico superior el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno contenido en el combustible.

4.4.2 Poder calorífico de las muestras.

Conocidos los valores del P.C.I y del P.C.E. por métodos experimentales, dadas las grandes diferencias que se pueden presentar en la composición de los aceites naturales por la variedad de semilla, método de cultivo, y de la edafología, se procede a determinar los valores de las mezclas en función de la distinta composición de la mezcla. Para el PCI.:

$$PCI_{\text{combustible(mezcla)}} = PCI_{\text{aceite}} * (\% \text{ aceite}) + PCI_{\text{gasóleo}} * (\% \text{ gasóleo})$$

Los valores experimentales se determinan en el Laboratorio Regional de Combustibles de Castilla y León (LARECOM). El método experimental que se aplica sigue las especificaciones técnicas recogidas en la Norma internacional ASTM D-240⁹³.

4.4.3 Rendimiento de la combustión

El rendimiento de la combustión viene dado por la relación entre el calor útil de la combustión y el calor nominal del combustible. El rendimiento representaría la cantidad de calor que obtenemos, frente a la máxima cantidad que podríamos obtener si no hubiese pérdidas.

Los métodos para la determinación del rendimiento son el método directo y el indirecto.

En el método directo, evaluamos el calor útil suministrado por la combustión, como sería la cantidad de calor entregada al fluido caloportador, por cantidad de combustible consumida, es necesario conocer los balances de masa de los fluidos que participan referidos a la masa de combustible, para el cálculo el rendimiento por el método indirecto es necesario estimar las pérdidas. En ambos casos la expresión del rendimiento viene dada por:

⁹³ Norma ASTM-240 .Procedimientos, equipos y correcciones termoquímicas para el calor de combustión. Abril de 2002

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_n} = \frac{Q_n - \sum \text{Pérdidas}}{Q_n}$$

En la que Q_u es el calor útil de la combustión en kJ/kg y Q_n es el calor nominal del combustible en kJ/kg.

Las pérdidas de calor provienen de varias causas:

- **Pérdidas por humos.** Los gases evacuados lo hacen a alta temperatura. (P_s)
- **Pérdidas por inquemados.** Parte del material combustible no llega a oxidarse por completo por lo que no llega a generarse una parte del calor. (P_i)

Podemos expresar el rendimiento de la combustión como:

$$\eta = \frac{\text{P.C.I.} - P_s - P_i}{\text{P.C.I.}}$$

Las pérdidas por humos (P_s) corresponden al calor que se ha utilizado para calentar los humos hasta la temperatura a la que abandonan la chimenea. Por debajo de dicha temperatura o no es posible aprovechar ese calor por baja temperatura o no interesa por condensación de ciertos productos. Estas pérdidas aumentan al aumentar la temperatura y al aumentar la cantidad de gases por lo que un mayor exceso de aire aumenta las pérdidas por humos.

Las pérdidas por humos se calculan en función de la energía interna de los humos respecto a la temperatura de entrada de los productos de la combustión, expresado en tanto por ciento:

$$P_s = \frac{M_H^1 \cdot C_{p_H} \cdot (T_H - T_{ref})}{\text{P.C.I.}} \cdot 100$$

En la que M_H^1 es la masa de humos húmedos no estequiométricos por kg de combustible $\text{kg}/\text{kg}_{\text{comb}}$. C_{p_H} es el calor específico de los humos en $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$, que se determina de acuerdo con la norma UNE 9205:1987⁹⁴. T_H , temperatura de los humos a la salida en ($^\circ\text{C}$) y T_{ref} , temperatura de referencia o de entrada de los productos a la combustión en ($^\circ\text{C}$).

⁹⁴ Norma UNE 9205: 1987 .Cálculos relativos a la combustión. AENOR. Octubre de 1.987

El calor específico C_{pH} de los humos se calculan, a partir del calor específico de cada componente que aparece en los humos, multiplicado por su porcentaje en tanto por uno en los humos.

Las pérdidas por inquemados corresponden a la energía química de los productos de la combustión que no ha sido liberado, por no haber sufrido la oxidación total. Se presentan en los casos de combustión incompleta, siendo más altas las pérdidas cuanto mayor sean la cantidad de inquemados. En el caso de la oxidación parcial del carbono, el producto que caracteriza las pérdidas por inquemados es la concentración de CO en los humos que se determina por:

$$P_i = \frac{V_{Hs}^1 \cdot (CO) \cdot \rho_{CO} \cdot PCI_{CO}}{100 \cdot PCI}$$

En la que V_{Hs}^1 es el volumen de los humos secos en m^3N/kg , (CO) es el porcentaje de CO en los humos de combustión, ρ_{CO} es la densidad del CO en condiciones normales en kg/m^3N y PCI_{CO} es el poder calorífico inferior del CO en kJ/kg .

Con los datos de temperatura de entrada del aire y el combustible, la temperatura de salida de los humos, el porcentaje de CO aplicados a las ecuaciones estequiométricas de la mezcla se determina mediante la hoja Excel el rendimiento de la combustión. La figura 4.7, muestra los resultados para un caso de estudio.

		30% DE MEZCLA (50,60 g de mezcla / 536,40 g de gasóleo C / 546,00 g de mezcla)									
Presión atmosférica	bar	30,0	30,0	30,0	32,0	32,0	32,0	34,0	34,0	34,0	
Posible aire		1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	
Exceso Aire		5,16	5,27	5,27	5,13	2,85	2,85	2,85	2,81	2,81	
CO ₂	%	5,05	4,91	4,91	5,12	5,87	5,75	5,43	5,70	5,71	
Pbr por clausura	%	17,494	15,475	15,245	15,812	14,711	14,475	14,245	14,575	14,545	
Pbr por inquemados	%	10,234	10,274	1,201	12,811	6,411	6,411	10,307	10,411	11,711	
CO ₂ máx	%	16,0499	16,0499	16,0499	16,0499	16,0499	16,0499	16,0499	16,0499	16,0499	
REN	%	11,241	14,411	11,241	11,241	11,241	11,241	11,241	11,241	11,241	

		AGUA GENERADA EN LA COMBUSTIÓN (combustión completa)									
M _{H2O}	(kg de agua/kg de comb.)	1,0116	1,0116	1,0116	1,0116	1,0116	1,0116	1,0116	1,0116	1,0116	
V _{H2O}	(Nm ³ de vapor de agua/kg de comb.)	1,2586	1,2586	1,2586	1,2586	1,2587	1,2587	1,2586	1,2586	1,2587	

		BASES GENERADAS EN LA COMBUSTIÓN (sin exceso de aire)									
M _{gas}	(kg de gases secos/kg de comb.)	43,2647	44,8151	44,7454	42,8413	38,7733	38,3601	40,4648	38,5658	38,5142	
V _{gas}	(Nm ³ de gases secos/kg de comb.)	32,8522	34,0512	33,9973	32,6024	29,3792	29,0565	30,8670	29,2184	29,1784	
M _{gas}	(kg de gases húmedos/kg de comb.)	44,2763	45,8267	45,7570	43,8533	39,7853	39,3715	41,4764	39,5772	39,5256	
V _{gas}	(Nm ³ de gases húmedos/kg de comb.)	34,1100	35,3689	35,2992	33,8602	30,6502	30,3275	32,1381	30,4781	30,4381	
		0,7044	0,0776	0,0572	1,1825	0,6364	0,15562	1,21552	0,73312	0,69044	

Pantalla 4.7: Pantalla donde se presenta los resultados de rendimiento de combustión.

4.5 EMISIONES DE GASES DE COMBUSTIÓN

En el campo medioambiental se define las instalaciones de combustión como aquellas que queman cualquier tipo de combustible para la producción de electricidad, energía mecánica, fluido térmico (vapor, aceite, agua caliente), independientemente de su finalidad. Por lo tanto se deben incluir en la definición dispositivos para la generación eléctrica, cogeneradores, calderas, turbinas y motores.

La potencia térmica generada a considerar variará de 2 a 50 MWt, de modo que las grandes instalaciones de combustión, deberán cumplir la siguiente normativa:

- Real Decreto 646/1991, de 22 de abril, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación a las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminante procedentes de grandes instalaciones de combustión (BOE Num. 99, de 25 de abril de 1991). Aplicable hasta el 1 de enero de 2008, para nuevas instalaciones autorizadas antes de la entrada en vigor del Real Decreto 430/2004 de GICs.
- Orden de 26 de diciembre de 1995, para el desarrollo del Real Decreto 646/1991, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de grandes instalaciones de combustión en determinados aspectos referentes a centrales termoeléctricas.
- Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo.
- En el caso de que la instalación fuera de calefacción, climatización o agua caliente sanitaria es necesario tener en cuenta lo dispuesto en el CTE HE-2 Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITE).
- Para el caso del límite de emisiones de dioxinas y furanos en la quema de grasas animales se deberá tener en cuenta el Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre la incineración de residuos hasta el 4 de marzo de 2011 de acuerdo con el Reglamento (CE) Num. 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009, por el que se establecen las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano y por el que

se deroga el Reglamento (CE) Num. 1774/2002 sobre subproductos animales.

El límite de emisiones contaminantes a la atmósfera de una instalación de combustión dependerá por tanto, de la potencia térmica suministrada por la misma. La normativa nos proporciona los valores límite para instalaciones con una potencia térmica que varía de 2 MWt a 50 MWt por lo que para instalaciones con una potencia inferior a la mínima el límite de emisión a cumplir es el mínimo requerido, es decir, para la potencia térmica de 2 MWt. Asimismo, también dependerá del combustible de partida que se esté introduciendo en el proceso, ya sea en forma líquida, sólida o gaseosa.

Por consiguiente, para una instalación de baja potencia térmica (inferior a la mínima de la normativa) operando con un combustible líquido, los límites atmosféricos de los contaminantes se recogen en la Tabla 4.14:

Tabla 4.14: Límites de contaminantes emitidos a la atmósfera en combustión.

Compuesto	Límite
Óxidos de azufre	4300 mg/nm ³ (fuel pesado)
	2000 mg/nm ³ (fuel BIA)
	700 mg/nm ³ (gasóleo)
CO	350 mg/nm ³
Opacidad (Bacharach)	2

4.5.1 Gases de efecto invernadero.

Los gases de efecto invernadero son aquellos gases que permiten que la radiación solar penetre hasta la superficie terrestre, atrapando la radiación infrarroja ascendente emitida por la Tierra, que de otro modo escaparía al espacio.

Su concentración atmosférica es baja, pero tienen una importancia fundamental en el aumento de la temperatura del aire próximo al suelo, es por ello, que se debe evitar en la medida de lo posible su emisión.

Los principales gases de efecto invernadero se enumeran a continuación: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

En lo que concierne a esta tesis, el gas de efecto invernadero que se debería tener en cuenta es el dióxido de carbono (CO_2) puesto que el combustible que sería introducido en el quemador es una mezcla de gasóleo y un biocombustible, con una relación de hasta el 40 % del mismo. Esto permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de origen fósil al ser sustituidos por gases de efecto invernadero de origen renovable.

Los valores de los GEI como Óxidos de azufre están limitados por el contenido máximo de azufre del gasóleo, como se recoge en la Tabla 4.14.

4.5.2 Óxidos de nitrógeno.

Por NO_x se designa de forma genérica a los óxidos de nitrógeno, NO y NO_2 . En los sistemas de combustión se forma principalmente NO (su cinética química es dominante frente a la del NO_2). En general, durante el proceso de combustión, se reconocen cuatro mecanismos químicos responsables de la formación de NO_x ⁹⁵:

- Mecanismo térmico: descrito por Zeldovich, es el mecanismo dominante para altas temperaturas. La ruta cinética de formación se inicia con la disociación de las moléculas de oxígeno (O_2), que posteriormente reaccionan con las moléculas de nitrógeno, empezando así una reacción en cadena. Se puede decir, que el mecanismo térmico deja de ser importante a temperaturas inferiores a 1800 K.
- Mecanismo súbito: descrito por Fenimore, es el mecanismo que se da en frentes de llama (con alta concentración de carbón, hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados) se produce una rápida formación de NO antes del mecanismo térmico, radica en el hecho de que radicales de hidrocarburos reaccionan con el nitrógeno molecular para formar aminas y compuestos CN o HCN , que se convierten finalmente en NO . Este mecanismo está muy relacionado con la relación aire-combustible, siendo despreciables para reacciones con exceso de aire.
- Mecanismo vía N_2O : este mecanismo es importante en mezclas con defecto de aire (inferiores a 0,8) para bajas temperaturas y elevadas presiones, es típica de combustiones con fines mecánicos como la turbina de gas.
- Mecanismo vía combustible: La formación del NO ocurre al reaccionar directamente el nitrógeno del combustible con el oxígeno del aire y depende de la cantidad de nitrógeno que tienen los

⁹⁵ Schwerdt C., "Modelling NO_x -formation in combustion processes", ISSN 0280-5316, Department of Automatic Control, Lund University, Junio 2006.

combustibles utilizados, en los grasas no hay cantidades significativas de nitrógeno.

4.5.3 Monóxido de carbono.

La formación de CO es un paso intermedio fundamental en la oxidación de un hidrocarburo y está íntimamente ligado con índice de exceso de aire. Los mecanismos de formación de CO son:

- El CO es una de las especies contaminantes más importantes en procesos de combustión con defecto de aire (esto ocurre en motores que utilizan combustibles muy heterogéneos). También cabe destacar la gran contribución del quemado de biomasa.
- Disociación de las moléculas de CO_2 , teniendo ésta lugar a temperaturas elevadas (aproximadamente a partir de 2000 K) que son las temperaturas locales típicas que se alcanzan en los procesos de combustión. La cantidad de CO generada por un equipo de combustión depende del balance entre proceso de formación (reacciones rápidas) y oxidación del mismo (reacciones lentas), siendo ambos muy activos a temperatura elevada. Por tanto, en procesos donde los tiempos de residencia son del orden de segundos, las reacciones del CO alcanzarían el equilibrio y la cantidad de CO en los humos es prácticamente nula.
- Es el apagado de llama en la pared debido a las bajas temperaturas.

En el proceso de difusión utilizado en los ensayos de combustión de esta tesis puede formarse CO, por dos motivos: haber zonas con defecto de aire en el frente de llama o zonas con una mala mezcla de combustible y comburente, (Problemas de pulverización y del proceso de mezcla).

4.5.4 Óxidos de azufre.

En los procesos de combustión, todo el azufre contenido en el combustible aparece en forma de SO_2 o SO_3 en los productos de la combustión, la combinación de ambos suele notarse por SO_x . Los resultados de emisiones de SO_x , en esta tesis no son considerados al contener concentraciones en tanto por uno prácticamente despreciables.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 4

- 79) Spalding D. Brian, Combustión y transferencia de masa, CECSA 1.979
- 80) Méndez C., “Modelado numérico de un chorro atomizado no estacionario”, tesis doctoral, Universidad de Valladolid 2003.
- 81) Ruiz, F. y Chigier, N.A., Parametric experiments on liquid jet atomization spray angle, *Atomization and Sprays*, 1, 23-45, 1991.
- 82) Dumouchel C. Ledoux M. Bhor M.I.G. ,The design of pressure swirl atomizers, ASME International Gas Turbine Aeroengine Congress Exhibition 43 rd Stockholm Sweden (1998)
- 83) Yule A.J. Chinn J.J., The internal flow and exit conditions of pressure swirl atomizers, *Atomization and Sprays*, vol.10, no. 2, pp.121-146, 2000.
- 84) Edmund Giffen, A. Muraszew, The atomisation of liquid fuels, Chapman & Hall, 1953.
- 85) Hay N. y Jones PL "Comparison of the various correlations for spray penetration". SAE, Paper 720776 1982.
- 86) Rizk, N. K. and Lefebvre, A. H., Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers. *Journal of Propulsion and Power*, 1, 193-199. 1985.
- 87) Ramamurthi K. Tharakan T.J. , Atomization characteristics of swirled annular liquid sheets, *AIP Physcs of Fluids*, 1997.
- 88) Lefebvre A.H. *Atomization and Spray*. Hemisphere Pub.Corp., 1989.
- 89) Rayleigh Lord, on the instability of yet, *Proc. London Math. Soc.* (1878)
- 90) Danfoss, “Practical tips Oil nozzles” burner.danfoss.com, 2010.
- 91) Caselles M.J., Gómez M.R., Molero M. y Sardá J., 2004. “Química aplicada a la ingeniería. Capítulo 6. Termodinámica química”, UNED. pp 231-245, 2004.
- 92) Norma UNE 9205:1987. Cálculos relativos a la combustión. AENOR, octubre 1987.
- 93) Norma ASTM-240 .Procedimientos, equipos y correcciones termoquímicas para el calor de combustión. Abril de 2002
- 94) Norma UNE 9205: 1987 .Cálculos relativos a la combustión. AENOR. Octubre de 1.987
- 95) Schwerdt C., “Modelling NOx-formation in combustion processes”, ISSN 0280-5316, Department of Automatic Control, Lund University, Junio 2006.

CAPITULO 5 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUCCIÓN.

El presente capítulo hace una descripción detallada de la instalación experimental utilizada en la combustión de las diferentes mezclas objeto de la presente tesis. Los elementos y equipos que componen la instalación experimental son elementos comerciales, que conforman una instalación convencional con pequeñas modificaciones, que permite reproducir diferentes situaciones reales de funcionamiento del equipo de combustión y al mismo tiempo caracterizar energéticamente la combustión y las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes.

En este capítulo también se describe el procedimiento que se ha seguido en los ensayos experimentales y las condiciones de funcionamiento de la instalación para que los resultados de los ensayos puedan ser admitidos como válidos.

5.2 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.

La combustión de las mezclas que se han experimentado en esta tesis se han realizado en una instalación situada en el Laboratorio de Calor y Frío

Industrial de la Escuela de Ingenierías Industriales, sede Pº del Cauce, de la Universidad de Valladolid.

La instalación experimental está compuesta por:

- Sistema de alimentación de combustible. El sistema permite la alimentación de gasóleo o mezcla de forma alternativa. El depósito de mezcla está acondicionado como baño termostático para aumentar la temperatura y dispone de un agitador para asegurar la homogeneidad de la mezcla que llega al quemador. El retorno de la bomba de inyección no llega al depósito de mezclas para evitar contaminación de las mezclas.
- Conjunto quemador-caldera formado por una caldera modular de hierro fundido con hogar en sobrepresión y un quemador de gasóleo de pulverización mecánica por presión.
- Disipador de calor formado por una red bitubular con elementos de disipación a base de dos aerotermos, que permiten disipar el calor generado, tienen la característica de tener poca inercia de funcionamiento.
- Sistema de control y medida para mantener las condiciones de funcionamiento de la instalación y poder registrar los datos de la combustión.

Esquemáticamente la instalación experimental se representa en la siguiente figura 5.1:

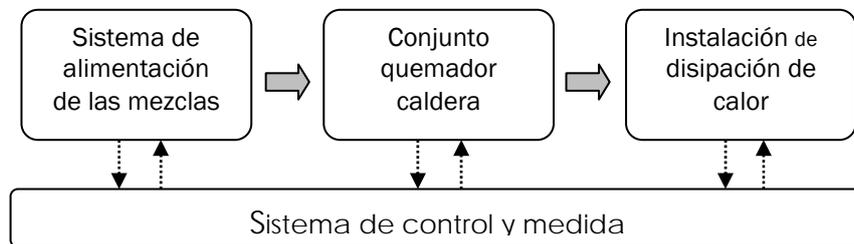


Figura 5.1 Esquema de la instalación experimental

5.2.1 Sistema de alimentación de la mezcla.

El sistema de alimentación está construido de forma que permita el uso de gasóleo puro y de mezcla, de forma alternativa. Tanto el arranque como la parada se realizan con gasóleo puro, evitando que en los conductos, bomba y caña del quemador, queden restos de mezcla. Una vez que se alcanzan los valores prefijados, que indican que la instalación está a régimen, se cambia de combustible para realizar el ensayo correspondiente.

La temperatura de las mezclas para los ensayos se mantienen a temperatura ambiente al no presentar problemas de enturbiamiento este tipo de aceites, aunque es posible incrementar la temperatura por encima de la temperatura ambiente, con el sistema de calorifugado del depósitos de mezclas. El depósito de mezcla dispone de agitador para mantener la homogeneidad de dichas mezclas

El sistema cuenta con dos depósitos, uno de gasóleo, que cumple con las especificaciones generales de los depósitos de combustibles derivados del petróleo⁹⁶, y el otro depósito para la muestra de ensayo cuenta con calorifugado y un sistema de agitación. Ambos depósitos permiten la conexión alternativa mediante válvulas que impidan la mezcla de ambos combustibles. En la siguiente figura 5.2, puede verse un esquema del conjunto del sistema de alimentación de combustible:

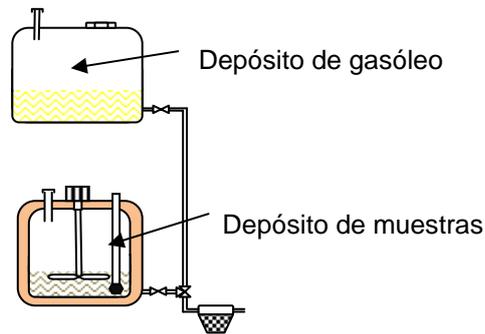


Figura 5.2 Esquema de la alimentación de combustible a la instalación.

Ambos depósitos cuentan con sensor para medida de temperatura. El depósitos de muestras es un depósito encamisado que dispone de un agitador eléctrico y un baño termostático de agua mantienen la temperatura y la homogeneidad de la muestra. En la figura 5.3, puede verse ambos sistemas:

⁹⁶ ITC-MI-IP-03: Instalaciones petrolíferas para uso propio, instalaciones de almacenamiento para su consumo en la propia instalación, 1999

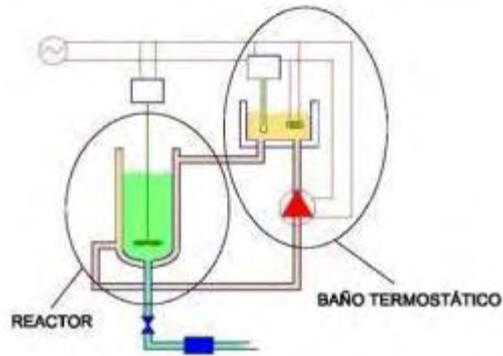


Figura 5.3 Alimentación de combustible a la instalación.

Las características del regulador de temperatura y de la bomba de circulación se recogen en las Tablas 5.1 y 5.2 respectivamente.

Tabla 5.1: Datos técnicos del regulador de temperatura AKO-14123.

Rango de temperatura	-50,0 °C a 99,9 °C
Resolución y ajuste	0,1 °C
Precisión	1 °C
Tolerancia de la sonda a 25 °C	± 0,4 °C
Temperatura ambiente de trabajo	5 °C a 50 °C
Potencia máxima absorbida	3 VA

El agua se mueve mediante una bomba de la casa MAXI-JET modelo MJ500, cuyas características se recogen en la tabla 5.2:

Tabla 5.2: Datos de la bomba de circulación del agua:

Potencia absorbida (W)	Caudal máximo (l/h)	Altura máxima (m)
7,5	490	0,93

5.2.2 Conjunto quemador-caldera.

El conjunto caldera-quemador es un equipo preparado para la combustión controlada y optimizada para un combustible concreto y para una cierta escala de potencia nominal, según el atomizador, la presión de atomización y la cantidad de aire que aportamos. Las operaciones que realiza la caldera se complementan con la cesión de la máxima cantidad de calor al circuito de disipación (aprovechamiento) y la expulsión de los productos de combustión a la atmósfera.

En el caso de combustibles líquidos, en el capítulo VI se desarrollo la necesidad de pulverizar y evaporar el combustible para poder obtener una buena combustión, los combustibles líquidos se queman en estado gaseoso, en la siguiente tabla 5.3 vemos los distintos quemadores en función de sus características fundamentales.

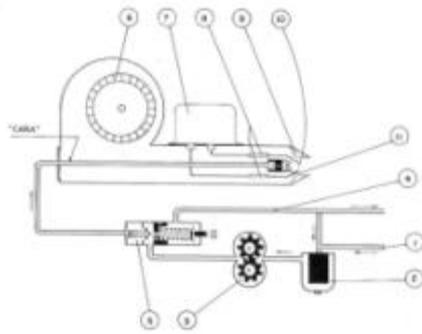
En la tabla 5.3 se incluye la energía auxiliar consumida en el proceso de atomización de cada uno de los sistemas y los tipos de combustible que se pueden quemar en función de la viscosidad del mismo.

El quemador que se ha utilizado en la presente tesis es un quemador de pulverización mecánica por presión directa. En este tipo de quemador el combustible a alta presión es obligado a pasar por un orificio apropiado produciendo la ruptura de su tensión superficial y obteniendo un cono completamente pulverizado. El esquema de este tipo de quemador y sus partes principales se incluyen en la figura 5.4:

Tabla 5.3: Quemadores para combustibles líquidos y sus características⁹⁷

Tipo de quemador	Principio	Presión del combustible en boquilla (atm)	Viscosidad máxima en boquilla (°E)	Campo de regulación	Consumo fluido auxiliar (kgfa/kgc)	Presión fluido auxiliar (atm)	Potencia requerida por kg de combustible (kWh/kg)	
Vaporización	Térmico	0	1,5	No	No	No	>>0,05	
Pulverización	Presión directa	14 - 20		1:1,2			0,05	
	Presión retorno	Inyección a presión 20 - 30	2-3	1:3	No	No	>0,05	
	Fluido auxiliar	Vapor a alta presión.	0,5 - 12	5 - 8	1:6	0,1 - 0,15 ⁽¹⁾ 0,2 - 0,3 ⁽²⁾	0,5 - 10	0,1 - 0,15
		Presión directa f. auxiliar.	20	2 - 3	1:10	0,03 ⁽³⁾ 0,06 ⁽⁴⁾	Aire 1,5 a 6 Vapor 3 a 10	0,07
		Aire alta presión.	0,7 - 7	3 - 8	1:5	0,3	1,5 - 8	0,1 - 0,15
		Aire a media presión.	0,1 - 1,5	2 - 8	1:5	0,4 - 0,5	0,5 - 1,5	0,08 - 0,1
		Aire a baja presión.	0,1 - 0,5	2 - 8	1:5	15 a 30% del aire de comb	0,5 - 1	0,08 - 0,15
Copa rotativa	Fuerza centrífuga	0	3-8	1:4	10 a 15% del aire de comb	0,25 a 0,3	0,07	

⁹⁷ M.LapuertaM. Hernandez J.J. Tecnologías de la combustión. Ediciones de la Universidad Castilla-La Mancha, 1998.



- Bomba y circuito de combustible.
- 1 Alimentación de combustible
 - 2 Filtro
 - 3 Bomba
 - 4 Retorno
 - 5 Regulador de presión
 - 11 Boquilla de pulverización
- Ventilador y circuito de aire.
- 6 Ventilador
 - 9 Distribución de aire
- Cabeza de combustión.
- 10 Cabeza de combustión
- Circuito de encendido.
- 7 Transformador
 - 8 Electrodo de encendido

Figura 5.4: Esquema de quemador de pulverización mecánica por presión.

El quemador utilizado es un quemador comercial de la casa SANTA´ANDREA modelo OI, en que puede regularse la presión de inyección y el caudal de aire. Las características del quemador se recogen en la siguiente tabla 5.4:

Tabla 5.4: Características del quemador empleado den el ensayo.

Quemador SANT´ANDREA modelo OI		
Angulo	Regulación presión de inyección (bar)	Regulación del caudal de aire (m ³ /h)
60°	8-16	2,5 - 6,3

Respecto a la boquilla o atomizador empleado se trata de una boquilla Danfoss cuyas características se incluyen en la tabla 5.5:

Tabla 5.5: Características de la boquilla empleada en el ensayo⁹⁸.

Boquilla Danfoss	
Tipo	LN
Código	030H6408
Capacidad	0.5 USgal/h
Capacidad USgal/h	7 bar, 3.4 cSt, 820 kg/m ³
Capacidad	1.65 kg/h
Capacidad kg/h	10 bar, 2.0 cSt, 820 kg/m ³
Ángulo pulverización	60 °
Pulverización	N (semi hueco especial)
LE	Non
Forma	cónica
Peso	0.03 kilo



Para la regulación del aire de entrada, el quemador dispone de un sistema de regulación de aire mediante una clapeta que incrementa la pérdida de carga, tiene varias posiciones que permiten ajustar el aire que entra a la cámara de combustión.

Se ha caracterizado la relación caudal/posición del mecanismo mediante una tobera marca TECNER INGENIERÍA, tobera abierta serie TG-30 y el equipo multifunción KIMO AMI 300 que permite determinar presión diferencial. En la figura 5.5 se observa el montaje para caracterizar el ventilador centrífugo del quemador.

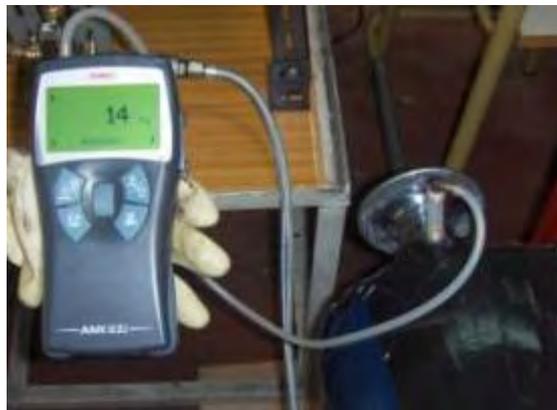


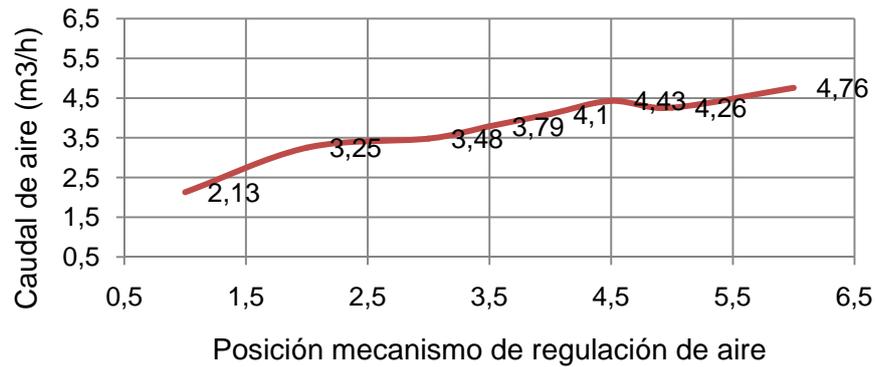
Figura 5.5: Medida del caudal de aire del ventilador en función de la posición del mecanismo de regulación de aire..

⁹⁸ Danfoss Burner Components, Facts worth knowing about Oil nozzles, ref. 520F0019 - DKBG.PG.060.A8.02, 2009.

La ecuación caudal-pérdida de carga en la tobera es:

$$G_V = 0,000265 * \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho}}$$

En la que G_V representa el gasto volumétrico en m^3/s , ΔP es la pérdida de presión en Pascales y ρ la densidad del aire en kg/m^3 ⁹⁹. Las medidas se realizaron con la instalación a régimen con una presión de inyección de combustible de 16 bar y un tiro en la chimenea entre 0,22 y 0,24 mbar, los resultados se representan en la gráfica siguiente:



Gráfica 5.1: Caudal de aire en función de la posición mecanismo de regulación (P=16Bar)

Los ensayos se han realizado con distintas posiciones del mecanismo de regulación de aire. Las posiciones que se han adoptado para cada una de las presiones de inyección han sido 1,5; 2 y 2,5. Los caudales que corresponden se extraen de la gráfica anterior y corresponden a los datos siguientes:

Tabla 5.6: posición del mecanismo de regulación y caudal de aire al quemador. Coincide con otros capítulos

Posición	1,5	2	2,5
Caudal (m³/h)	2,70	3,25	3,4

Las pruebas a realizar para cada muestra corresponden a tres presiones de inyección (

⁹⁹ TECNER Ingeniería. Toberas serie TG, Madrid 1999

10, 12 y 14 bar) y tres posiciones de aire para cada una de ellas (1,5, 2 y 2,5).

Los caudales de aire para cada una de las presiones se indican en la tabla 5.7

Tabla 5.7: Caudales de aire en m³/h

POSICIÓN MANETA	PRESIÓN		
	10bar	12bar	14bar
1,5	2,5	3,0	3,5
2,0	3,0	3,5	4,0
2,5	3,5	4,0	4,5

La caldera es de cuerpo de hierro fundido, con hogar en sobrepresión. El esquema de la caldera se recoge en la figura 5.8 y las características en la tabla 5.8.

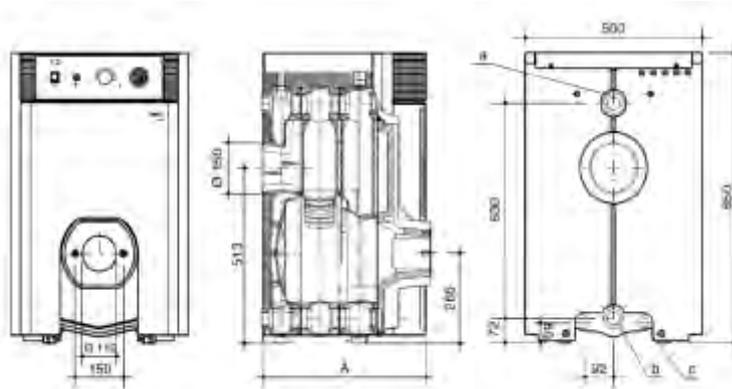


Figura 5.8: Caldera de la instalación experimental

Tabla 5.8: Características de la caldera ¹⁰⁰

Caldera modelo AR/25GT de ROCA	
Caldera tipo	Fundición
Potencia calorífica	26,7 kW
Capacidad de agua	26 litros
Peso aproximado	210 kg
Temperatura máxima de trabajo	110 °C

¹⁰⁰ ROCA Catálogo electrónico calefacción 99. Barcelona 1999

5.2.3 Instalación de disipación

La instalación de disipación de calor es una instalación bitubular de retorno directo con distintos elementos finales, para la realización de las medidas se ha escogido dos aerotermos que permiten disipar entre el 80 y 125% de la potencia nominal de la caldera y que permiten funcionar al quemador a régimen sin paradas en los ensayos cuando la caldera ha alcanzado las condiciones establecidas. El sistema de disipación posee muy poca inercia por lo que los tiempos de puesta a régimen son cortos.

El esquema de la instalación se representa en la figura siguiente:

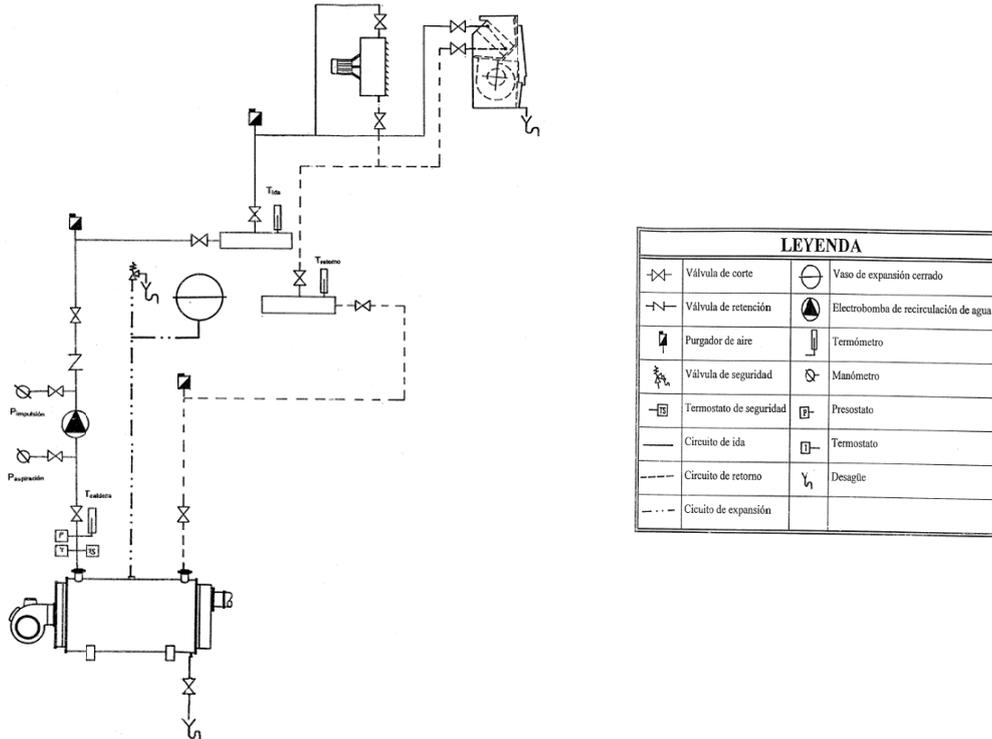


Figura 5.9: Esquema de la instalación de disipación

5.2.4 Sistema de control y medida

Las variables de control de la instalación son presiones y temperaturas de toda la instalación. Los valores que permiten mantener la instalación dentro del rango de funcionamiento estacionario se recogen en la tabla 5.9. Todos los ensayos deben realizarse en las mismas condiciones de régimen estacionario por lo que este debe ser alcanzado al comenzar cada serie de ensayos mediante el combustible convencional.

Tabla 5.9: Parámetros de control de la instalación.

Parámetro	Unidad	Error	Descripción
T _{ida}	°C	± 1	Representa la temperatura del agua en el distribuidor situado en el circuito de ida
T _{retorno}	°C	± 1	Indica la temperatura del agua en el colector del retorno, por donde circula todo el agua antes de volver a la caldera
P _{impulsión}	bar	± 0,2	Presión del agua en la impulsión en el circuito principal, justo antes del distribuidor.
P _{aspiración}	bar	± 0,2	Presión del agua en la aspiración de la bomba del agua situada antes de entrar en el distribuidor.
T _{caldera}	°C	± 1	Temperatura del agua a su paso por la caldera.
T _{amb}	°C	± 1	Temperatura ambiente.

Para el análisis de los productos de combustión se utiliza un analizador de gases de combustión, que permite medir la concentración en humos de: oxígeno, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. El analizador permite así mismo medir presión de tiro en la chimenea y temperatura de humos. Estos datos junto con los datos de características de las muestras permiten el análisis del proceso de combustión.

El analizador de gases de combustión es de la casa TESTO modelo 342-3, este equipo cuenta con sonda de oxígeno, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. En los anexos se incorpora hojas de calibración del equipo y de las sondas empleadas.

Las principales características del equipo de medición y sondas se recogen en la tabla 5.10.

Tabla 5.10: Características equipo de medida TESTO modelo 342-3.

Analizador de humos TESTO modelo 342-3	
Sonda de O ₂ electroquímica	Rango 0 % a 21 %
Sonda de CO (con compensación de H)	Rango 0 a 4.000 ppm.
Sonda de NO celda electrolítica	Rango 0 a 3.000 ppm
Sonda de temperatura (Cinco sondas)	
Termopar tipo	K
Intervalo de medida	-40° a 1.000°C ± 0,5 °C
Sonda de presión (cuatro sondas)	
Manómetros tipo	Espiral
Intervalo presión impulsión	1 a 40 bar precisión 1 %
Intervalo presión aspiración	0,2 a 1 bar precisión 1 %

5.3 METODOLOGÍA DE ENSAYO.

La primera fase es poner la instalación a régimen lo que se hace con gasóleo, encendida la instalación es necesario alcanzar la temperatura del agua de impulsión a 90°C y la de retorno a 70°C. El calor se disipa en el sistema que se ha descrito anteriormente con los dos aerotermos que se conectan en cascada y en función de las condiciones climatológicas el tiempo medio de puesta a régimen es de unos 30 minutos.

Con la instalación a régimen se ponen las condiciones de presión y caudal de aire elegidas en el quemador y una vez que se ha estabilizado se hace el cambio de combustible de gasóleo a la mezcla correspondiente. Se hace funcionar al menos 120 segundos, tiempo que se considera suficiente para que el gasóleo de la instalación sea quemado y si la instalación está estable se comienza con el proceso de medida.

El proceso de medida se realiza durante 60 segundos, que es el periodo de equilibrio de la sonda de temperatura del analizador y en ese periodo se comprueba que las concentraciones en humos son estables y no hay variaciones bruscas.

Concluida la medida se extraen los datos del analizador mediante un cable con conexión USB al ordenador, se continúan con los ensayos para distintas presiones y posiciones de entrada de aire. Finalizada la serie con una muestra se vuelve al combustible convencional para

asegurarnos de que al cambiar de mezcla no queda en la instalación rastros de la mezcla anterior. A continuación se cambia de mezcla y se prosigue el ensayo. El esquema de proceso se recoge en el diagrama de bloques de la figura 5.11.

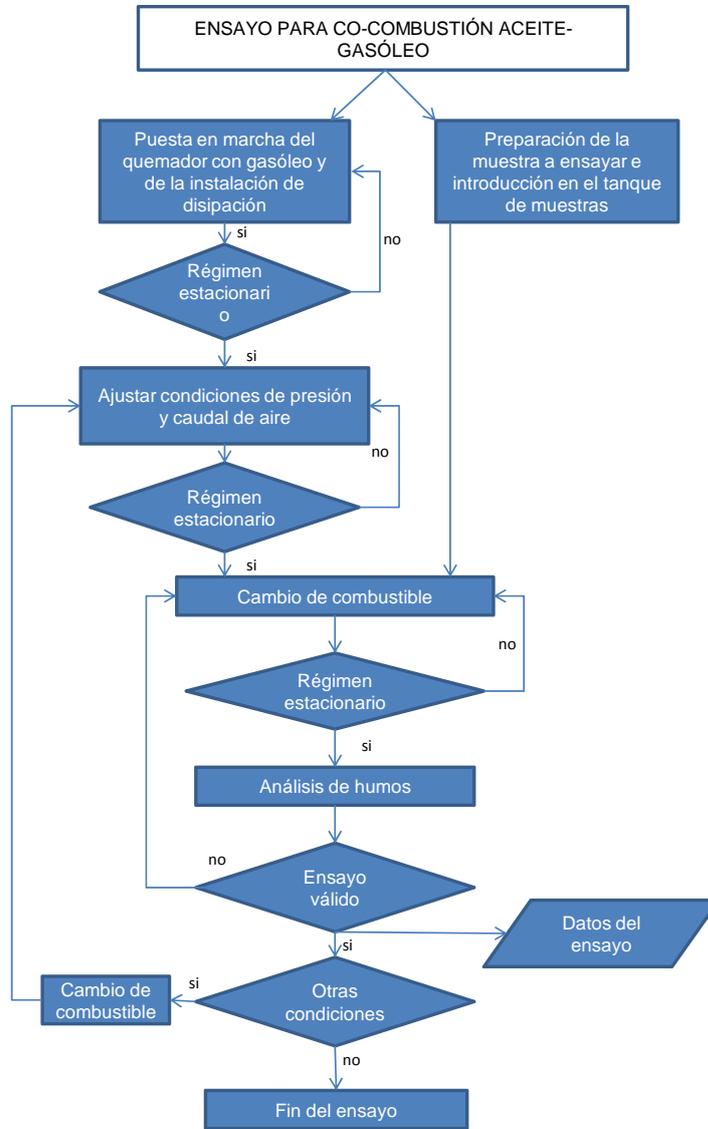


Figura 5.11: Diagrama de bloques del proceso de la metodología de ensayo.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 6

- 96) ITC-MI-IP-03: Instalaciones petrolíferas para uso propio, instalaciones de almacenamiento para su consumo en la propia instalación, 1999
- 97) M.Lapuerta M. Hernandez J.J. Tecnologías de la combustión. Ediciones de la Universidad Castilla-La Mancha, 1998.
- 98) Danfoss Burner Components, Facts worth knowing about Oil nozzles, ref. 520F0019 – DKBG.PG.060.A8.02, 2009.
- 99) TECNER Ingeniería. Toberas serie TG, Madrid 1999
- 100) ROCA Catálogo electrónico calefacción 99. Barcelona 1999

CAPITULO 6 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

6.1 INTRODUCCIÓN

El análisis experimental trata de confirmar la influencia de determinados factores en un proceso.

Cualquier determinación experimental va acompañada de un grado de incertidumbre o variabilidad que se pone de manifiesto en la variación de los resultados obtenidos cuando repetimos la prueba experimental. La herramienta estadística trata no solo de medir el grado de incertidumbre, uso inicial de la estadística, sino del análisis e interpretación de los resultados de la experimentación.

La metodología aplicada en la experimentación es fundamental a la hora de obtener resultados concluyentes con el mínimo de pruebas. La experimentación en términos generales es un proceso con costes elevados por lo que es conveniente optimizar los experimentos. Las técnicas estadísticas del DOE (Design of Experiments) va más allá del análisis e interpretación de los resultados ya que nos ayuda a la planificación de los ensayos para que el tratamiento de la información que éstos nos proporcionan sea más consistente y las conclusiones más determinantes.

En términos generales, tratamos de ver la influencia de varios factores en una o varias variables de interés, cuando modificamos deliberadamente sus valores.

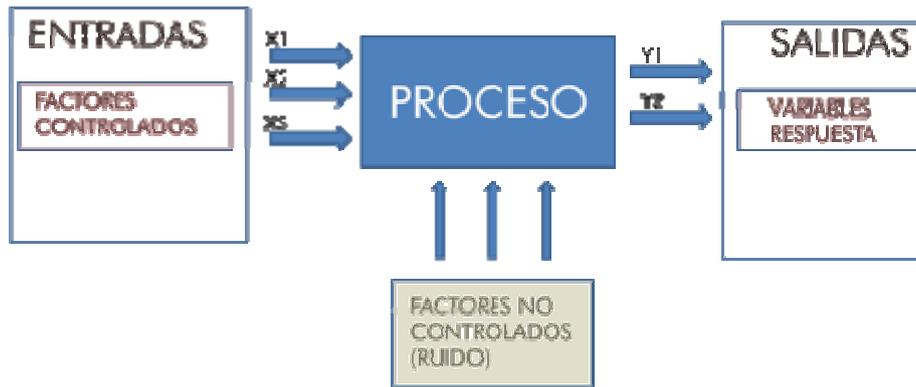


Figura 6.1 Organigrama genérico del DOE

Los objetivos de los experimentos diseñados son:

- Determinar cual son los factores que tienen mayor influencia en la variable respuesta.
- Determinar el mejor valor de los factores controlables (nivel) que proporcione el valor óptimo de la variable respuesta próximo al deseado.
- Determinar la mejor combinación de los valores de los factores controlables que proporcionen menor variabilidad en la respuesta.
- Determinar la combinación adecuada de factores controlados que ayuden a minimizar la influencia de los factores de ruido o incontrolados.

6.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

6.1 Introducción

El desarrollo de los métodos del diseño de experimentos se deben a Fisher¹⁰¹ y sus colaboradores Yates y Kenneth Mather¹⁰² que desarrollaron los principios de la experimentación científica, el análisis de

¹⁰¹ Ronald A. Fisher. The Design of Experiments 1935

¹⁰² Frank Yates and Kenneth Mather "Ronald Aylmer Fisher". Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society of London 1963.

varianza (ANOVA) y el diseño de experimentos (DOE), otros investigadores, han seguido desarrollando técnicas que mejoran y simplifican los modelos, Finney¹⁰³ que desarrolló los modelos de regresión de respuesta cualitativa, Cochran¹⁰⁴ fundamentando matemáticamente el análisis de varianza, etc.

Son muchas las contribuciones en este campo pero la aplicación a los modelos de Calidad Total en la industria ha dado un fuerte impulso a estos métodos, trabajos como el de la metodología de superficies de respuesta (RSM) de Box¹⁰⁵ y los trabajos de Taguchi¹⁰⁶ desarrollando la "metodología Taguchi" basada en el concepto de función de pérdida de calidad y la metodología del diseño robusto (MDR)¹⁰⁷ están evolucionando rápidamente y se aplican tanto en el campo de la Calidad Total en el sector industrial como en el campo científico, consiguiendo una optimización de los experimentos y un aumento en la calidad de los productos.

El desarrollo espectacular en los últimos años de estas técnicas estadísticas ha supuesto la aparición de Software informático muy desarrollado con aplicaciones gráficas y módulos específicos para distintas aplicaciones, baste señalar como ejemplos: el programa Minitab de Minitab® Statistical Software, Statgraphics-Centurión de Statgraphics.net, Inspéctor de CGG Soft, etc.

6.2 Terminología

En este apartado se resume la terminología que se emplea en los modelos de diseño de experimentos:

- **Variable respuesta:** es la variable que se desea estudiar y controlar su variabilidad. (Variable de interés o Característica).
- **Factor:** Variable independiente que puede afectar a la variabilidad de la variable de interés o respuesta.
- **Factor de control:** Factor controlable del que interesa conocer su influencia en la respuesta.

¹⁰³ D.J.Finney: El método estadístico en el ensayo biológico. Charles Griffin & Co., 1978

¹⁰⁴ William Gemmell Cochran. Técnicas de muestreo. 1953

¹⁰⁵ G.E.P.Box y M.R. Draper. Empirical Model Building and Response Surface. New York 1987

¹⁰⁶ Taguchi, Genichi. "Introduction to Quality Engineering: Designing Quality Into

Products and Processes". Asian Productivity Organization. Tokyo, 1986.

¹⁰⁷ *Robust Engineering: Learn How to Boost Quality While Reducing Costs & Time to Market*: por Taguchi, Genichi; Chowdhury, M Subir; Chowdhury 1953

- **Factor bloque:** Factor controlable del que no interesa conocer su influencia en la respuesta pero si controlarlo para disminuir la variabilidad residual. (Nuisance)
- **Factor de ruido:** Factor no controlable durante la experimentación.
- **Niveles:** Cada uno de los valores que puede tomar un factor. Pueden ser de carácter cuantitativo o cualitativo.
- **Efecto de un factor:** Cambio en la respuesta cuando se modifica un factor.
- **Interacción de factores:** cuando el efecto de un nivel de un factor varía cuando se modifica el nivel de otro factor. Puede ser generalizado a mas de dos factores dándose interacciones de orden tres o superior.
- **Nivel Óptimo:** Conjunto de niveles de los factores que proporcionan el mejor resultado sobre la variable respuesta.
- **Grado de libertad:** número de comparaciones que deben realizarse para determinar el nivel óptimo de un factor. Es el nº de niveles menos uno.
- **Ortogonalidad:** Ensayo en que cada nivel de un factor se ensaya el mismo número de veces con todos los niveles del resto de los factores. Esta condición elimina el efecto sobre la media del resto de las observaciones.

6.3 Técnicas de diseño de experimentos

Cuando tratamos de ver el efecto en la respuesta de distintos factores podemos recurrir a distintas técnicas experimentales. Las principales técnicas se presentan a continuación:

- **Variar un factor cada vez. (VUFCV).**

Es el método más tradicional y consiste en variar un solo factor manteniendo los demás constantes. Determinado el mejor nivel de ese factor se experimenta con otro factor dejando fijos el resto y así hasta variar todos los factores. Este método no permite determinar la interacción entre factores y no permite determinar el valor óptimo pudiendo dar valores muy alejados de éste.

- **Diseño factorial completo.**

En este diseño de experimento se contemplan todas las combinaciones de niveles de los distintos factores de esta forma se obtiene información sobre la interacción de los distintos factores.

El nº de experimentos que se precisan es:

$$\text{N}^\circ \text{ de experimentos} = \prod_{i=1}^{i=n} N_i$$

Donde N_i es el n° de niveles del factor i .

Las posibles interacciones entre factores vienen determinadas por el n° de combinaciones que se pueden realizar entre los factores. Solo se contemplan habitualmente las interacciones de orden 2, entre dos factores, despreciándose las interacciones de orden 3 y superior.

La valoración de la interacción entre dos factores puede verse gráficamente, si suponemos un experimento en el que probamos el Factor A a dos niveles A1; A2 y el factor B para B1 y B2, representando la variable respuesta para estos valores obtenemos:

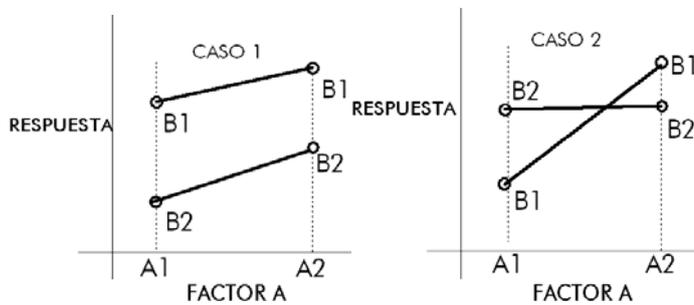


Gráfico 6.1: Posibles situaciones en los niveles de dos factores

En el Caso 1 de la anterior gráfica, la interacción de ambos factores A y B es prácticamente nula, cuanto más paralela sean las rectas menos interacción habrá entre ambas. En el Caso B en el que las rectas se cortan, la interacción es muy grande.

Al haberse hecho el ensayo para todas las combinaciones de factores a cada uno de los posibles niveles, el caso de mayor interacción se habrá contemplado en la experimentación.

- **Diseño ortogonal fraccional y arreglos ortogonales.**

El inconveniente de los diseños ortogonales es el elevado número de ensayos que es necesario realizar cuando el número de factores y niveles es elevado.

El desarrollo de los diseños ortogonales fraccionales, trata de reducir el n° de ensayos no considerando las interacciones dobles entre factores por el conocimiento previo del proceso por el que se sabe que no van a ser relevantes en el resultado final.

Estas técnicas empleadas en la metodología Taguchi permiten la reducción del n° de pruebas a realizar sin perder información simplemente determinando aquellas interacciones que van a ser menos significativas por el conocimiento y la experiencia sobre el proceso, son de aplicación cuando tanto el n° de factores como niveles es muy elevado apareciendo múltiples combinaciones de interacciones dobles. Las interacciones de orden superior no se consideran en ningún caso.

En la presente tesis doctoral, la reducida selección de los factores controlados y de sus niveles junto a que la experimentación es relativamente barata, vamos a realizar un diseño ortogonal completo corriendo todos los ensayos, asegurándonos que comprenden los experimentos óptimos.

6.3 FACTORES Y NIVELES

El objetivo de la presente tesis es el estudio de la combustión de distintos aceites vegetales con gasóleo con distintos porcentajes de mezcla entre ambos. Se quiere obtener la relación más apropiada de factores que proporcionen el mejor rendimiento de la combustión con condiciones medioambientales aceptables.

Establecemos dos tipos de factores:

Factores cualitativos: tipo de aceite empleado

Factores cuantitativos: porcentaje de mezcla; presión de inyección y caudal de aire.

- **Tipos de aceite:**

Los experimentos que se van a realizar de mezclas de gasóleo con distintos tipos de aceite, se van a realizar con los aceites vegetales más usuales en nuestro entorno, aceite de colza, aceite de soja crudo, aceite de soja refinado, aceite de girasol crudo, aceite de girasol refinado y aceite usado

Este factor tiene 6 niveles, al ser cualitativo, no tiene ningún valor significativo salvo su identificación.

Tabla 6.1 Niveles de tipos de aceites vegetales

NIVEL	IDENTIFICACIÓN
Aceite de colza crudo	ACC
Aceite de soja crudo	ASC
Aceite de soja refinado	ASR
Aceite de girasol crudo	AGC
Aceite de girasol refinado	AGR
Aceite vegetal usado	AVU

El factor es un factor controlable, elegido uno de los aceites se procede a realizar la serie completa de ensayos con ese aceite para evitar posibles contaminaciones en las mezclas.

- **Porcentaje de aceite vegetal.**

Los porcentajes en las mezclas con gasóleo se van a realizar desde un 10% hasta un valor máximo del 50%, con incrementos del 10%.

Identificamos la mezcla con el identificador, genéricamente XXX, del aceite de la tabla 6.1, seguido del % de aceite en la mezcla.

Este factor es también controlable en el experimento y será realizado en orden creciente de porcentaje de mezcla. El valor 0%, gasóleo puro, nos vale para poner la instalación a régimen aunque este valor no se considera un nivel del factor correspondiente.

Los niveles correspondientes a este factor son:

Tabla 6.2 Niveles de porcentaje de mezcla

NIVEL	VALOR
XXX-10	10%
XXX-20	20%
XXX-30	30%
XXX-40	40%

- **Presión de inyección.**

La presión de inyección, como hemos visto en el capítulo IV, tiene influencia en el proceso de atomización del combustible, como la atomización también está relacionada con la viscosidad vamos a variar los valores de la presión de inyección para poder observar las consecuencias en la respuesta de este factor.

La presión de inyección nos modifica el caudal de combustible inyectado por lo que, para una misma boquilla, nos modifica las condiciones de aire mínimo que son controladas en el factor siguiente.

La selección de la presión se hace controlando manualmente en la bomba de inyección la válvula de retorno. La presión es medida por un manómetro y se varía también en orden creciente.

Los distintos niveles de este factor se caracterizan en la siguiente tabla:

Tabla 6.3 Niveles de presión de inyección.

NIVEL	VALOR
P-10	10 bar
P-12	12 bar
P-14	14 bar

- **Caudal de aire.**

El caudal de aire es el último factor a controlar. Los niveles seleccionados, en combinación con los del factor anterior, garantizan que la combustión se realice correctamente, es decir que por el índice de opacidad, el porcentaje de inquemados no sea elevado por falta de aire y que el aire en exceso no suponga una bajada importante del rendimiento de la combustión.

Optamos por tres niveles de posición de la maneta de aire para cada valor de la presión, que corresponden a los caudales de aire tasados que se expusieron en el capítulo V, las posiciones correspondientes originan los siguientes niveles para este factor:

Tabla 6.4 Niveles de caudal de aire

NIVEL	10Bar	12Bar	14Bar
Q-1	2,50m ³ /h	3,00m ³ /h	3,50m ³ /h
Q-2	3,00m ³ /h	3,50m ³ /h	4,00m ³ /h

Q-3	3,50m ³ /h	4,00m ³ /h	4,50m ³ /h
-----	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Como factor sustitutivo del caudal de aire, se podría haber seleccionado el índice de exceso de aire, pero el dispositivo experimental no permite trabajar con elevada precisión para fijar el caudal de aire necesario para las distintas mezclas y composición de aceites. Esta manera de operar permite desarrollar siempre los experimentos con el mínimo caudal, lo que no se podría asegurar si el factor elegido hubiese sido el índice de exceso de aire, aumentando el error asociado al desarrollo experimental.

Como podemos observar hemos fijado un orden para la ejecución de los ensayos, no hemos adoptado el criterio de aleatoriedad que se recomienda para el orden de ejecución de ensayos. La influencia de los factores no controlados o factores bloque y de los errores por factores no identificados quedan minimizados en este tipo de experimentos al conservar condiciones similares de ejecución para todos ellos. El haberlos en orden aleatorio además de un mayor tiempo de ejecución de los mismos comportaría mayor posibilidad de introducción de errores.

Otra característica de estos ensayos es que son únicos, es decir no se repite ninguno de ellos salvo el correspondiente a porcentaje 0% de aceite que no se usa como nivel en el factor % de aceite lo utilizamos como referencia para alcanzar el estado permanente y valor de prueba confirmar el correcto estado de los componentes y elementos de control y medida.

6.4 MATRIZ DE EXPERIMENTOS

Determinados los factores a controlar y los niveles de cada uno de ellos podemos formar la matriz de experimentos, el diseño el experimento es ortogonal con lo que cada nivel de cada factor es ensayado el mismo n° de veces con cada uno de los niveles de los factores restantes.

El conjunto de todos los factores controlados y sus respectivos niveles se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.5 Factores y niveles de los experimentos.

ACEITE	%MEZCLA	P.inyección	Caudal de aire
ACC	10%	10bar	Q1
ASC	20%	12bar	Q2
ASR	30%	14bar	Q3

AGC	40%		
AGR			
AVU			

Como se ha dicho anteriormente no se ha recurrido a establecer un orden aleatorio para la realización de los experimentos sino que se ha programado un orden secuencial, que facilita la ejecución de los mismos, garantizando el que los factores bloque y los factores ruido aportan una variabilidad mínima.

El orden de ejecución se hace de forma que la complejidad del cambio de experimento sea mínima:

- Se utiliza un tipo de aceite, realizando las mezclas en las distintas proporciones que se indican en los ensayos.
- Se varía la presión de inyección para cada uno de los tipos de mezcla.
- Se varía la posición de la maneta de aire para cada una de las presiones de inyección.

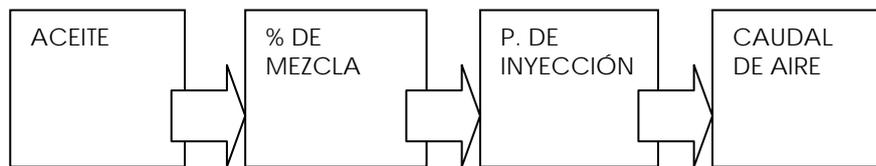


Figura 6.2: Secuencia de variación de factores

El número de experimentos a realizar para conservar la ortogonalidad será:

$$6 \times 4 \times 3 \times 3 = 216$$

La matriz de ensayos para todos los aceites será:

Tabla 6.6: Matriz de ensayos a realizar para todos los aceites.

		PORCENTAJE DE ACEITE EN LA MEZCLA													
		10 %			20 %			30 %			40 %				
CAUDAL DE AIRE m³/h	Q1													ACC	
	Q2														
	Q3														
	Q1													ASC	
	Q2														
	Q3														
	Q1													ASR	
	Q2														
	Q3														
	Q1													AGC	
	Q2														
	Q3														
	Q1													AGR	
	Q2														
	Q3														
	Q1													AVU	
	Q2														
	Q3														
			P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
			PRESIÓN DE INYECCIÓN (BAR)												

Los resultados que se han analizado en cada ensayo se recogen en la tabla siguiente:

Tabla 6.7: Datos que se registran en cada ensayo.

O ₂
Exceso Aire
CO ₂
CO
NO
NO ₂
NO _x
SO ₂
C _x H _y
T ^a Ambiente
T ^a Humos
Pér.por chimenea
H ₂
O ₂ ref (gasóleo C)
CO ₂ máx (gasóleo C)
Punto rocío
REN
Escala Bacharat

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 6

- 101) Ronald A. Fisher. The Design of Experiments 1935
- 102) Frank Yates and Kenneth Mather "Ronald Aylmer Fisher". Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society of London 1963.
- 103) D.J.Finney: El método estadístico en el ensayo biológico. Charles Griffin & Co., 1978
- 104) William Gemmell Cochran. Técnicas de muestreo. 1953
- 105) G.E.P.Box y M.R. Draper. Empirical Model Building and Response Surface. New York 1987
- 106) Taguchi, Genichi."Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes". Asian Productivity Organization. Tokyo, 1986.
- 107) Robust Engineering: Learn How to Boost Quality While Reducing Costs & Time to Market: por Taguchi, Genichi; Chowdhury, M Subir; Chowdhury 1993

CAPITULO 7 MEDIDAS EXPERIMENTALES

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la parte experimental de esta tesis, que consiste en la combustión de las mezclas en diferentes condiciones de funcionamiento del quemador y el análisis de los humos resultantes de su combustión.

Se inicia estableciendo las condiciones de funcionamiento de la instalación, que permiten considerar régimen estacionario y los criterios aplicados en la recogida de datos.

Luego se presenta un análisis previo de los resultados en función de: las emisiones de gases contaminantes, en concreto del monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno; el rendimiento de combustión de las mezclas en diferentes condiciones de funcionamiento del quemador y finalmente, las emisiones de gases de efecto invernadero clasificadas según sean de origen fósil y de origen no fósil.

7.2 PROCESO DE ENSAYOS

Los ensayos se realizan en régimen estacionario, para ello, las condiciones de funcionamiento de la instalación y del generador deben ser las mismas en todos los ensayos, estas condiciones han sido:

- Temperatura del cuerpo de caldera entre 85 y 90 °C.
- Temperatura del laboratorio entre 22 y 24 °C.
- El tiro de la chimenea 8 mm de c. a.
- El quemador debe funcionar de forma ininterrumpida.

El ensayo requiere un tiempo de arranque de la instalación, y que sea realizado con gasóleo, lo cual permite alcanzar a la instalación y al generador las condiciones adecuadas.

Durante ese tiempo, se prepara la mezcla con el tipo de grasa que corresponda y con el gasóleo como se ha descrito en el capítulo 4, para que sea una mezcla homogénea y una vez realizada la mezcla en el porcentaje de peso fijado se mantiene en agitación, que permite asegurar la homogeneidad de la mezcla.

A continuación se ajusta el caudal de aire de combustión y la presión de inyección de la mezcla para cada caso a estudio, mezcla de un aceite vegetal con gasóleo en un porcentaje determinado y se realiza la serie de ensayos para una muestra concreta.

El tiempo estimado para ensayar una mezcla de un tipo de aceite vegetal con gasóleo en un porcentaje determinado, para los tres caudales de aire y las tres presiones de inyección es de 90 minutos, donde el 88% es tiempo de estabilización del proceso de combustión, en esta tesis se han realizado tres ensayos por cada caso y sólo se han aceptado aquellos que estaban dentro del grado de error de los sensores respecto al valor medio de las medidas. En los ensayos el periodo menor para una mezcla fue de 90 minutos y el mayor fue de 120 minutos, al darse inestabilidades en los ensayos.

En cada ensayo se obtienen las siguientes variables de interés, mediante el analizador de humos descrito en el capítulo 5:

- O₂ en humos (% en volumen)
- CO en humos (ppm)
- Temperatura de humos (TH)
- Temperatura de entrada del aire ambiente (TA)
- NO_x en humos (ppm)

Concluidos los ensayos se realizaba una limpieza del tanque de alimentación y del circuito de combustible y se realizaban tres medidas de combustión de gasóleo puro para determinar si el inyector necesitaba ser cambiado o ajustar el plato difusor del quemador.

7.3 PROBLEMÁTICA EN LA FASE DE EXPERIMENTACIÓN DE LOS ENSAYOS

Durante la realización de los ensayos preliminares se han observado ciertas dificultades, tal y como se predijo en el diseño de experimentos, ya que existen ciertas restricciones entre las variables de estudio que no permiten realizar correctamente todos los ensayos.

Debido al alto porcentaje de oxígeno que contienen los aceites vegetales ha resultado imposible la realización de los ensayos para porcentajes de aceites superiores al 40 %, ya que la combustión tenía un exceso de aire extremadamente alto que producía el apagado de la llama. Por ello se decide eliminar la realización de la experimentación para todos los aceites con porcentaje del 50 %.

En cuanto al resto de restricciones comentadas en el diseño de experimentos, se decidió no tenerlas en cuenta y realizar todos los ensayos, por lo que, los ensayos realizados han sido 216.

La obstrucción de filtros ha sido un grave problema que ha requerido realizar un filtrado previo a las muestras de aceite vegetal usado.

Otra limitación del proceso de ensayo es la homogeneidad en el tiro de la chimenea, que se ve influenciada por las condiciones climatológicas, si bien esta influencia no representa graves problemas en el proceso de combustión y ha obligado a aplazarlos procesos de ensayo.

7.4 TOMA DE DATOS

En las Tablas 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6 y 7.7 se presentan los resultados de los 216 ensayos en los que se han cumplido las siguientes condiciones:

- Condiciones estacionarias de funcionamiento de la caldera.

- Caudal de aire y presión de inyección del combustible ajustado al ensayo.
- Funcionamiento ininterrumpido de la instalación para cada mezcla.
- Los valores de cada ensayo están dentro de los límites del error del equipo de medida.

En las Tablas se especifica el tipo de aceite, el porcentaje de la mezcla aceite gasóleo, la presión de inyección de la mezcla en bares, la posición del mecanismo de regulación del caudal de aire, las partes por millón en humos de CO, el porcentaje de oxígeno en humos, la temperatura de los humos, la temperatura ambiental o de referencia y la concentración de óxidos de nitrógeno en humos y el índice de opacidad de los humos.

7.5 ANÁLISIS DE COMBUSTIÓN

El análisis de los productos de la combustión se ha realizado sobre tres aspectos:

- Emisiones de gases contaminantes.
- Eficiencia de combustión
- Gases de efecto invernadero.

7.5.1. Emisiones de gases contaminantes

Respecto a las emisiones de gases contaminantes se estudia las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y opacidad y se considera aceptable aquellas combustiones en que la concentración en humos en ppm del CO y NOx y opacidad son inferiores a los valores de la Tabla 7.1, que son los límites impuestos por la normativa actual expuesta en el capítulo 4 de la tesis.

Tabla 7.1: Límites para considerar una combustión sin problemas de contaminación.

Compuesto	Límite superior
CO	500 ppm
NOx	300 ppm
Opacidad	3

Los valores experimentales que superan estos valores se han presentado sobre un fondo gris. Estas combustiones son inaceptables medioambientalmente por lo que habría que estudiar la forma de regular el quemador para disminuir el porcentaje en humos de CO y la opacidad.

7.5.2. Eficiencia de la combustión

La eficiencia de combustión o rendimiento de combustión representa la cantidad de energía que se transfiere al sistema térmico.

Los valores del rendimiento de combustión se representan en las Tablas 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 y 7.13, para cada mezcla en función de la presión de inyección y el caudal de aire. El valor del rendimiento se ha calculado con la hoja Excel y las expresiones descritas en el capítulo 4.

Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos con la combustión de gasóleo, hay que destacar que los aceites tienen un PCI menor que el gasóleo y por lo tanto la energía liberada por unidad de masa es menor en el proceso de combustión, sin embargo los aceites poseen en su composición un porcentaje mayor de oxígeno y por lo tanto requiere menor caudal de aire, lo que reduce las pérdidas por humos, estos dos fenómenos juntos justifican que los valores de rendimiento de las mezclas y el gasóleo sean similares.

7.5.3. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero considerados en esta tesis son las emisiones de CO₂ asociadas a la combustión del gasóleo, al ser un combustible fósil, puesto que el generado por la combustión de los aceites es de origen renovable.

La valoración se ha realizado en función de la composición elemental del gasóleo y los aceites y el porcentaje de mezcla. Este valor se recoge en las tablas 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 y 7.13 y se indica los kg de CO₂ emitidos en una combustión completa por kg de combustible, diferenciando entre los originados por el gasóleo origen fósil y los originados por el aceite origen no fósil.

7.6 RESULTADOS

Tabla 7.2: Análisis de combustión de la mezclas de gasóleo y aceite de colza

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	CO (ppm)	O ₂ (%)	NO _x (%)	Opcid. (IB)	Th (°C)
ACC-10	10	2,5	229	10,3	26	7	209,6
		3,0	300	10,5	26	5	216,6
		3,5	380	10,8	24	3	227,4
	12	3,0	156	9,8	30	5	225,0
		3,5	121	10	30	3	227,5
		4,0	178	10,4	26	1	226,5
	14	3,5	66	9,5	33	3	234,6
		4,0	57	9,8	31	1	236,7
		4,5	84	10,2	28	0	238,6
ACC-20	10	2,5	144	9,6	31	7	200,0
		3,0	208	10,1	28	5	211,0
		3,5	300	10,5	25	2	218,0
	12	3,0	93	9,4	34	6	232,0
		3,5	87	9,8	33	3	229,0
		4,0	137	10,2	30	1	231,7
	14	3,5	65	9,3	36	4	238,0
		4,0	46	9,7	34	2	240,0
		4,5	60	10,1	31	1	243,5
ACC-30	10	2,5	210	9,7	29	6	223,0
		3,0	279	10,3	28	4	223,0
		3,5	324	10,4	24	2	229,0
	12	3,0	53	9,1	38	5	224,0
		3,5	56	9,5	37	3	237,0
		4,0	81	9,9	34	1	239,0
	14	3,5	44	9	39	4	244,0
		4,0	34	9,4	40	2	247,0
		4,5	46	9,9	36	0	250,0
ACC-40	10	2,5	95	9,4	35	4	210,0
		3,0	125	9,9	33	6	220,0
		3,5	200	10,4	28	3	226,0
	12	3,0	47	9,1	40	5	230,0
		3,5	39	9,4	38	2	238,0
		4,0	52	9,7	35	1	242,0
	14	3,5	23	8,9	41	4	247,0
		4,0	22	9,3	40	2	250,0
		4,5	29	9,7	37	1	254,0

Tabla 7.3: Análisis de combustión de la mezclas de gasóleo y aceite de soja crudo.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	CO (ppm)	O ₂ (%)	NO _x (%)	Opcid. (IB)	Th (°c)
ASC-10	10	2,5	26	9,8	22	7	210,0
		3,0	19	10,1	20	4	213,0
		3,5	17	10,6	18	2	217,0
	12	3,0	44	9,6	25	5	229,0
		3,5	47	9,9	23	2	227,0
		4,0	44	10,3	20	1	228,0
	14	3,5	55	9,5	26	3	234,0
		4,0	56	9,7	24	1	239,0
		4,5	53	10,1	21	0	240,0
ASC-20	10	2,5	24	10,0	20	7	209,0
		3,0	25	10,5	18	4	217,0
		3,5	22	10,9	15	2	218,0
	12	3,0	51	9,4	27	5	229,0
		3,5	61	9,9	25	2	228,0
		4,0	60	10,3	22	1	230,0
	14	3,5	69	9,6	27	3	235,0
		4,0	69	9,9	25	1	238,0
		4,5	66	10,2	23	0	241,0
ASC-30	10	2,5	42	10,0	23	7	208,0
		3,0	39	10,1	23	4	222,0
		3,5	37	10,4	20	1	226,0
	12	3,0	48	9,4	28	4	235,0
		3,5	49	9,7	28	3	235,0
		4,0	47	10,0	25	1	236,0
	14	3,5	50	9,2	31	3	241,0
		4,0	51	9,5	30	2	245,0
		4,5	49	9,9	28	1	246,0
ASC-40	10	2,5	25	9,5	28	7	221,0
		3,0	24	9,7	26	4	230,0
		3,5	23	10,0	22	2	234,0
	12	3,0	33	9,4	31	2	233,0
		3,5	35	9,5	29	1	241,0
		4,0	33	9,7	26	0	244,0
	14	3,5	36	9,2	32	2	250,0
		4,0	35	9,4	32	1	253,0
		4,5	34	9,6	30	0	256,0

Tabla 7.4: Análisis de combustión de la mezclas de gasóleo y aceite de soja refinado.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	CO (ppm)	O ₂ (%)	NO _x (%)	Opcid. (IB)	Th (°c)
ASR-10	10	2,5	2	9,8	28	7	206,0
		3,0	0	10,2	26	4	221,0
		3,5	0	10,6	23	2	221,0
	12	3,0	4	9,7	30	5	229,0
		3,5	7	10,0	28	3	231,0
		4,0	6	10,2	27	1	233,0
	14	3,5	13	9,6	32	3	236,0
		4,0	17	9,9	31	1	243,0
		4,5	15	10,2	28	0	245,0
ASR-0	10	2,5	2	9,9	28	7	217,0
		3,0	0	10,2	28	4	225,0
		3,5	0	10,6	25	2	226,0
	12	3,0	13	9,8	32	6	231,0
		3,5	15	10,2	31	3	232,0
		4,0	13	10,4	28	1	235,0
	14	3,5	22	9,5	35	3	240,0
		4,0	23	9,8	34	1	243,0
		4,5	21	10,2	33	0	245,0
ASR-30	10	2,5	14	9,9	30	6	210,0
		3,0	12	10,2	31	4	214,0
		3,5	8	10,5	27	2	224,0
	12	3,0	20	9,6	35	6	230,0
		3,5	23	9,9	34	2	234,0
		4,0	19	10,3	30	1	237,0
	14	3,5	25	9,4	37	4	240,0
		4,0	28	9,8	36	2	243,0
		4,5	26	10,1	34	1	249,0
ASR-40	10	2,5	17	9,7	34	6	211,0
		3,0	14	10,0	30	7	221,0
		3,5	18	10,2	32	6	226,0
	12	3,0	29	9,1	39	4	237,0
		3,5	29	9,5	35	2	242,0
		4,0	25	9,8	30	0	246,0
	14	3,5	31	9,2	40	2	248,0
		4,0	31	9,5	38	1	250,0
		4,5	29	9,9	34	0	253,0

Tabla 7.5: Análisis de combustión de la mezclas de gasóleo y aceite de girasol crudo.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	CO (ppm)	O ₂ (%)	NO _x (%)	Opcid. (IB)	Th (°c)
AGC-10	10	2,5	170	10,8	22	7	205,0
		3,0	230	11,1	20	5	209,0
		3,5	321	11,4	17	2	212,0
	12	3,0	90	10,6	25	6	219,8
		3,5	120	10,8	22	3	223,2
		4,0	216	11,1	19	1	226,4
	14	3,5	65	10,5	23	2	230,7
		4,0	73	10,6	22	1	237,3
		4,5	133	10,8	20	1	239,4
AGC-20	10	2,5	150	10,6	22	7	206,0
		3,0	201	11,1	20	5	209,0
		3,5	288	11,3	18	2	213,0
	12	3,0	90	10,4	25	5	217,0
		3,5	91	10,7	23	3	220,0
		4,0	144	11,1	21	1	225,0
	14	3,5	51	10,2	26	3	228,0
		4,0	50	10,5	24	1	234,0
		4,5	70	10,8	22	1	237,0
AGC-30	10	2,5	99	10,2	22	7	206,0
		3,0	141	10,7	20	5	214,0
		3,5	254	11,0	16	2	224,0
	12	3,0	90	10,1	25	5	224,0
		3,5	75	10,5	24	3	227,0
		4,0	128	10,8	21	1	230,0
	14	3,5	38	10,1	27	4	234,0
		4,0	40	10,3	25	2	237,0
		4,5	63	10,6	24	1	242,3
AGC-40	10	2,5	68	10,1	24	5	208,0
		3,0	64	10,4	23	3	216,0
		3,5	115	10,5	19	1	232,0
	12	3,0	35	9,7	27	4	232,0
		3,5	30	10,1	25	2	237,0
		4,0	68	10,3	22	1	245,0
	14	3,5	24	9,6	28	4	242,0
		4,0	21	9,9	27	2	246,0
		4,5	36	10,2	25	0	252,0

Tabla 7.6: Análisis de combustión de la mezclas de gasóleo y aceite girasol refinado.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	CO (ppm)	O ₂ (%)	NO _x (%)	Opcid. (IB)	Th (°c)
AGR-10	10	2,5	187	10,3	22	6	205,0
		3,0	294	10,6	21	3	209,0
		3,5	450	10,8	18	1	212,0
	12	3,0	117	9,8	27	4	219,8
		3,5	140	10,3	25	2	223,2
		4,0	244	10,6	20	1	226,4
	14	3,5	70	9,8	28	3	230,7
		4,0	76	10,1	25	1	237,3
		4,5	123	10,4	23	0	239,4
AGR-20	10	2,5	244	10,3	24	6	206,0
		3,0	384	10,8	22	3	209,0
		3,5	664	11,1	16	2	213,0
	12	3,0	159	9,9	30	4	217,0
		3,5	158	10,4	27	3	220,0
		4,0	235	10,7	24	1	225,0
	14	3,5	77	9,8	32	3	228,0
		4,0	79	10,2	28	1	234,0
		4,5	122	10,5	26	0	237,0
AGR-30	10	2,5	252	10,1	27	4	206,0
		3,0	364	10,5	23	3	214,0
		3,5					
	12	3,0	41	9,3	37	4	224,0
		3,5	64	9,8	35	2	227,0
		4,0	120	10,2	31	1	230,0
	14	3,5	41	9,3	38	4	234,0
		4,0	46	9,6	36	2	237,0
		4,5	79	10,0	33	0	242,3
AGR-40	10	2,5	96	9,7	32	7	208,0
		3,0	111	10,0	32	6	216,0
		3,5	120	10,1	33	3	232,0
	12	3,0	37	9,1	37	6	232,0
		3,5	39	9,4	36	3	237,0
		4,0	77	9,6	33	1	245,0
	14	3,5	26	9,0	40	5	242,0
		4,0	24	9,2	39	2	246,0
		4,5	38	9,5	37	1	252,0

Tabla 7.7: Análisis de combustión de la mezclas de gasóleo y aceite vegetal usado.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	CO (ppm)	O ₂ (%)	NO _x (%)	Opcid. (IB)	Th (°c)
AVU-10	10	2,5	0	9,3	31	7	210,0
		3,0	0	9,7	30	5	223,0
		3,5	0	10,1	28	2	229,0
	12	3,0	0	9,2	35	5	232,0
		3,5	0	9,6	33	2	234,0
		4,0	0	9,9	31	1	239,0
	14	3,5	0	9,2	35	2	242,0
		4,0	3	9,4	35	1	246,0
		4,5	5	9,8	32	0	249,0
AVU-20	10	2,5	0	10,0	26	7	210,0
		3,0	0	10,3	23	4	214,0
		3,5	0	10,2	30	2	222,0
	12	3,0	12	9,3	36	5	226,0
		3,5	14	9,8	33	2	230,0
		4,0	8	10,2	30	1	233,0
	14	3,5	20	9,4	37	2	235,0
		4,0	23	9,8	35	1	236,0
		4,5	20	10,1	32	0	238,0
AVU-30	10	2,5	3	10,4	27	6	200,0
		3,0	12	9,9	30	2	211,0
		3,5					
	12	3,0	24	9,0	39	5	220,0
		3,5	27	9,4	37	1	225,0
		4,0	25	9,9	32	1	231,0
	14	3,5	30	9,1	40	3	236,0
		4,0	30	9,5	38	2	236,0
		4,5	29	9,8	35	0	239,0
AVU-40	10	2,5	10	9,7	32	8	210,0
		3,0	15	10,0	27	7	220,0
		3,5					
	12	3,0	28	9,2	36	6	228,0
		3,5	29	9,5	38	6	233,0
		4,0					
	14	3,5	31	8,9	41	2	240,0
		4,0	31	9,2	40	1	246,0
		4,5					

Tabla 7.8: Eficacia de combustión de mezclas de aceite de colza y gasóleo.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	Eficiencia (%)	CO ₂ Fósil (kg/kg de combustible)	CO ₂ no Fósil (kg/kg de combustible)
ACC-10	10	2,5	86,204	2,86	0,28
		3,0	85,392	2,86	0,28
		3,5	84,100	2,86	0,28
	12	3,0	85,672	2,86	0,28
		3,5	85,254	2,86	0,28
		4,0	84,797	2,86	0,28
	14	3,5	85,354	2,86	0,28
		4,0	84,839	2,86	0,28
		4,5	84,164	2,86	0,28
ACC-20	10	2,5	87,686	2,54	0,57
		3,0	86,319	2,54	0,57
		3,5	85,258	2,54	0,57
	12	3,0	85,624	2,54	0,57
		3,5	85,374	2,54	0,57
		4,0	84,650	2,54	0,57
	14	3,5	85,318	2,54	0,57
		4,0	84,697	2,54	0,57
		4,5	83,906	2,54	0,57
ACC-30	10	2,5	85,869	2,22	0,85
		3,0	85,113	2,22	0,85
		3,5	84,501	2,22	0,85
	12	3,0	86,505	2,22	0,85
		3,5	85,131	2,22	0,85
		4,0	84,479	2,22	0,85
	14	3,5	85,216	2,22	0,85
		4,0	84,533	2,22	0,85
		4,5	83,661	2,22	0,85
ACC-40	10	2,5	87,146	1,91	1,14
		3,0	85,859	1,91	1,14
		3,5	84,749	1,91	1,14
	12	3,0	86,061	1,91	1,14
		3,5	85,155	1,91	1,14
		4,0	84,492	1,91	1,14
	14	3,5	85,097	1,91	1,14
		4,0	84,414	1,91	1,14
		4,5	83,606	1,91	1,14

Tabla 7.9: Eficacia de combustión de mezclas de aceite de soja crudo y gasóleo.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	Eficiencia (%)	CO ₂ Fósil (kg/kg de combustible)	CO ₂ no Fósil (kg/kg de combustible)
ASC-10	10	2,5	86,824	2,86	0,28
		3,0	86,265	2,86	0,28
		3,5	85,339	2,86	0,28
	12	3,0	85,659	2,86	0,28
		3,5	85,449	2,86	0,28
		4,0	84,869	2,86	0,28
	14	3,5	85,411	2,86	0,28
		4,0	84,804	2,86	0,28
		4,5	84,214	2,86	0,28
ASC-20	10	2,5	86,664	2,54	0,57
		3,0	85,452	2,54	0,57
		3,5	84,837	2,54	0,57
	12	3,0	85,871	2,54	0,57
		3,5	85,355	2,54	0,57
		4,0	84,695	2,54	0,57
	14	3,5	85,200	2,54	0,57
		4,0	84,607	2,54	0,57
		4,5	83,981	2,54	0,57
ASC-30	10	2,5	86,718	2,22	0,85
		3,0	85,553	2,22	0,85
		3,5	84,864	2,22	0,85
	12	3,0	85,427	2,22	0,85
		3,5	85,070	2,22	0,85
		4,0	84,619	2,22	0,85
	14	3,5	85,229	2,22	0,85
		4,0	84,583	2,22	0,85
		4,5	83,996	2,22	0,85
ASC-40	10	2,5	86,313	1,91	1,14
		3,0	85,430	1,91	1,14
		3,5	84,762	1,91	1,14
	12	3,0	85,559	1,91	1,14
		3,5	84,862	1,91	1,14
		4,0	84,394	1,91	1,14
	14	3,5	84,576	1,91	1,14
		4,0	84,114	1,91	1,14
		4,5	83,636	1,91	1,14

Tabla 7.10: Eficacia de combustión de mezclas de aceite de soja refinado y gasóleo.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	Eficiencia (%)	CO ₂ Fósil (kg/kg de combustible)	CO ₂ no Fósil (kg/kg de combustible)
ASR-10	10	2,5	87,120	2,86	0,28
		3,0	85,542	2,86	0,28
		3,5	85,026	2,86	0,28
	12	3,0	85,550	2,86	0,28
		3,5	85,035	2,86	0,28
		4,0	84,625	2,86	0,28
	14	3,5	85,155	2,86	0,28
		4,0	84,259	2,86	0,28
		4,5	83,701	2,86	0,28
ASR-20	10	2,5	86,183	2,54	0,57
		3,0	85,219	2,54	0,57
		3,5	84,613	2,54	0,57
	12	3,0	85,261	2,54	0,57
		3,5	84,679	2,54	0,57
		4,0	84,178	2,54	0,57
	14	3,5	84,963	2,54	0,57
		4,0	84,367	2,54	0,57
		4,5	83,679	2,54	0,57
ASR-30	10	2,5	86,679	2,22	0,85
		3,0	86,034	2,22	0,85
		3,5	84,883	2,22	0,85
	12	3,0	85,552	2,22	0,85
		3,5	84,891	2,22	0,85
		4,0	84,138	2,22	0,85
	14	3,5	85,061	2,22	0,85
		4,0	84,345	2,22	0,85
		4,5	83,488	2,22	0,85
ASR-40	10	2,5	86,806	1,91	1,14
		3,0	85,725	1,91	1,14
		3,5	85,097	1,91	1,14
	12	3,0	85,598	1,91	1,14
		3,5	84,773	1,91	1,14
		4,0	84,100	1,91	1,14
	14	3,5	84,702	1,91	1,14
		4,0	84,189	1,91	1,14
		4,5	83,438	1,91	1,14

Tabla 7.11: Eficacia de combustión de mezclas de aceite de girasol crudo y gasóleo.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	Eficiencia (%)	CO ₂ Fósil (kg/kg de combustible)	CO ₂ no Fósil (kg/kg de combustible)
AGC-10	10	2,5	85,965	2,86	0,29
		3,0	85,219	2,86	0,29
		3,5	84,500	2,86	0,29
	12	3,0	85,087	2,86	0,29
		3,5	84,531	2,86	0,29
		4,0	83,796	2,86	0,29
	14	3,5	84,375	2,86	0,29
		4,0	83,710	2,86	0,29
		4,5	83,222	2,86	0,29
AGC-20	10	2,5	86,127	2,54	0,57
		3,0	85,209	2,54	0,57
		3,5	84,557	2,54	0,57
	12	3,0	85,544	2,54	0,57
		3,5	84,914	2,54	0,57
		4,0	83,914	2,54	0,57
	14	3,5	84,968	2,54	0,57
		4,0	84,099	2,54	0,57
		4,5	83,414	2,54	0,57
AGC-30	10	2,5	85,997	2,22	0,86
		3,0	84,559	2,22	0,86
		3,5	84,084	2,22	0,86
	12	3,0	85,364	2,22	0,86
		3,5	84,617	2,22	0,86
		4,0	83,936	2,22	0,86
	14	3,5	84,622	2,22	0,86
		4,0	84,122	2,22	0,86
		4,5	83,267	2,22	0,86
AGC-40	10	2,5	86,557	1,91	1,14
		3,0	85,587	1,91	1,14
		3,5	84,186	1,91	1,14
	12	3,0	85,251	1,91	1,14
		3,5	84,372	1,91	1,14
		4,0	83,466	1,91	1,14
	14	3,5	84,641	1,91	1,14
		4,0	83,957	1,91	1,14
		4,5	83,076	1,91	1,14

Tabla 7.12: Eficacia de combustión de mezclas de aceite de girasol refinado y gasóleo.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	Eficiencia (%)	CO2 Fósil (kg/kg de combustible)	CO2 no Fósil (kg/kg de combustible)
AGR-10	10	2,5	86,576	2,86	0,28
		3,0	85,866	2,86	0,28
		3,5	85,313	2,86	0,28
	12	3,0	86,075	2,86	0,28
		3,5	85,204	2,86	0,28
		4,0	84,526	2,86	0,28
	14	3,5	85,287	2,86	0,28
		4,0	84,410	2,86	0,28
		4,5	83,821	2,86	0,28
AGR-20	10	2,5	86,466	2,54	0,57
		3,0	85,560	2,54	0,57
		3,5	84,728	2,54	0,57
	12	3,0	86,211	2,54	0,57
		3,5	85,299	2,54	0,57
		4,0	84,478	2,54	0,57
	14	3,5	85,468	2,54	0,57
		4,0	84,511	2,54	0,57
		4,5	83,850	2,54	0,57
AGR-30	10	2,5	86,679	2,22	0,85
		3,0	85,548	2,22	0,85
		3,5			
	12	3,0	86,321	2,22	0,85
		3,5	85,529	2,22	0,85
		4,0	84,786	2,22	0,85
	14	3,5	85,610	2,22	0,85
		4,0	85,041	2,22	0,85
		4,5	84,127	2,22	0,85
AGR-40	10	2,5	87,008	1,91	1,14
		3,0	86,078	1,91	1,14
		3,5	84,746	1,91	1,14
	12	3,0	85,958	1,91	1,14
		3,5	85,263	1,91	1,14
		4,0	84,427	1,91	1,14
	14	3,5	85,370	1,91	1,14
		4,0	84,858	1,91	1,14
		4,5	84,052	1,91	1,14

Tabla 7.13: Eficacia de combustión de mezclas de aceite de aceite vegetal usado y gasóleo.

Mezcla	Presión de inyección (bar)	Posición rejilla de aire	Eficiencia (%)	CO ₂ Fósil (kg/kg de combustible)	CO ₂ no Fósil (kg/kg de combustible)
AVU-10	10	2,5	86,588	2,86	0,28
		3,0	86,004	2,86	0,28
		3,5	85,076	2,86	0,28
	12	3,0	85,920	2,86	0,28
		3,5	85,319	2,86	0,28
		4,0	84,579	2,86	0,28
	14	3,5	85,214	2,86	0,28
		4,0	84,690	2,86	0,28
		4,5	83,962	2,86	0,28
AVU-20	10	2,5	86,616	2,54	0,57
		3,0	85,963	2,54	0,57
		3,5	85,476	2,54	0,57
	12	3,0	86,227	2,54	0,57
		3,5	85,364	2,54	0,57
		4,0	84,635	2,54	0,57
	14	3,5	85,471	2,54	0,57
		4,0	84,917	2,54	0,57
		4,5	84,382	2,54	0,57
AVU-30	10	2,5	86,909	2,22	0,85
		3,0	86,646	2,22	0,85
		3,5			
	12	3,0	86,950	2,22	0,85
		3,5	86,179	2,22	0,85
		4,0	85,159	2,22	0,85
	14	3,5	85,731	2,22	0,85
		4,0	85,274	2,22	0,85
		4,5	84,688	2,22	0,85
AVU-40	10	2,5	86,933	1,91	1,13
		3,0	85,857	1,91	1,13
		3,5			
	12	3,0	86,179	1,91	1,13
		3,5	85,486	1,91	1,13
		4,0			
	14	3,5	85,665	1,91	1,13
		4,0	84,905	1,91	1,13
		4,5			

CAPITULO 8

ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. INTRODUCCIÓN.

En el siguiente estudio se pretende caracterizar el comportamiento de mezclas de gasoil con los seis tipos de aceite mencionados y en los porcentajes descritos. Esto se hará a través de la medida directa de parámetros de la combustión y los cálculos derivados de esas medidas.

Los parámetros que se medirán/calcularán son los siguientes:

- Rendimiento
- Emisiones de CO
- Emisiones de NOx

Se controlarán cuatro parámetros, a saber:

Tipo de aceite (T): los aceites que se incluyen en el estudio son aceite de colza crudo, aceite vegetal usado, aceite de girasol crudo, aceite de girasol refinado, aceite de soja crudo y aceite de soja refinado.

Porcentaje de mezcla (X): se variará el porcentaje de mezcla en peso entre el 10, 20, 30 y 40%.

Presión de inyección de combustible (P): variará entre 10, 12 y 14 bar.

Posición de la admisión de aire (A): este parámetro ha de tomar tres valores en las mediciones. Las medidas hubieron de ser realizadas de modo que cada presión tomó un valor distinto de posición de admisión de aire (para P=10 bar, A=2,5, 3 y 3,5; para P=12 bar, A=3, 3,5 y 4; y para P=14 bar, A=3,5, 4 y 4,5).

El hecho de que cada presión tomara unos valores de admisión del aire obligaba a que la matriz de diseño del experimento no fuese “normal”, impidiendo un análisis global de los datos, de modo que los análisis realizados han sido a presión constante variando la posición de la admisión del aire siempre entre los mismos valores.

A mayores se ha realizado un estudio a posición de admisión de aire constante (A=3,5), ya que era viable y el planteamiento era lógico desde un punto de vista estadístico. Además, los resultados que se obtuviesen de él podrían llevar consigo una interpretación que tendría una base para llevar a cabo otros razonamientos.

Un hipotético estudio con todos los valores obtenidos, clasificando las posiciones de admisión del aire en bajas, medias y altas, podría ser factible desde el punto de vista práctico, pero sería poco riguroso desde el punto de vista técnico, ya que la posición “baja” de uno correspondería con la “alta” de otro. De este modo, aunque los resultados serían perfectamente tratables, las posibles interpretaciones y conclusiones sacadas de un estudio de este tipo serían, cuanto menos, discutibles.

8.2. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS ANOVA

Se va a emplear en el estudio la notación siguiente:

Variables:

- **P:** presión de inyección
- **A:** posición de la admisión del aire
- **T:** tipo de aceite que se mezcla con el gasoil en el combustible
- **X:** porcentaje (en masa) en la mezcla aceite-gasoil

Tipos de aceite (con tipos de aceite, se denotarán también las mezclas de los mismos con gasoil, es decir: ACC al 40% será aceite de colza crudo al 40% en peso y el resto, gasoil).

- **ACC:** aceite de colza
- **AGC:** aceite de girasol crudo
- **AGR:** aceite de girasol refinado
- **ASC:** aceite de soja crudo
- **ASR:** aceite de soja refinado
- **AVU:** aceite vegetal usado.

Descripción:

Tomando como ejemplo la tabla del primer análisis que se va a realizar, se contemplan los factores contemplados y sus interacciones. Se tiene también el error y la contribución total.

Tabla 8.1 Factores contemplados, interacciones. Error y contribución total

FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
A	2	43,59301	21,79650	239,23341	3,31583	SI	3,65493E-19
T	5	2,98808	0,59762	6,55929	2,53355	SI	0,000311729
X	3	0,73861	0,24620	2,70228	2,92228	NO	0,06316526
AxT	10	0,79699	0,07970	0,87476	2,16458	NO	0,565846121
AxX	6	0,71264	0,11877	1,30363	2,42052	NO	0,285822777
TxX	15	5,12161	0,34144	3,74757	2,01480	SI	0,001010775
Error	30	2,733294	0,091110				
Total	71	56,684227					

Por columnas, se tiene en la primera el factor correspondiente; en la segunda se tienen los grados de libertad de cada aportación; en la tercera se tiene la suma de cuadrados de cada aportación; en la cuarta tenemos la varianza o cuadrado medio, calculada como cociente entre la suma de cuadrados y los grados de libertad; en la quinta columna se tiene el estadístico F, el cual se obtiene como cociente entre la varianza de cada factor y la varianza del error (este estadístico será el responsable final del análisis); en la sexta columna se tiene el valor máximo que tendría que tener el estadístico F, a un nivel de confianza del 5%, para que la variable no fuese determinante en el análisis; en la séptima se evalúa si dicho estadístico interviene o no (para hacerlo, su estadístico F tiene que ser mayor que el valor crítico al 5% en este caso); y en la octava columna se expone el grado de confianza que tendría que tener el análisis para que el valor crítico, con ese nivel de confianza, alcanzara el valor del estadístico F obtenido.

8.3. ESTUDIO DEL RENDIMIENTO.

El rendimiento se calcula a través de las pérdidas por inquemados y las pérdidas por chimenea de la siguiente forma:

$$P_{inq} = K \cdot \frac{CO(\text{ppm}) \cdot V_H^1 \cdot PCI_{CO} \cdot P_{amb} / (T_{amb} \cdot R_{co})}{PCI_{comb.}}$$

$$P_{chim} = 100 \cdot \frac{M_H^1 \cdot C_{Phum} \cdot (T_{hum} - T_{amb})}{PCI_{comb.}}$$

$$\eta_{comb} = 1 - P_{inq} - P_{chim}$$

En la que K un factor de conversión debido a las unidades utilizadas.

8.3.1. Análisis del rendimiento para p=10 bar

Se muestra a continuación la matriz de resultados obtenida:

Tabla 8.2: Matriz de resultados para P=10bar

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Posición de admisión (A)	2,5	86,20404	87,68685	85,86875	87,14564	ACC	Tipo de aceite (T)
	3	85,39181	86,31874	85,11291	85,85870		
	3,5	84,09968	85,25850	84,50137	84,74938		
	2,5	86,58826	86,61589	86,90948	86,93349	AVU	
	3	86,00410	85,96265	86,64578	85,85699		
	3,5	85,07556	85,47638	86,12837	85,58125		
	2,5	86,12403	86,12667	85,99658	86,55684	AGC	
	3	85,21916	85,20932	84,55915	85,58685		
	3,5	84,49998	84,55733	84,08382	84,18637		
	2,5	86,57629	86,46596	86,67902	87,00777	AGR	
	3	85,86590	85,55985	85,54831	86,07825		
	3,5	85,31293	84,72836	84,28067	84,74591		
	2,5	86,82392	86,66376	86,71840	86,31275	ASC	
	3	86,26515	85,45227	85,55255	85,42969		
	3,5	85,33888	84,83663	84,86387	84,76151		
2,5	87,12031	86,18329	86,67931	86,80579	ASR		
3	85,54243	85,21924	86,03372	85,72543			
3,5	85,02602	84,61271	84,88327	85,09721			
		Presión de inyección: 10 bar					

Con estos datos, lo primero que se plantea es un análisis de varianza (ANOVA), mediante el cual se determinará si las tres variables influyen (admisión del aire, tipo de aceite y porcentaje de aceite en peso) o no y de qué manera.

Tabla 8.3:Análisis ANOVA para P=10bar

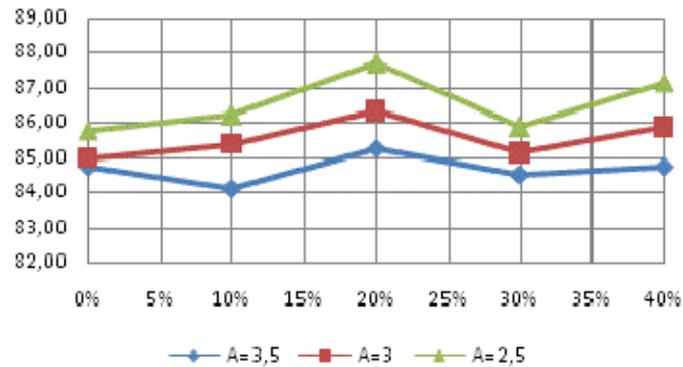
FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
A	2	36,01435	18,00718	244,61336	3,31583	SI	2,66971E-19
T	5	5,90060	1,18012	16,03100	2,53355	SI	1,06488E-07
X	3	0,30857	0,10286	1,39721	2,92228	NO	0,262840955
AxT	10	1,57548	0,15755	2,14016	2,16458	NO	0,052515291
AxX	6	0,15193	0,02532	0,34399	2,42052	NO	0,90779543
TxX	15	6,59287	0,43952	5,97060	2,01480	SI	1,68839E-05
Error	30	2,208445	0,073615				
Total	71	52,752245					

Una vez hecha la descripción de la tabla, la interpretación es la siguiente: con un análisis al 5% de confiabilidad, se tiene que las variables influyentes sobre el rendimiento de la combustión son la admisión del aire, el tipo de aceite y la interacción tipo de aceite-porcentaje de la misma. Como puede apreciarse, el grado de confianza que tendría que tener el análisis para que la variable X (porcentaje de aceite en la mezcla) sería del 5,25%, valor ligeramente superior al utilizado: en un análisis con un nivel de significación más amplio el valor sería tomado como decisivo.

Puede concluirse que el factor más determinante, con diferencia, del análisis a presión constante e igual a 10 bar, es la **posición de la admisión de aire**. El valor del nivel de significación es muy inferior al del resto (del orden de 10^{-14}).

Se representan a continuación los valores obtenidos para la variable rendimiento en función de las variables T, A y X.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de colza crudo (T=ACC)

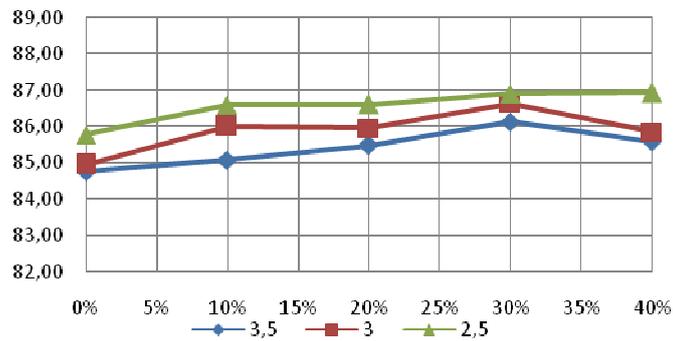


ACC, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	85,78101	86,20404	87,68685	85,86875	87,14564
A=3	84,95782	85,39181	86,31874	85,11291	85,85870
A=3,5	84,75750	84,09968	85,25850	84,50137	84,74938

Figura 8.1: Rendimiento para P=10bar y ACC

Se observa, tal y como el análisis ANOVA predijo, la influencia de la posición de admisión de aire en el rendimiento. A medida que introducimos más aire (A=3 y A=3,5), el rendimiento baja. Esto es debido a que el exceso de aire que introducimos sale arrastrando calor, aumentando las pérdidas por chimenea (hay más caudal de humos saliente y a mayor temperatura). Además, se observa en los datos que las pérdidas por inquemados también aumentan (las ppm de CO aumentan). De este modo, el rendimiento se ve influenciado por ambas pérdidas. También ha de tenerse en cuenta que el PCI del combustible disminuye al aumentar la proporción de aceite.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite vegetal usado (T=AVU)

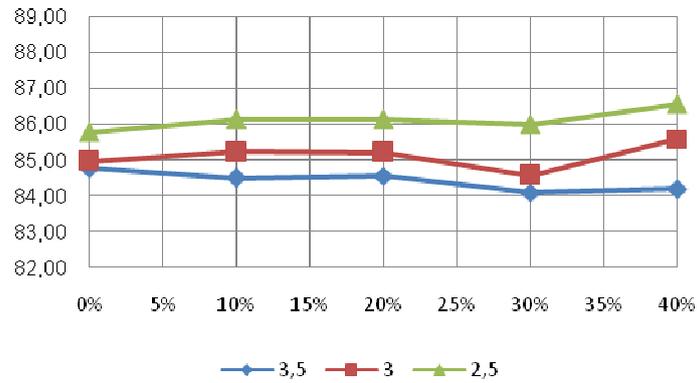


AVU,P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	85,78101	86,58826	86,61589	86,90948	86,93349
A=3	84,95782	86,00410	85,96265	86,64578	85,85699
A=3,5	84,75750	85,07556	85,47638	86,12837	85,58125

Figura 8.2: Rendimiento para P=10 bar y AVU

Para A=2,5 la tendencia es al alza cuanto más proporción de aceite hay, mientras que para las otras dos posiciones se registra un pico en el 30%. No se puede decir que ninguno de los dos comportamientos sea el esperado.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite girasol crudo (T=AGC)

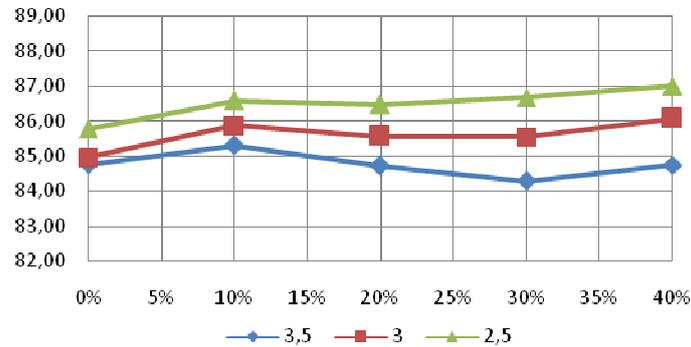


	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
AGC,P=10bar					
A=2,5	85,78101	86,12403	86,12667	85,99658	86,55684
A=3	84,95782	85,21916	85,20932	84,55915	85,58685
A=3,5	84,75750	84,49998	84,55733	84,08382	84,18637

Figura 8.3: Rendimiento para P=10 bar y AGC

La tendencia seguida con la composición es a la baja a partir del 20% de aceite, salvo dos picos producidos al 40% en las posiciones de admisión bajas.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite girasol refinado (T=AGR)



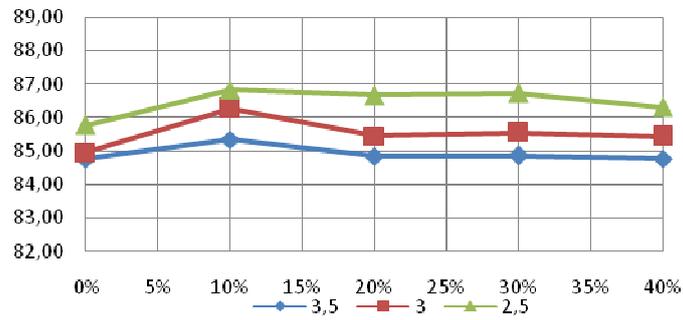
AGR,P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	85,78101	86,57629	86,46596	86,67902	87,00777
A=3	84,95782	85,86590	85,55985	85,54831	86,07825
A=3,5	84,75750	85,31293	84,72836	84,28067	84,74591

Figura 8.4: Rendimiento para P=10 bar y AGR

El comportamiento adoptado para el aceite de girasol refinado da como resultado algo parecido a los anteriores, con picos intermedios al 20% de proporción de aceite en peso y un pico final al 40% en todas. La posición de admisión de aire que más rendimiento ofrece sigue siendo la menor.

Puede compararse también el comportamiento del mismo aceite (girasol) estando crudo o refinado. Un análisis visual a ambas gráficas da como conclusión un comportamiento similar en ambos, pero con valores un poco por encima del aceite refinado. Esto se corrobora al observar la matriz de datos. Será interesante ver si dicha tendencia se cumple también entre el aceite de soja crudo y el refinado.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite soja crudo (T=ASC)

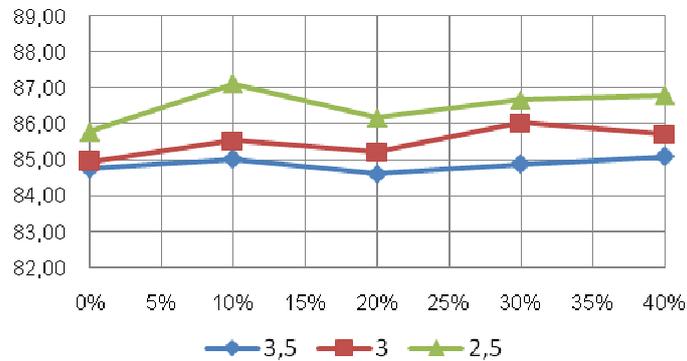


ASC,P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	85,78101	86,82392	86,66376	86,71840	86,31275
A=3	84,95782	86,26515	85,45227	85,55255	85,42969
A=3,5	84,75750	85,33888	84,83663	84,86387	84,76151

Figura 8.5: Rendimiento para P=10 bar y ASC

El comportamiento de este tipo de aceite se caracteriza, por tener mejores valores de rendimiento cuanto menor es la posición de la admisión del aire (como en los casos anteriores un pico en la composición 10%).

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite soja refinado (T=ASR)



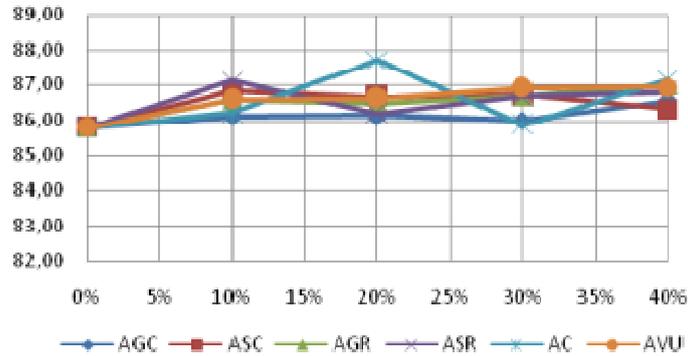
ASR, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	85,78101	87,12031	86,18329	86,67931	86,80579
A=3	84,95782	85,54243	85,21924	86,03372	85,72543
A=3,5	84,75750	85,02602	84,61271	84,88327	85,09721

Figura 8.6: Rendimiento para P=10 bar y ASR

En este caso el comportamiento alcanza picos ligeros al 10%, para después seguir una tendencia positiva para todas las posiciones de admisión. Asimismo, se obtienen mejores rendimientos cuanto menor es la admisión de aire.

Respecto al comportamiento frente al aceite crudo, se puede decir que el pico en el 10% de composición se mantiene, pero el comportamiento en las composiciones posteriores es al alza y no tan estable.

Representación gráfica del rendimiento para la admisión de aire 2,5 (A=2,5)

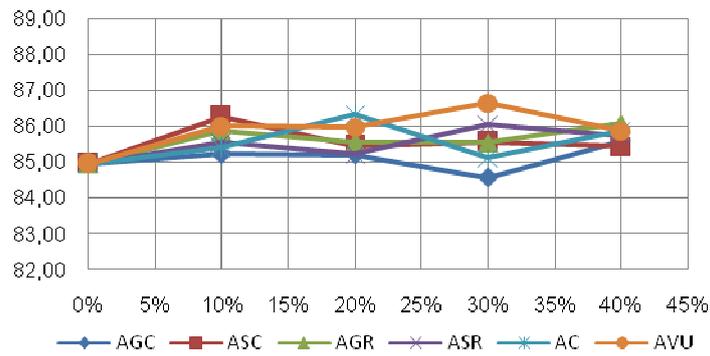


A=2,5,P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	85,78101	86,20404	87,68685	85,86875	87,14564
AVU	85,78101	86,58826	86,61589	86,90948	86,93349
AGC	85,78101	86,12403	86,12667	85,99658	86,55684
AGR	85,78101	86,57629	86,46596	86,67902	87,00777
ASC	85,78101	86,82392	86,66376	86,71840	86,31275
ASR	85,78101	87,12031	86,18329	86,67931	86,80579

Figura 8.7: Rendimiento para P=10 bar y A=2,5

En este gráfico puede comprobarse la tendencia según composición y tipo de aceite. Se observan “comportamientos extraños” en el ASR y en el AC, con picos seguidos de grandes valles, en lo que pudieron ser alteraciones en las medidas. La tendencia general es al alza en función del porcentaje de aceite, en contra de la idea inicial.

Representación gráfica del rendimiento para la admisión de aire 3 (A=3)

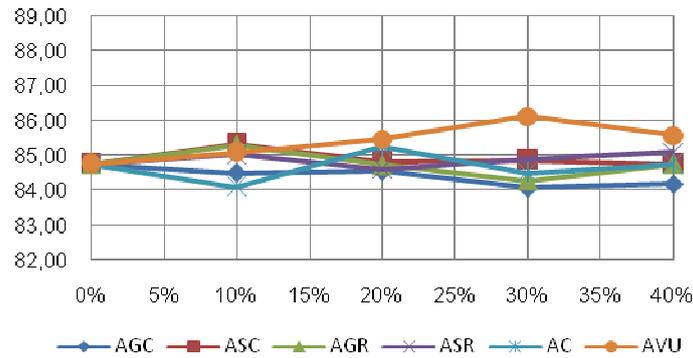


A=3,P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	84,95782	85,39181	86,31874	85,11291	85,85870
AVU	84,95782	86,00410	85,96265	86,64578	85,85699
AGC	84,95782	85,21916	85,20932	84,55915	85,58685
AGR	84,95782	85,86590	85,55985	85,54831	86,07825
ASC	84,95782	86,26515	85,45227	85,55255	85,42969
ASR	84,95782	85,54243	85,21924	86,03372	85,72543

Figura 8.8: Rendimiento para P=10 bar y A=3

En este caso pueden observarse picos de rendimiento para el 40% en varios aceites. No es posible hacer una descripción de la tendencia global seguida, no se ve una relación descriptible. A priori, es el aceite vegetal usado el que ofrece un rendimiento mayor en proporciones entre el 10 y el 30%.

Representación gráfica del rendimiento para la admisión de aire 3,5 (A=3,5)

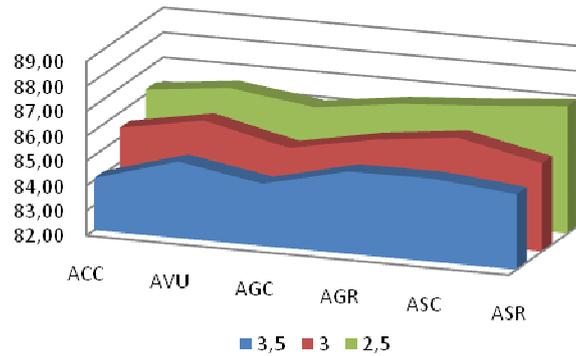


A=3,5,P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	84,75750	84,09968	85,25850	84,50137	84,74938
AVU	84,75750	85,07556	85,47638	86,12837	85,58125
AGC	84,75750	84,49998	84,55733	84,08382	84,18637
AGR	84,75750	85,31293	84,72836	84,28067	84,74591
ASC	84,75750	85,33888	84,83663	84,86387	84,76151
ASR	84,75750	85,02602	84,61271	84,88327	85,09721

Figura 8.9: Rendimiento para P=10 bar y A=3,5

Como en el caso anterior, el rendimiento más alto corresponde al aceite vegetal usado. El rendimiento del resto de aceites se mantiene en unos valores entre el 84 y el 85%.

Representación gráfica del rendimiento para porcentaje de aceite del 10% (X=10%)



X=10%,P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	86,20404	86,58826	86,12403	86,57629	86,82392	87,12031
A=3	85,39181	86,00410	85,21916	85,86590	86,26515	85,54243
A=3,5	84,09968	85,07556	84,49998	85,31293	85,33888	85,02602

Figura 8.10: Rendimiento para P=10 bar y X=10%

Puede observarse, para este porcentaje de aceite, que el AVU, el ASC y el ASR tienen rendimientos mayores. Para esta proporción, los peores aceites son con diferencia el ACC y el AGC. El AGR, sin embargo, tiene un rendimiento superior (casi 0,5% más en cada posición de aire).

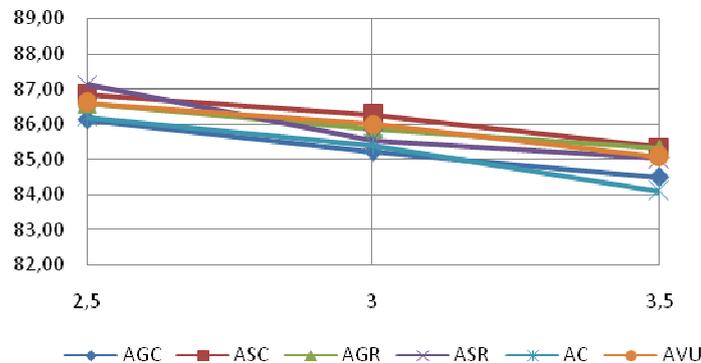
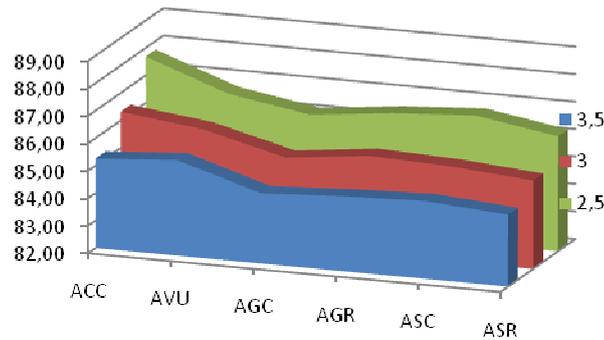


Figura 8.11: Rendimiento para P=10 bar y X=10%

Se ha variado la disposición de los ejes respecto a la gráfica anterior para poder apreciar mejor el comportamiento de cada combustible frente a la variación de la admisión de aire. Vuelve a quedar de manifiesto el peor comportamiento de ACC y AGC. No hay diferencia significativas en el resto (la conclusión es la misma de antes).

El comportamiento es lógico: la admisión de más aire provoca una caída (en algunos casos mayores y en otros menores) en el rendimiento.

Representación gráfica del rendimiento para porcentaje de aceite del 20% (X=20%)



X=20%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	87,68685	86,61589	86,12667	86,46596	86,66376	86,18329
A=3	86,31874	85,96265	85,20932	85,55985	85,45227	85,21924
A=3,5	85,25850	85,47638	84,55733	84,72836	84,83663	84,61271

Figura 8.12: Rendimiento para P=10 bar y X=20%

Al contrario que en la proporción 10%, en la de 20% el mejor comportamiento parece tenerlo el ACC con diferencia. El rendimiento del resto de combustibles se mantiene en la horquilla de 84,5 y 86,6%, manteniéndose el del ACC por encima salvo en A=3,5. Los peores rendimientos, para todas las posiciones de admisión, vienen dados para el AGC seguido de cerca por el ASR. Al contrario que la teoría inicial, en este caso el ASR obtiene peores valores que el ASC.

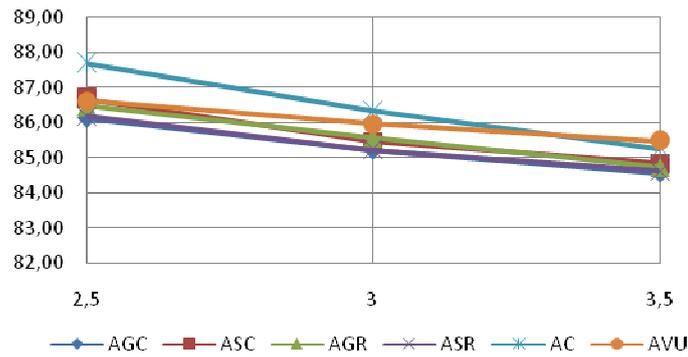
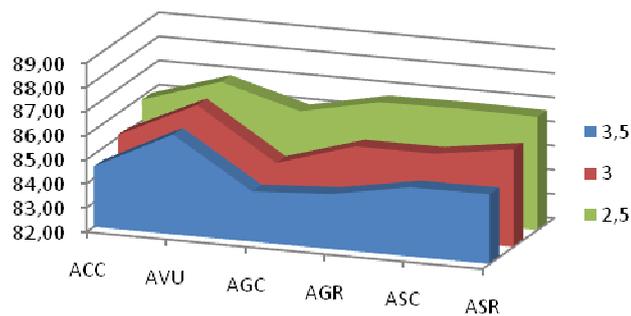


Figura 8.13: Rendimiento para P=10 bar y X=20%

Al igual que en la gráfica anterior se observa como el aceite de colza supera en rendimiento a los demás y la tendencia de disminución del rendimiento al aumentar el aire.

Representación gráfica del rendimiento para porcentaje de aceite del 30% (X=30%)



X=30%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	85,86875	86,90948	85,99658	86,67902	86,71840	86,67931
A=3	85,11291	86,64578	84,55915	85,54831	85,55255	86,03372
A=3,5	84,50137	86,12837	84,08382	84,28067	84,86387	84,88327

Figura 8.14: Rendimiento para P=10 bar y X=30%

Comentario:

En este caso se ve claramente como el AGC ofrece peores valores para cualquier posición de aire, superado para mal por el AC para A=2,5

(únicamente en ese valor, en el resto el ACC cumple). Estos valores son superados por el AVU claramente, sobre todo para las posiciones de admisión A=3 y A=3,5.

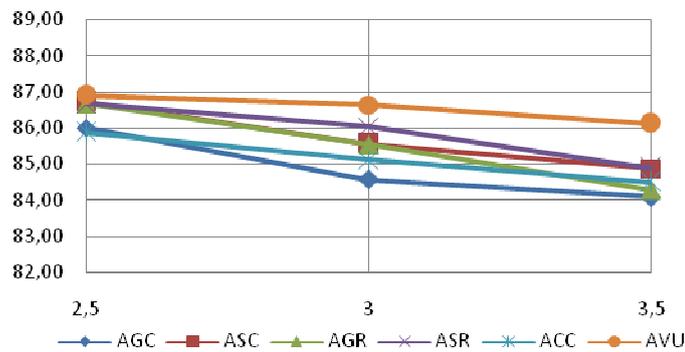
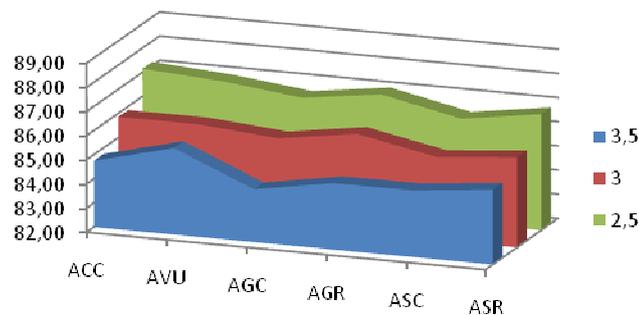


Figura 8.15: Rendimiento para P=10 bar y X=30%

Nuevamente se constatan los resultados anteriores, con un rendimiento superior del AVU en cada posición del aire. En este gráfico se aprecia mejor el buen comportamiento del ASR, y el mal comportamiento del AGC y del ACC cuando aumentamos el valor de las admisiones de aire.

Representación gráfica del rendimiento para porcentaje de aceite del 40% (X=40%)



X=40%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	87,14564	86,93349	86,55684	87,00777	86,31275	86,80579
A=3	85,85870	85,85699	85,58685	86,07825	85,42969	85,72543
A=3,5	84,74938	85,58125	84,18637	84,74591	84,76151	85,09721

Figura 8.16: Rendimiento para P=10 bar y X=40%

Al contrario que en las proporciones anteriores, los valores de rendimiento no ofrecen grandes diferencias de un aceite a otro: para $A=2,5$, los valores están repartidos entre 86,3 y 87%, para $A=3$ entre 85,4 y 86%. Se tiene sin embargo que para $A=3,5$ los valores registrados ofrecen unos picos mayores (llega a haber 1,4% de diferencia entre el mayor y el menor).

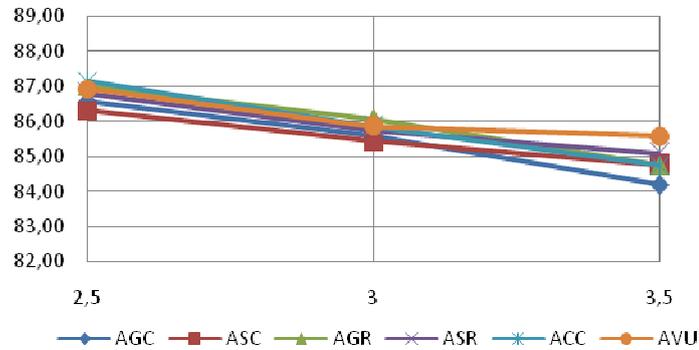


Figura 8.17: Rendimiento para $P=10$ bar y $X=40\%$

Por aceites, queda claro que el AVU, tal y como se veía en los picos de la gráfica anterior, ofrece un mejor rendimiento cuando varía la admisión de aire. Puede apreciarse, a su vez, que los aceites crudos (girasol y soja), ofrecen peor comportamiento para esta concentración.

8.3.1.1. Conclusiones

Una vez analizado el comportamiento de cada aceite, puede decirse que el mejor rendimiento ofrecido en conjunto se da para el **aceite de colza al 20% (87,686%)**. Los mejores rendimientos se dan, en todos los casos, para la posición de aire inferior, siendo éste el factor más determinante en todas las gráficas, por encima del tipo de aceite y de su porcentaje, tal y como anunciaba el ANOVA.

Los máximos registrados están todos por encima del 86,5%, siendo los mínimos registrados todos superiores al 84%. El rango de variación por tanto, entre condiciones tan distintas como las que se han estudiado, es del 2,5% entre unas y otras.

Las gráficas mostradas anteriormente denotan comportamientos heterogéneos entre aceites. En algunos casos, el aumento en la

proporción de aceite da como resultado un aumento del rendimiento (ASR y AGR muestran esta tendencia claramente), y en otros casos se tiene un comportamiento opuesto (AC a partir del 20% y ASC). El comportamiento lógico, a priori, sería el de la disminución del rendimiento cuanto más aceite contuviese la mezcla. Sin embargo, tal y como mostraba el ANOVA, existe una influencia grande de la interacción TxX, la cual hace que la tendencia no sea única y dependa de qué aceite y en qué proporción.

Casi todos los valores del rendimiento para A=2,5 están por encima de 86%, siendo el mínimo de 85,868% (T=AC y X=30%) y el máximo de 87,68% (T=AC y X=20%). Para A=3, los valores disminuyen alrededor de un 1%, siendo el mínimo de 84,55% (T=AGC y X=30%) y el máximo de 86,64% (T=AVU y X=30%). Para A=3,5, los valores vuelven lógicamente a disminuir, con pocos valores superando el 85%; el máximo está en 86,12%(T=AVU y X=30%), valor muy por encima del resto de la tabla, y el mínimo está en 84,08% (T=AGC y X=30%)

8.3.2. Análisis del rendimiento para p=12bar

Se muestra a continuación la matriz de resultados obtenidos:

Tabla 8.4 Matriz de resultados

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Posición de admisión (A)	3	85,67166	85,62367	86,50534	86,06105	ACC	Tipo de aceite (T)
	3,5	85,25447	85,37386	85,13115	85,15520		
	4	84,79685	84,64962	84,47890	84,49190		
	3	85,92039	86,22665	86,95030	86,17884	AVU	
	3,5	85,31938	85,36382	86,17902	85,48600		
	4	84,57921	84,63503	85,15908	84,79316		
	3	85,08651	85,54405	85,36379	85,25109	AGC	
	3,5	84,53117	84,91404	84,61684	84,37155		
	4	83,79556	83,91450	83,93594	83,46613		
	3	86,07480	86,21062	86,32134	85,95756	AGR	
	3,5	85,20370	85,29936	85,52949	85,26327		
	4	84,52613	84,47762	84,78604	84,42681		
3	85,65936	85,87148	85,42698	85,55944	ASC		
3,5	85,44875	85,35542	85,07000	84,86249			
4	84,86879	84,69476	84,61906	84,39431			
3	85,55046	85,26148	85,55180	85,59775	ASR		
3,5	85,03464	84,67927	84,89123	84,77345			
4	84,62512	84,17794	84,13771	84,09999			
		Presión de inyección: 12 bar					

Se plantea el análisis de varianza como se planteó en el estudio de P=10 bar. La tabla de los resultados es la siguiente:

Tabla 8.6 Análisis ANOVA

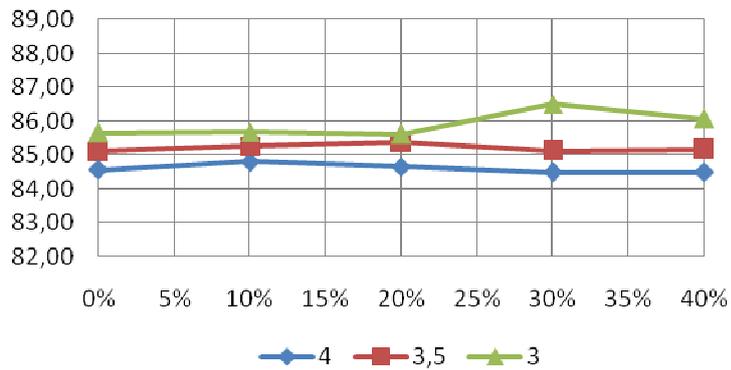
FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
A	2	22,54554	11,27277	502,64949	3,31583	SI	8,5277E-24
T	5	7,69568	1,53914	68,62960	2,53355	SI	1,65986E-15
X	3	0,56190	0,18730	8,35162	2,92228	SI	0,000347139
AxT	10	0,56405	0,05640	2,51507	2,16458	SI	0,024808364
AxX	6	0,29625	0,04937	2,20161	2,42052	NO	0,070540265
TxX	15	1,73000	0,11533	5,14268	2,01480	SI	6,92604E-05
Error	30	0,672801	0,022427				
Total	71	34,066214					

La interpretación es la siguiente: con un análisis al 5% de confiabilidad, tenemos que la única variable que ha sido rechazada en el análisis ANOVA es la interacción entre la admisión del aire y el porcentaje de aceite en la mezcla. Sin embargo, se tiene que el grado de confiabilidad crítica para el estadístico F que nos ha resultado sería del 7%: se puede decir que no está tan lejos de ser una variable significativa.

Sin embargo, aunque se diga que menos una el resto de variables son significativas, no lo son en la misma medida. En este caso, el grado de admisión de aire vuelve a ser la variable más significativa, con un grado de confiabilidad del orden de 10^{-22} ; en este caso además se tiene que la variable T o tipo de aceite de la mezcla también tiene un grado de confiabilidad muy bajo, del orden de 10^{-13} . En orden, la siguiente variable más significativa es la interacción TxX, luego X y por último AxT.

A priori, serán las variables A y T las que marquen principalmente el comportamiento dentro de las gráficas que a continuación se exponen.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de colza crudo
(T=ACC)

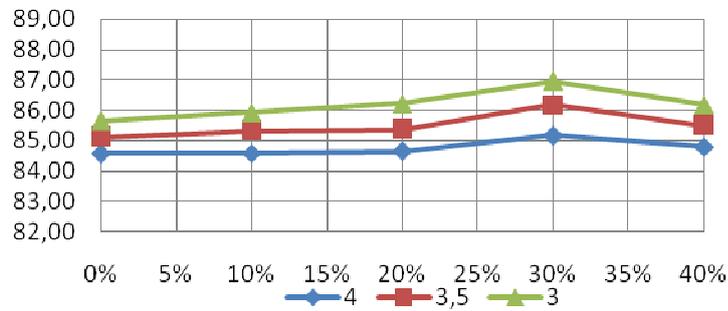


AC, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	85,78101	85,67166	85,62367	86,50534	86,06105
A=3,5	84,95782	85,25447	85,37386	85,13115	85,15520
A=4	84,75750	84,79685	84,64962	84,47890	84,49190

Figura 8.18: Rendimiento para P=12 bar y T=ACC

Vuelve a observarse la tendencia existente en cuanto a la posición de admisión de aire. En este caso, los valores resultantes apenas varían poco, teniéndose un pico para la posición de admisión más favorable al 30% (86,5%).

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite vegetal usado (T=AVU)

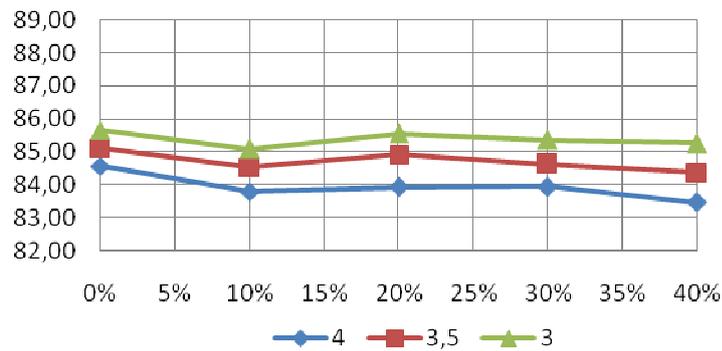


AVU, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	85,78101	85,92039	86,22665	86,95030	86,17884
A=3,5	84,95782	85,31938	85,36382	86,17902	85,48600
A=4	84,75750	84,57921	84,63503	85,15908	84,79316

Figura 8.19: Rendimiento para P=12 bar y T=AVU

Se observa una tendencia al alza hasta el 30%, observándose una caída en los valores de rendimiento para más cantidad de aceite

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de girasol crudo
(T=AGC)

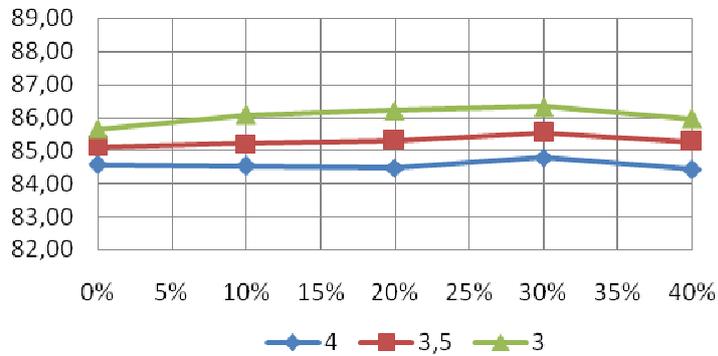


AGC, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	85,78101	85,08651	85,54405	85,36379	85,25109
A=3,5	84,95782	84,53117	84,91404	84,61684	84,37155
A=4	84,75750	83,79556	83,91450	83,93594	83,46613

Figura 8.20: Rendimiento para P=12 bar y T=AGC

Se tiene un pico de rendimiento en X=20%, descendiendo los valores aunque no de manera muy significativa. En este caso, la tabla de datos muestra bien escalonados los valores de rendimiento obtenidos, con valores de 85, 84 y 83% para las sucesivas posiciones de la admisión de aire.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de girasol refinado (T=AGR)

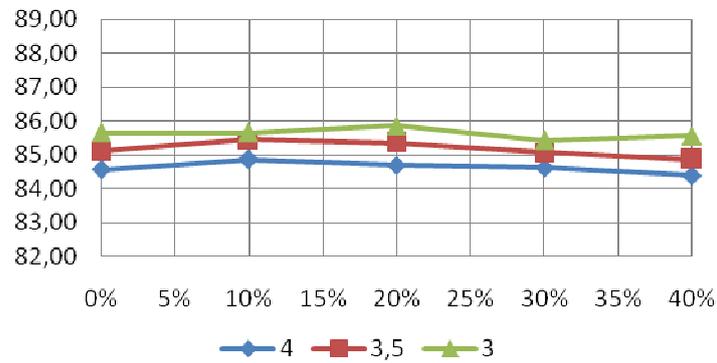


AGR, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	85,78101	86,07480	86,21062	86,32134	85,95756
A=3,5	84,95782	85,20370	85,29936	85,52949	85,26327
A=4	84,75750	84,52613	84,47762	84,78604	84,42681

Figura 8.21: Rendimiento para P=12 bar y T=AGR

Por otro lado, los valores que se obtienen variando X del 10% al 40% apenas difieren un 0,4% en el rendimiento, resultando por tanto poca diferencia al aumentar el porcentaje de aceite.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de soja crudo (T=ASC)

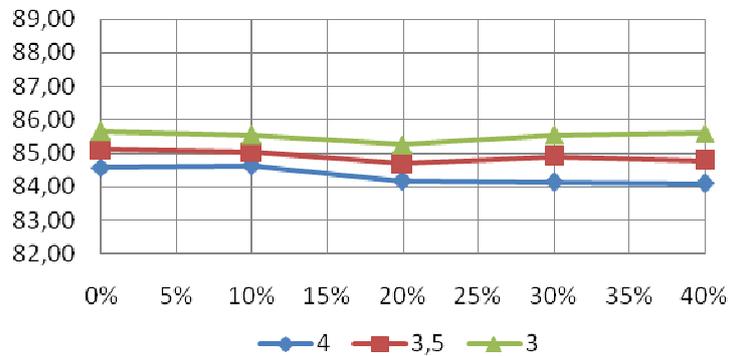


ASC, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	85,78101	85,65936	85,87148	85,42698	85,55944
A=3,5	84,95782	85,44875	85,35542	85,07000	84,86249
A=4	84,75750	84,86879	84,69476	84,61906	84,39431

Figura 8.22: Rendimiento para P=12 bar y T=ASC

Vuelven a mostrarse pocas diferencias entre valores de X (para A=3, apenas varía 3 décimas). Comportamiento opuesto con la variable admisión de aire, diferenciándose claramente en el gráfico el escalonamiento existente (en la tabla de datos no resulta tan evidente).

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de soja crudo (T=ASR)

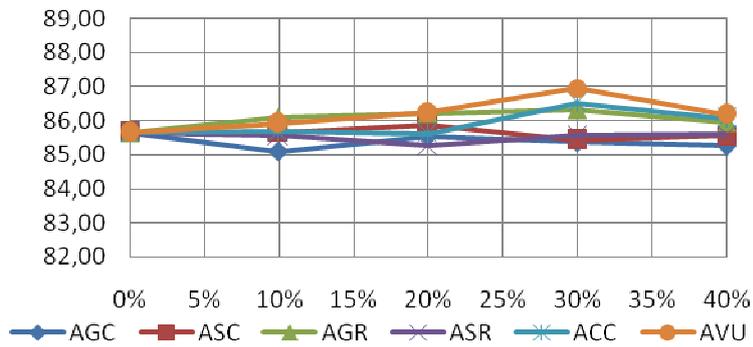


ASR, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	85,78101	85,55046	85,26148	85,55180	85,59775
A=3,5	84,95782	85,03464	84,67927	84,89123	84,77345
A=4	84,75750	84,62512	84,17794	84,13771	84,09999

Figura 8.23: Rendimiento para P=12 bar y T=ASR

Puede observarse un bajón en todos los rendimientos para la concentración X=20%. Sin embargo, aparte de dichos datos para X=20%, para A=3 y A=3,5 los datos apenas varían de una concentración alta a una baja. En el caso de A=4, el bajón existe pero se mantiene en esos valores para X=30 y 40%.

Representaciones gráficas del rendimiento para la posición del aire A=3

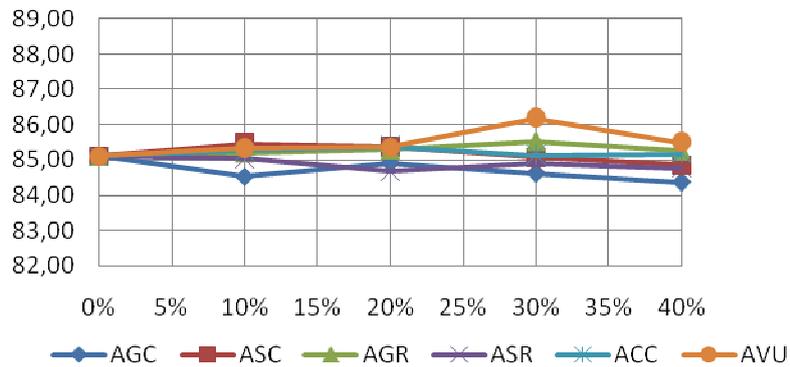


A=3, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	85,78101	85,67166	85,62367	86,50534	86,06105
AVU	85,78101	85,92039	86,22665	86,95030	86,17884
AGC	85,78101	85,08651	85,54405	85,36379	85,25109
AGR	85,78101	86,07480	86,21062	86,32134	85,95756
ASC	85,78101	85,65936	85,87148	85,42698	85,55944
ASR	85,78101	85,55046	85,26148	85,55180	85,59775

Figura 8.24: Rendimiento para P=12 bar y A=3

Viendo los gráficos y los datos se aprecia que los aceites de soja, ASC y ASR, y el AGC, obtienen los peores rendimientos en estas condiciones, dando el AVU los mejores de nuevo.

Representaciones gráficas del rendimiento para la posición del aire A=3,5

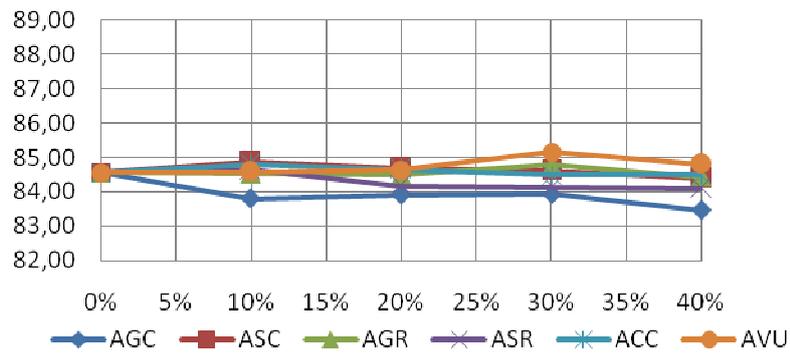


A=3,5, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	84,95782	85,25447	85,37386	85,13115	85,15520
AVU	84,95782	85,31938	85,36382	86,17902	85,48600
AGC	84,95782	84,53117	84,91404	84,61684	84,37155
AGR	84,95782	85,20370	85,29936	85,52949	85,26327
ASC	84,95782	85,44875	85,35542	85,07000	84,86249
ASR	84,95782	85,03464	84,67927	84,89123	84,77345

Figura 8.25: Rendimiento para P=12 bar y A=3,5

La tendencia con respecto al caso anterior es a la baja, tal y como se esperaba. Vuelve a ser el AVU el que ofrece el máximo, si bien puede decirse que se trata de un máximo aislado. El AGC ofrece los peores valores de rendimiento en general, seguido por el ASR.

Representaciones gráficas del rendimiento para la posición del aire A=4

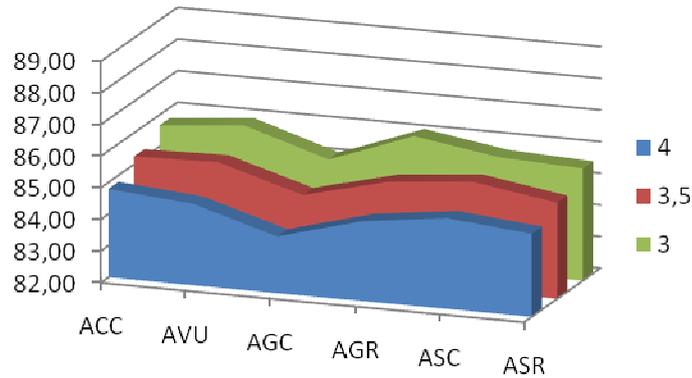


A=4, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
AC	84,75750	84,79685	84,64962	84,47890	84,49190
AVU	84,75750	84,57921	84,63503	85,15908	84,79316
AGC	84,75750	83,79556	83,91450	83,93594	83,46613
AGR	84,75750	84,52613	84,47762	84,78604	84,42681
ASC	84,75750	84,86879	84,69476	84,61906	84,39431
ASR	84,75750	84,62512	84,17794	84,13771	84,09999

Figura 8.26: Rendimiento para P=12 bar y A=4

Se observa una caída general en el rendimiento en comparación con los dos anteriores gráficos (y tablas). Se llega al 83% en el AGC, cuando para A=3 ningún valor para dicho aceite bajaba del 85%. El peor comportamiento vuelve a darlo el AGC, seguido por el ASR.

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje en peso de aceite X=10%



X=10%, P=12bar	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	85,67166	85,92039	85,08651	86,07480	85,65936	85,55046
A=3,5	85,25447	85,31938	84,53117	85,20370	85,44875	85,03464
A=4	84,79685	84,57921	83,79556	84,52613	84,86879	84,62512

Figura 8.27: Rendimiento para P=12 bar y X=10%

Se ve la tendencia seguida por todos los aceites y la dependencia con la posición de admisión del aire. Queda claro que, para este porcentaje, el AGC ofrece los peores rendimientos.

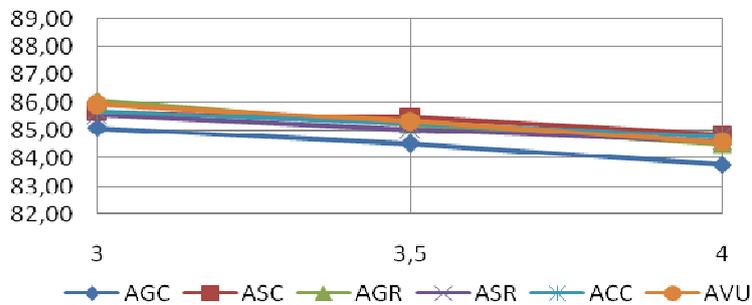
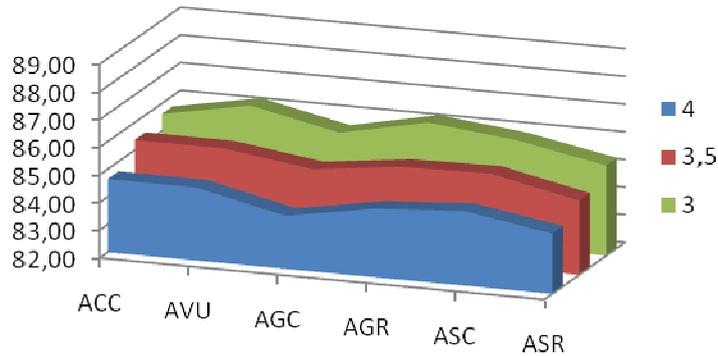


Figura 8.28: Rendimiento para P=12 bar y X=10%

Como demostraba el gráfico anterior, éste demuestra que los mejores rendimientos los ofrecen AGR y AVU, con valores alrededor del 86%. El resto de aceites siguen todas unas tendencias similares con valores entre el 85,5 y el 84,5%.

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje en peso de aceite X=20%



X=20%, P=12bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	85,62367	86,22665	85,54405	86,21062	85,87148	85,26148
A=3,5	85,37386	85,36382	84,91404	85,29936	85,35542	84,67927
A=4	84,64962	84,63503	83,91450	84,47762	84,69476	84,17794

Figura 8.29: Rendimiento para P=12 bar y X=20%

Como en el gráfico anterior, queda demostrado que el AGC es la que peores rendimientos ofrece. También el ASR ofrece rendimientos bajos, peores incluso que su equivalente cruda. Los picos obtenidos corresponden al AVU y al AGR.

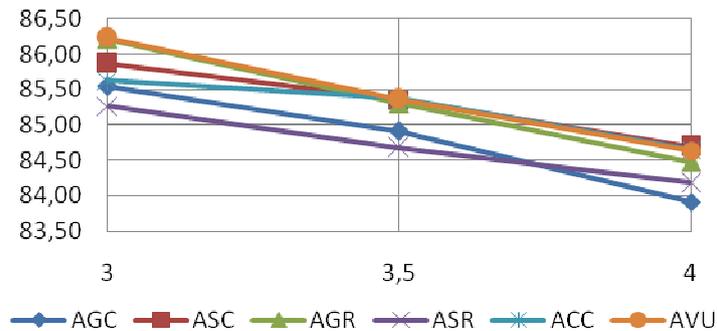
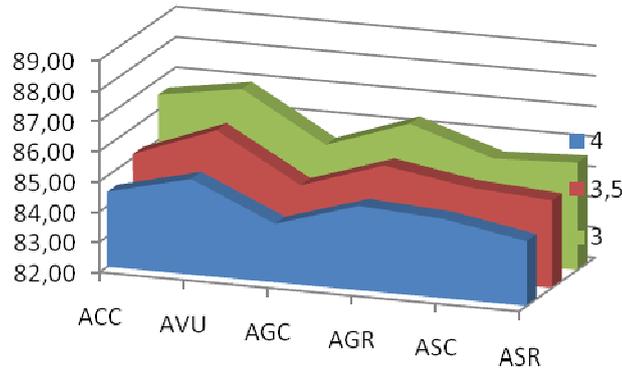


Figura 8.30: Rendimiento para P=12 bar y X=20%

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje en peso de aceite X=30%



X=30%, P=12bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	86,50534	86,95030	85,36379	86,32134	85,42698	85,55180
A=3,5	85,13115	86,17902	84,61684	85,52949	85,07000	84,89123
A=4	84,47890	85,15908	83,93594	84,78604	84,61906	84,13771

Figura 8.31: Rendimiento para P=12 bar y X=30%

Como antes, el AGC ofrece los peores resultados, seguido de cerca por el ASR. El AVU vuelve a registrar los mejores rendimientos.

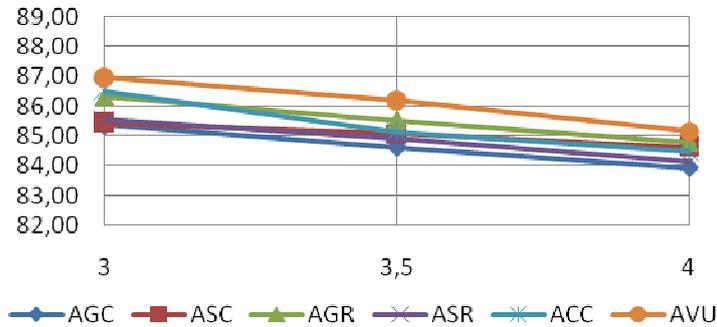
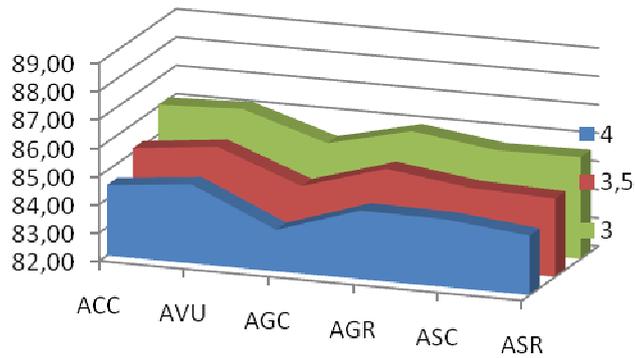


Figura 8.32: Rendimiento para P=12 bar y X=30%

Esta gráfica lo muestra muy claramente: mejores valores en el AVU, valores muy inferiores en el AGC y el ASR.

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje en peso de aceite X=40%



X=40%, P=12bar	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	86,06105	86,17884	85,25109	85,95756	85,55944	85,59775
A=3,5	85,15520	85,48600	84,37155	85,26327	84,86249	84,77345
A=4	84,49190	84,79316	83,46613	84,42681	84,39431	84,09999

Figura 8.33: Rendimiento para P=12 bar y X=40%

Sigue la tendencia de los porcentajes anteriores: el AGC ofrece los peores rendimientos y el AVU y el AGR los mejores.

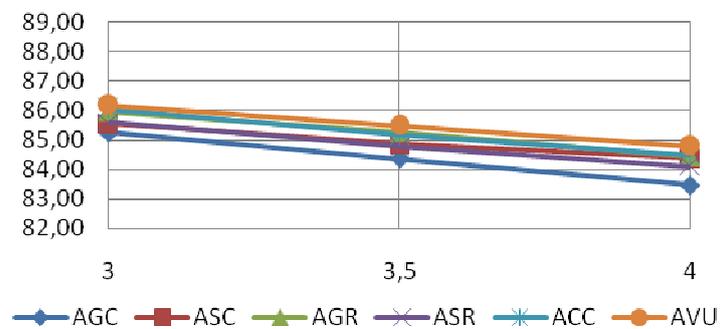


Figura 8.34: Rendimiento para P=12 bar y X=40%

8.3.2.1. Conclusiones

Las gráficas para todos los tipos de aceite muestran el comportamiento anunciado anteriormente (ya visto para $P=10$ bar): cae el rendimiento a medida que aumenta la posición de la admisión de aire. El máximo obtenido es 86,95% y se tiene para AVU, $X=30\%$ y $A=3$. El mínimo es 83,46% y se consigue para AGC, $X=40\%$ y $A=4$.

Los máximos obtenidos para cada tipo de aceite son 86,5% (ACC), 86,95% (AVU), 85,44% (AGC), 86,32% (AGR), 85,87% (ASC) y 85,59% (ASR), siendo la mayoría obtenidos para un porcentaje del 30% y en $A=3$. Los mínimos globales se obtienen para el AGC y la posición más desfavorable de admisión del aire, siendo los únicos valores de este ensayo por debajo del 84%.

Vista la serie de gráficas para $A=$ constante, queda contrastada la caída que sufre el rendimiento cuando aumenta el caudal de aire que se introduce en la caldera. Los valores obtenidos para $A=3$ están alrededor del 86%, para $A=3,5$ alrededor del 85,5% y para $A=4$ alrededor del 85%.

La primera gráfica de cada análisis a $X=$ constante muestra de nuevo la importancia de la posición de la admisión del aire: no se tiene, ni en este ni en otro estudio, ningún máximo en ninguna posición de admisión de aire que no sea la mínima. La segunda gráfica de cada análisis es más interesante ya que muestra la evolución de cada tipo de combustible con el aire de admisión (no en vano, el tipo de combustible es la segunda variable más significativa). Cada tipo de aceite merece un estudio individual:

- El AVU vuelve a mostrar el mejor comportamiento del estudio, ofreciendo los máximos para casi todos los porcentajes de sustitución y posiciones de admisión del aire. Así, la conclusión es que se trata del combustible más válido.
- El AGR se revela como un buen combustible también. No da tan buenos rendimientos como el AVU, pero se queda cerca, siendo su comportamiento ligeramente inferior.
- El AGC, sin embargo, es el combustible que peor rendimiento ofrece a lo largo de todo este estudio. En el caso del aceite de girasol queda comprobado el efecto del refino, ya que mejora claramente las prestaciones que ofrece como combustible.
- La diferencia en el refino para el aceite de soja no es tan acusada como lo es para el de girasol. De hecho, los valores registrados son mejores en algunos casos para el aceite sin refinar.
- El AC da buenos resultados con la posición mínima de admisión de aire: prestando atención a los segundos gráficos para cada porcentaje,

y observando los datos en las tablas, se ve que sufre un descenso de rendimiento acusado, pasando de tener un rendimiento cerca de los mejores para A=3 a estar lejos de los mismos para A=4.

8.5.1. Análisis del rendimiento para p=14 bar.

Se muestra a continuación la matriz de resultados obtenidos:

Tabla 8.7 Matriz de resultados para P=14bar

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Posición de admisión (A)	3,5	85,35376	85,31776	85,21601	85,09748	ACC	Tipo de aceite (T)
	4	84,83856	84,69706	84,53334	84,41408		
	4,5	84,16441	83,90645	83,66133	83,60630		
	3,5	85,21401	85,47098	85,73066	85,66534	AVU	
	4	84,69014	84,91730	85,27404	84,90528		
	4,5	83,96161	84,38237	84,68806	84,99401		
	3,5	84,37523	84,96797	84,62167	84,64092	AGC	
	4	83,70988	84,09857	84,12224	83,95744		
	4,5	83,22246	83,41445	83,26727	83,07591		
	3,5	85,28721	85,46820	85,61041	85,36982	AGR	
	4	84,40975	84,51075	85,04085	84,85789		
	4,5	83,82135	83,84999	84,12749	84,05208		
	3,5	85,41063	85,20037	85,22901	84,57592	ASC	
	4	84,80435	84,60657	84,58320	84,11409		
	4,5	84,21353	83,98145	83,99638	83,63639		
3,5	85,15540	84,96268	85,06103	84,70187	ASR		
4	84,25931	84,36741	84,34485	84,18875			
4,5	83,70127	83,67866	83,48797	83,43769			
		Presión de inyección: 14 bar					

Se plantea el análisis de varianza como se planteó en el estudio de P=10 bar. La tabla de los resultados es la siguiente:

Tabla 8.8 Análisis ANOVA para P=14bar

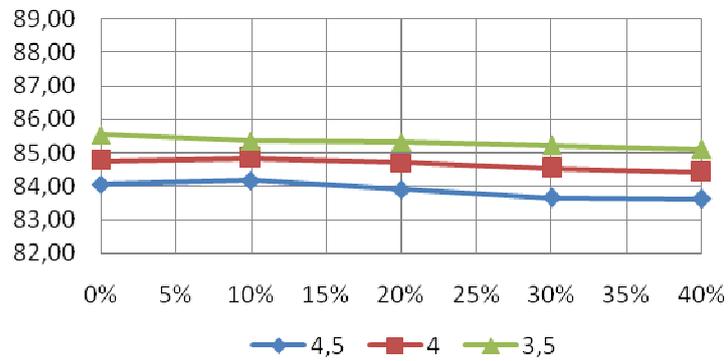
FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
A	2	20,510231	10,255116	718,09703	3,31583	SI	4,61261E-26
T	5	7,576134	1,515227	106,10118	2,53355	SI	3,86453E-18
X	3	0,347284	0,115761	8,10599	2,92228	SI	0,000421868
AxT	10	0,363858	0,036386	2,54785	2,16458	NO	0,023246008
AxX	6	0,092286	0,015381	1,07703	2,42052	NO	0,398138093
TxX	15	2,134959	0,142331	9,96646	2,01480	SI	7,15199E-08
Error	30	0,428429	0,014281				
Total	71	31,453181					

La interpretación es la siguiente: con un análisis al 5% de confiabilidad, tenemos que las variables rechazadas por el análisis ANOVA son las interacciones aire-tipo de aceite y aire-porcentaje de aceite. Dichas variables son rechazadas ampliamente por el análisis (el grado de confiabilidad sería altísimo, del orden del 79% uno y del 47% otro, muy lejos del 5% que se elige habitualmente).

Las medidas, como en los análisis anteriores, no dan un mismo grado de significación. Se vuelve a tener que la variable más significativa es la posición de la admisión del aire (orden de 10^{-24}), seguida del tipo de aceite (orden de 10^{-16}). También es muy grande la influencia de la interacción T-X (orden de 10^{-6}). Las siguiente en orden de importancia es el porcentaje de aceite, pero es de un orden de influencia mucho menor que las anteriores.

Al igual que en el análisis anterior, serán las variables A y T las que marquen la diferencia en el comportamiento de la combustión.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de colza crudo (T=ACC)

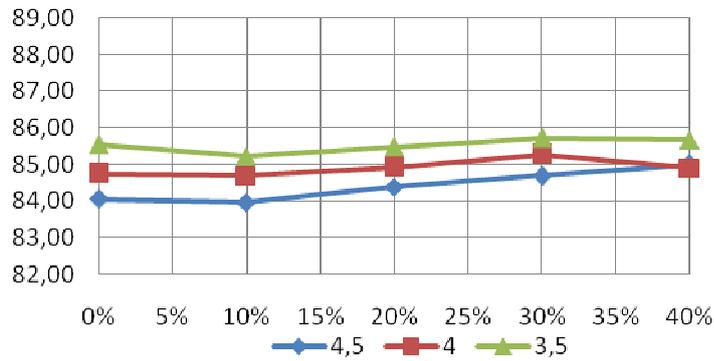


AC, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	85,78101	85,35376	85,31776	85,21601	85,09748
A=4	84,95782	84,83856	84,69706	84,53334	84,41408
A=4,5	84,75750	84,16441	83,90645	83,66133	83,60630

Figura 8.35: Rendimiento para P=14 bar y ACC

Se aprecia una tendencia a la baja, tanto con la apertura de la admisión de aire como con el aumento del porcentaje de aceite. Se aprecia que el descenso de rendimiento es casi lineal a posición de admisión constante.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite vegetal usado (T=AVU).

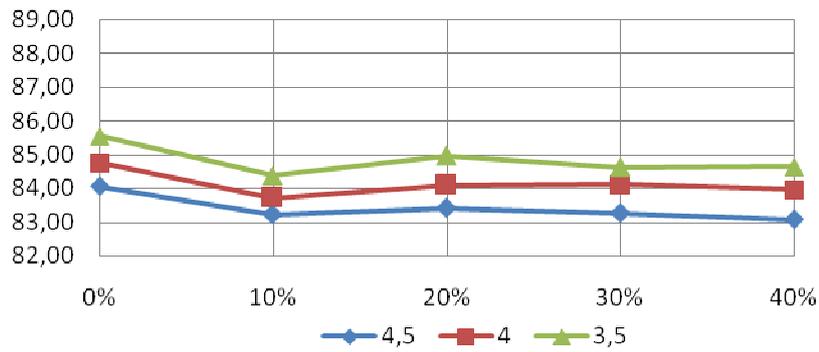


AVU, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	85,78101	85,21401	85,47098	85,73066	85,66534
A=4	84,95782	84,69014	84,91730	85,27404	84,90528
A=4,5	84,75750	83,96161	84,38237	84,68806	84,99401

Figura 8.36: Rendimiento para P=14 bar y AVU

Como en los análisis anteriores, el rendimiento del AVU sufre una subida hasta X=30%, en el cual se tienen los picos de rendimiento para las tres posiciones de admisión.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de girasol crudo (T=AGC)

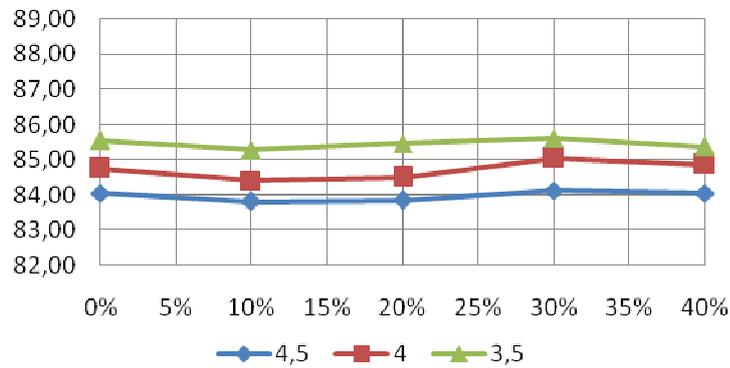


AGC, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	85,78101	84,37523	84,96797	84,62167	84,64092
A=4	84,95782	83,70988	84,09857	84,12224	83,95744
A=4,5	84,75750	83,22246	83,41445	83,26727	83,07591

Figura 8.37: Rendimiento para P=14 bar y AGC

En este caso, el pico se alcanza para X=20%, si bien la tendencia es bastante constante para todas las posiciones de admisión de aire para X's mayores a ese 20%.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de girasol refinado (T=AGR).

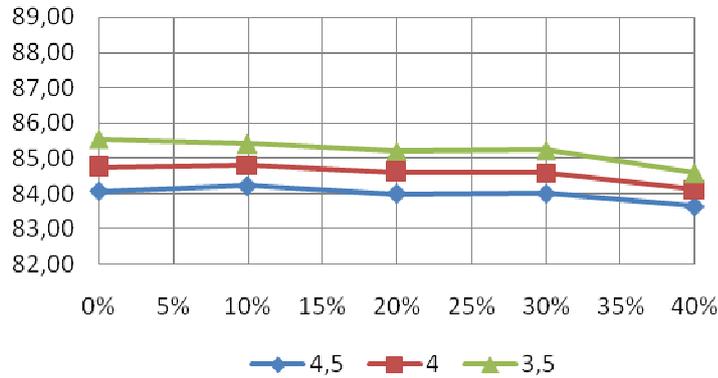


AGR, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	85,78101	85,28721	85,46820	85,61041	85,36982
A=4	84,95782	84,40975	84,51075	85,04085	84,85789
A=4,5	84,75750	83,82135	83,84999	84,12749	84,05208

Figura 8.38: Rendimiento para P=14 bar y AGR

El AGR sigue un comportamiento parecido al AGC, con un pico intermedio en la posición X=20%. Tal y como hemos visto hasta ahora, las prestaciones que ofrece el aceite refinado son superiores a la del crudo.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de soja crudo (T=ASC).

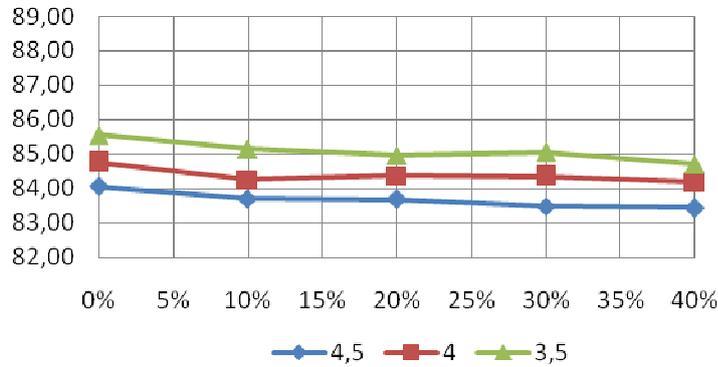


ASC, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	85,78101	85,41063	85,20037	85,22901	84,57592
A=4	84,95782	84,80435	84,60657	84,58320	84,11409
A=4,5	84,75750	84,21353	83,98145	83,99638	83,63639

Figura 8.39: Rendimiento para P=14 bar y ASC

El máximo se obtiene en este caso para el porcentaje mínimo de aportación de aceite (no se considera el 0% ya que es gasoil puro). Se sigue una tendencia negativa a medida que aumenta el porcentaje de aceite para todas las posiciones de admisión del aire, si bien las diferencias entre el 20 y el 30% de aceite son apenas imperceptibles.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de soja crudo (T=ASC).

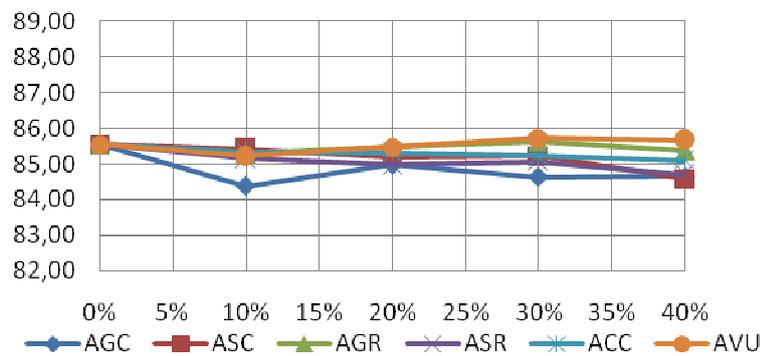


ASR, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	85,78101	85,15540	84,96268	85,06103	84,70187
A=4	84,95782	84,25931	84,36741	84,34485	84,18875
A=4,5	84,75750	83,70127	83,67866	83,48797	83,43769

Figura 8.40: Rendimiento para P=14 bar y ASR

Para el ASR, tenemos el máximo en el 10% de aceite. Siendo éste el máximo, el comportamiento del aceite varía muy levemente del 10% al 40% (no llega al 0,5%) para las tres posiciones de admisión de aire. Por otra parte, vuelve a darse el comportamiento inverso al conocido hasta ahora: el aceite crudo vuelve a dar mejores resultados que el refinado.

Representaciones gráficas del rendimiento para la admisión del aire A=3,5

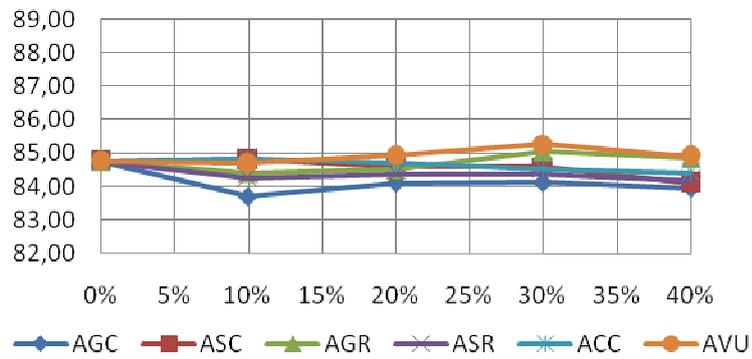


A=3,5, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
AC	85,78101	85,35376	85,31776	85,21601	85,09748
AVU	85,78101	85,21401	85,47098	85,73066	85,66534
AGC	85,78101	84,37523	84,96797	84,62167	84,64092
AGR	85,78101	85,28721	85,46820	85,61041	85,36982
ASC	85,78101	85,41063	85,20037	85,22901	84,57592
ASR	85,78101	85,15540	84,96268	85,06103	84,70187

Figura 8.41: Rendimiento para P=14 bar y A=3,5

El gráfico y la tabla de datos muestran los mejores rendimientos posibles para esta presión. Como hemos visto en el análisis anterior, el máximo lo consigue el AVU. Podíamos decir que es la que mejores prestaciones tiene junto con el AGR. Vuelve a destacar la inferioridad en rendimiento del ASR frente al ASC. Por otra parte, y como se observa en primer término en la gráfica, el peor comportamiento vuelve a tenerle el AGC.

Representaciones gráficas del rendimiento para la admisión del aire A=4

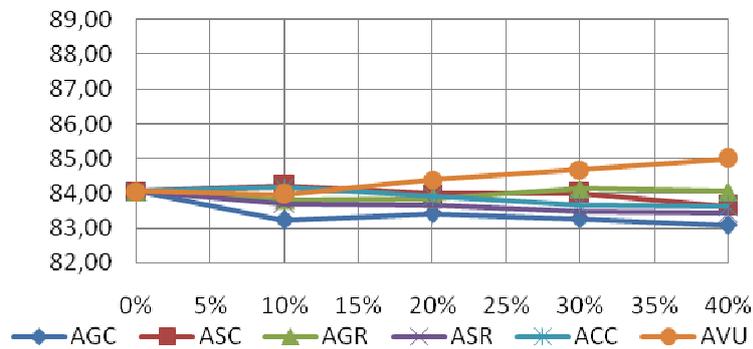


A=4, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
AC	84,95782	84,83856	84,69706	84,53334	84,41408
AVU	84,95782	84,69014	84,91730	85,27404	84,90528
AGC	84,95782	83,70988	84,09857	84,12224	83,95744
AGR	84,95782	84,40975	84,51075	85,04085	84,85789
ASC	84,95782	84,80435	84,60657	84,58320	84,11409
ASR	84,95782	84,25931	84,36741	84,34485	84,18875

Figura 8.42: Rendimiento para P=14 bar y A=4

El comentario es esencialmente el mismo que para A=3,5.

Representaciones gráficas del rendimiento para la admisión del aire A=4,5

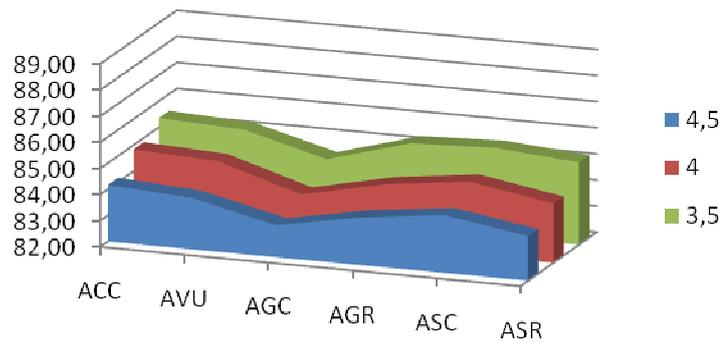


A=4, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
AC	84,75750	84,16441	83,90645	83,66133	83,60630
AVU	84,75750	83,96161	84,38237	84,68806	84,99401
AGC	84,75750	83,22246	83,41445	83,26727	83,07591
AGR	84,75750	83,82135	83,84999	84,12749	84,05208
ASC	84,75750	84,21353	83,98145	83,99638	83,63639
ASR	84,75750	83,70127	83,67866	83,48797	83,43769

Figura 8.43: Rendimiento para P=14 bar y A=4,5

El rendimiento del AVU da su máximo para el porcentaje mayor, en un comportamiento que se sale de lo normal tanto en el plano particular del AVU como en la tendencia que han marcado el resto de aceites. El mínimo, y con creces, lo da el AGC.

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje de aceite de X=10%



X=10%, P=14bar	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	85,35376	85,21401	84,37523	85,28721	85,41063	85,15540
A=4	84,83856	84,69014	83,70988	84,40975	84,80435	84,25931
A=4,5	84,16441	83,96161	83,22246	83,82135	84,21353	83,70127

Figura 8.44: Rendimiento para P=14 bar y X=10%

En este caso el máximo le da el ASC para las posiciones extremas de admisión de aire. Aún así, tanto el ACC, como el AVU como los dos aceites de soja están en valores similares. El AGC, sin embargo, está lejos de todos ellos (a un 1% de distancia).

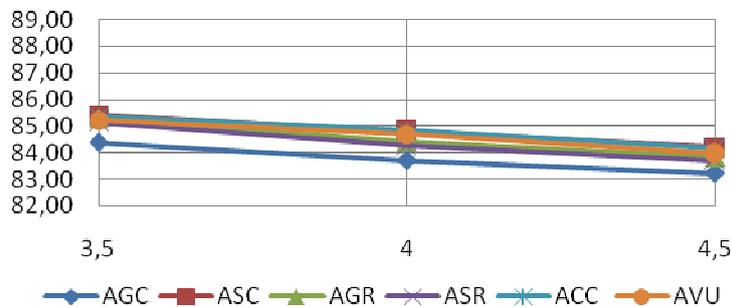
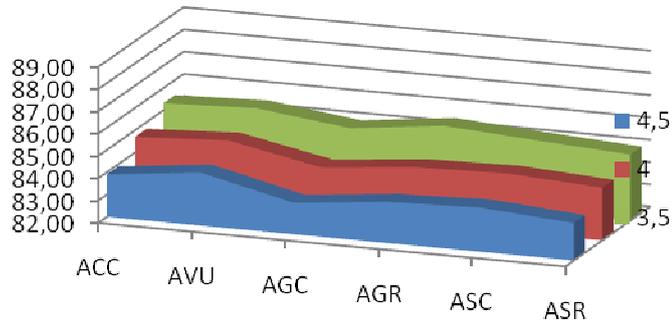


Figura 8.45: Rendimiento para P=14 bar y X=10%

En este gráfico es muy apreciable que AVU, ACC y ASC ofrecen un comportamiento bastante similar. AGR y ASR ofrecen un rendimiento parecido a los anteriores para A=3,5, pero para las sucesivas posiciones caen más abruptamente. Se ve además lo inferior que es el AGC.

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje de aceite de X=20%



X=20%, P=14bar	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	85,31776	85,47098	84,96797	85,46820	85,20037	84,96268
A=4	84,69706	84,91730	84,09857	84,51075	84,60657	84,36741
A=4,5	83,90645	84,38237	83,41445	83,84999	83,98145	83,67866

Figura 8.46: Rendimiento para P=14 bar y X=20%

AVU y AGR ofrecen los mejores rendimientos para A=3,5, pero AVU es superior en el resto de posiciones. La gráfica y las tablas muestran que tanto ASR como AGC ofrecen los peores rendimientos.

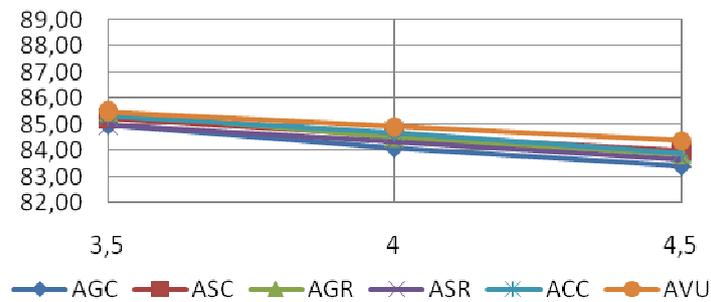
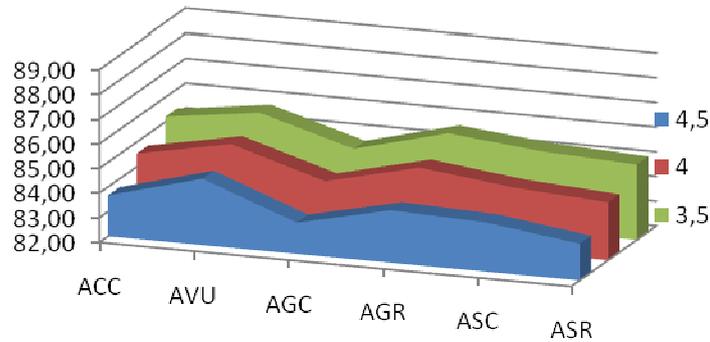


Figura 8.47: Rendimiento para P=14 bar y X=20%

Este gráfico denota, por partes, la inferioridad tanto de AGC como del ASR. Por otro lado, se aprecia mejor el buen rendimiento del AVU, y lo similares que son el comportamiento del AC, ASV y AGR.

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje de aceite de X=30%



X=30%, P=14bar	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	85,21601	85,73066	84,62167	85,61041	85,22901	85,06103
A=4	84,53334	85,27404	84,12224	85,04085	84,58320	84,34485
A=4,5	83,66133	84,68806	83,26727	84,12749	83,99638	83,48797

Figura 8.48: Rendimiento para P=14 bar y X=30%

Tanto la gráfica como la tabla de datos muestran que tanto AVU como AGR ofrecen los mejores rendimientos. El AGC vuelve a ofrecer el menor rendimiento.

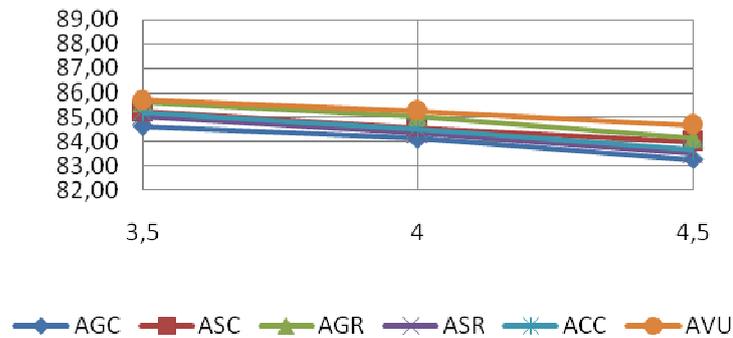
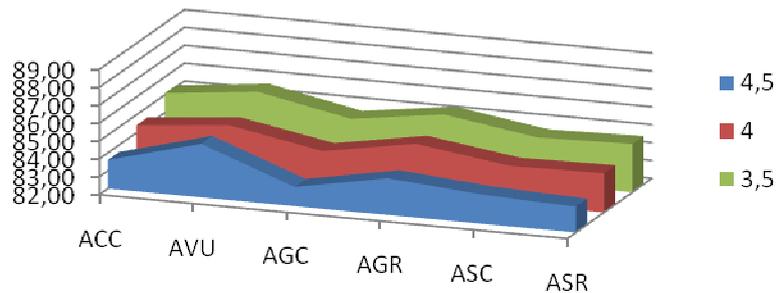


Figura 8.49: Rendimiento para P=14 bar y X=30%

Los peores rendimientos los registran en este caso tanto AGC como ASR. El AGR y ASC muestran unos rendimientos intermedios. Destaca, como en análisis anteriores, la diferencia de comportamiento con respecto al refino del aceite de soja y el aceite de girasol, por lo menos para estos casos.

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje de aceite de X=40%



X=40%, P=14bar	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	85,09748	85,66534	84,64092	85,36982	84,57592	84,70187
A=4	84,41408	84,90528	83,95744	84,85789	84,11409	84,18875
A=4,5	83,60630	84,99401	83,07591	84,05208	83,63639	83,43769

Figura 8.50: Rendimiento para P=14 bar y X=40

El mejor rendimiento vuelve a ser conseguido por el AVU, seguido por el AGR. Salvo el AC, con un rendimiento en el nivel del 85%, el resto ofrecen rendimientos similares para la posición A=3,5. La tendencia es la misma para las mismas posiciones de la admisión de aire.

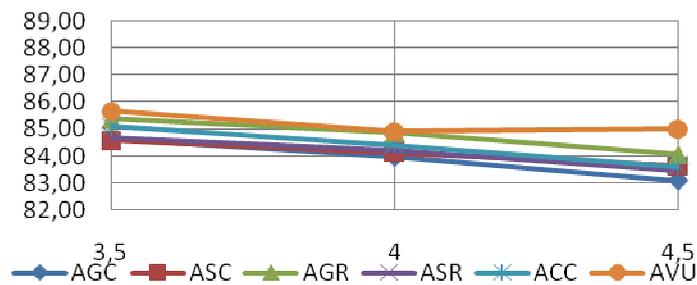


Figura 8.51: Rendimiento para P=14 bar y X=40

8.3.3.1. Conclusiones

Como en los análisis anteriores, volvemos a tener una caída bien visible en el rendimiento según aumenta la variable A. Se ve en todas las gráficas, sobre todo en la primera gráfica de cada análisis a X =constante.

Los máximos se alcanzan en el mínimo porcentaje de aceite en tres casos (ACC, ASR y ASC), mientras que el AVU y el AGR vuelven a obtener máximos en el porcentaje 30%. El AGC lo hace en el 20%. En cualquier caso, los valores ya no sobrepasan el 86% como en el análisis a $P=12$ bar, ni mucho menos los valores alcanzados para el análisis a $P=10$ bar (el máximo alcanzado aquí es 85,73%). Esto se verá más adelante en el análisis para A =constante que se verá al terminar el de $P=14$ bar.

La influencia de la variable tipo de aceite queda también clara en todas las gráficas (es un resultado que conocíamos del análisis ANOVA). En la segunda gráfica de los análisis a X =constante se muestran las tendencias que ya han sido comentadas para cada gráfico, pero que merecen un análisis individual para cada aceite:

- ACC: su tendencia es dar buenos rendimientos para valores de X y de A bajos. Cumpliendo esto, se sitúa cerca del mejor valor de la comparativa.
- AVU: su tendencia es dar buenos valores cuanto más crece la variable X . La variable A no le afecta tanto, y para $A=4$ y $A=4,5$ sigue dando los mejores valores. Da los mejores rendimientos para $X=20\%$, $X=30\%$ y $X=40\%$.
- AGC: ofrece los peores rendimientos del estudio, independientemente de los valores de X y de A . No pasa del 85% de rendimiento, cuando otros aceites rozan el 86%.
- AGR: tomando como referencia el comportamiento del AVU, se le acerca mucho para valores de A bajos, pero se aleja para valores altos de A .
- ASC: ofrece el mejor comportamiento para $X=10\%$, pero su rendimiento cae cuanto más proporción de aceite hay en la mezcla de combustible.
- ASR: sorprendentemente, su rendimiento está por debajo de su equivalente sin refinar, luego puede decirse que si las condiciones de combustión fuesen éstas, el refino, no sólo sería inútil, sería perjudicial

8.5.2. Análisis del rendimiento para A=3,5

A continuación se exponen la matriz de resultados para este análisis:

Tabla 8.9 Matriz de resultados para A=3,5

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Presión de inyección (P)	10	84,09968	85,25850	84,50137	84,74938	AC	Tipo de aceite (T)
	12	85,25447	85,37386	85,13115	85,15520		
	14	85,35376	85,31776	85,21601	85,09748		
	10	85,07556	85,47638	86,12837	85,58125	AVU	
	12	85,31938	85,36382	86,17902	85,48600		
	14	85,21401	85,47098	85,73066	85,66534		
	10	84,49998	84,55733	84,08382	84,18637	AGC	
	12	84,53117	84,91404	84,61684	84,37155		
	14	84,37523	84,96797	84,62167	84,64092		
	10	85,31293	84,72836	84,28067	84,74591	AGR	
	12	85,20370	85,29936	85,52949	85,26327		
	14	85,28721	85,46820	85,61041	85,36982		
	10	85,33888	84,83663	84,86387	84,76151	ASC	
	12	85,44875	85,35542	85,07000	84,86249		
14	85,41063	85,20037	85,22901	84,57592			
10	85,02602	84,61271	84,88327	85,09721	ASR		
12	85,03464	84,67927	84,89123	84,77345			
14	85,15540	84,96268	85,06103	84,70187			
		Grado de apertura de aire constante (A=3,5)					

Con los datos ya dispuestos, se plantea un análisis de varianza (ANOVA), mediante el cual se determinará si las tres variables influyen (presión de inyección, tipo de aceite y porcentaje de aceite en peso) o no y de qué manera.

Tabla 8.10 Análisis ANOVA para A=3,5

FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
P	2	1,26180	0,63090	12,50018	3,31583	SI	0,000112548
T	5	6,77429	1,35486	26,84415	2,53355	SI	3,13015E-10
X	3	0,26188	0,08729	1,72954	2,92228	NO	0,182079947
PxT	10	1,06949	0,10695	2,11901	2,16458	NO	0,05479703
PxX	6	0,20513	0,03419	0,67737	2,42052	NO	0,668880785
TxX	15	2,30271	0,15351	3,04162	2,01480	SI	0,004614874
Error	30	1,51414	0,05047				
Total	71	13,38944					

Vistos los resultados de la tabla ANOVA generada, se tiene que las variables influyentes son la presión de inyección, el tipo de aceite y la interacción tipo de aceite-porcentaje de la misma en la mezcla para un nivel de significación del 5%. Tanto la interacción presión de inyección-porcentaje en mezcla (ésta en mayor medida) como la variable porcentaje de aceite en la mezcla son rechazadas con un margen relativamente amplio. Sin embargo, la interacción presión de inyección-tipo de aceite ha sido rechazada con apenas un 0,4% de margen. Esto quiere decir que, si se hubiese hecho el análisis para un nivel de significancia del 6%, la variable entraría a ser representativa.

Dentro de las variables significativas, el tipo de aceite es la más determinante (orden de 10^{-8}), teniendo después en orden de importancia a la presión de inyección y por último, como última variable significativa la interacción tipo de aceite-porcentaje en mezcla.

A priori, será la variable tipo de aceite T la que marque, principalmente, el comportamiento de la variable rendimiento.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de colza crudo (T=ACC)

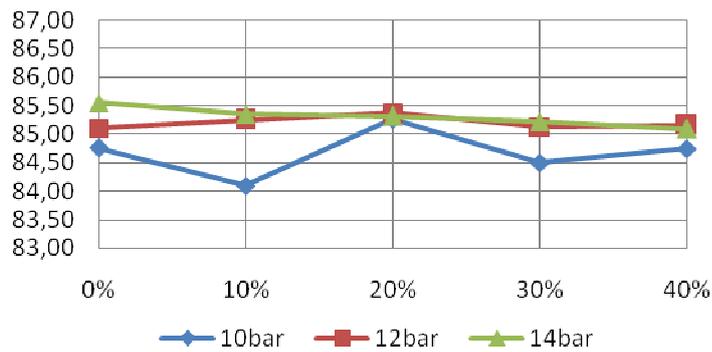
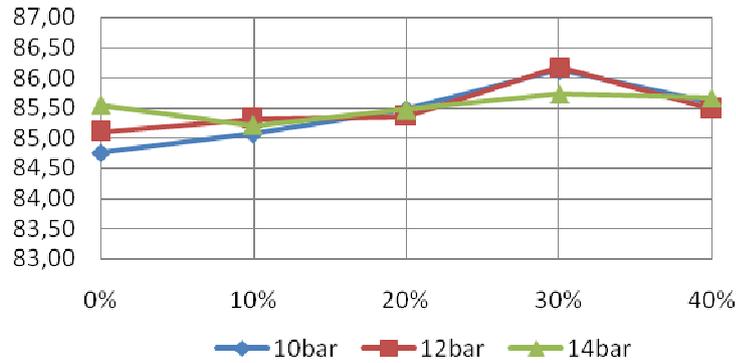


Figura 8.52: Rendimiento para A=3,5 y T=ACC

El análisis muestra un mayor rendimiento cuanto mayor es la presión de inyección. Salvo el valor para X=20%, el rendimiento para P=10 bar es bastante inferior. No hay mucha diferencia entre los valores recogidos para P=12 bar y P=14 bar, de hecho, el máximo valor lo da P=12 bar.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite vegetal usado (T=AVU)

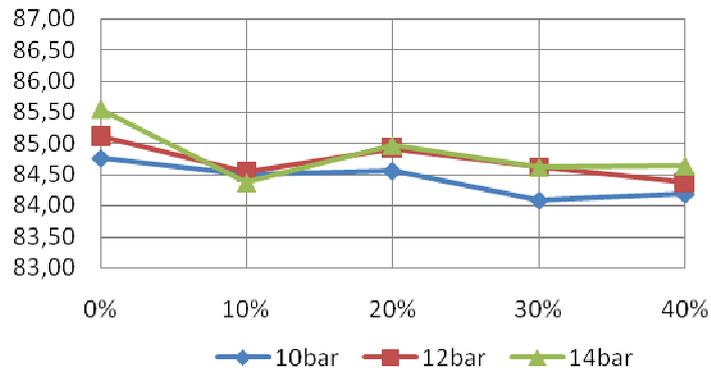


AVU, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	84,75750	85,07556	85,47638	86,12837	85,58125
P=12bar	85,10567	85,31938	85,36382	86,17902	85,48600
P=14bar	85,54939	85,21401	85,47098	85,73066	85,66534

Figura 8.53: Rendimiento para A=3,5 y T=AVU

Para el AVU, la tendencia es difícil de calibrar. Para porcentajes pequeños, sigue la tendencia del caso anterior, pero para porcentajes altos los rendimientos se igualan para las distintas presiones. El máximo vuelve a darlo la P=12 bar a X=30%, con un 86%.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de girasol crudo (T=AGC)

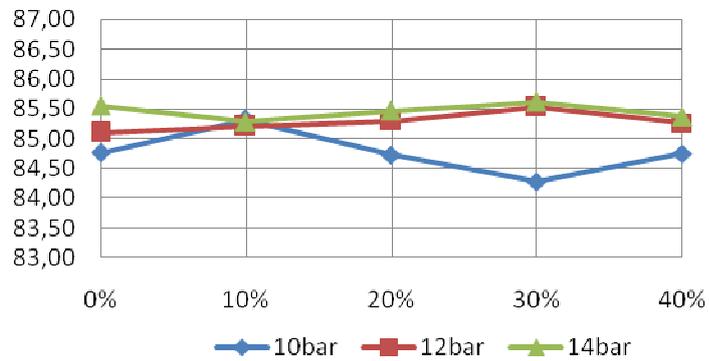


AGC, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	84,75750	84,49998	84,55733	84,08382	84,18637
P=12bar	85,10567	84,53117	84,91404	84,61684	84,37155
P=14bar	85,54939	84,37523	84,96797	84,62167	84,64092

Figura 8.54: Rendimiento para A=3,5 y T=AGC

Para el AGC, los valores descienden con respecto a los dos casos anteriores. La tendencia es que el rendimiento aumenta con la presión, si bien el máximo se alcanza en X=20%, lo cual corrobora que no existe dependencia con el porcentaje de aceite.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de girasol refinado (T=AGR)

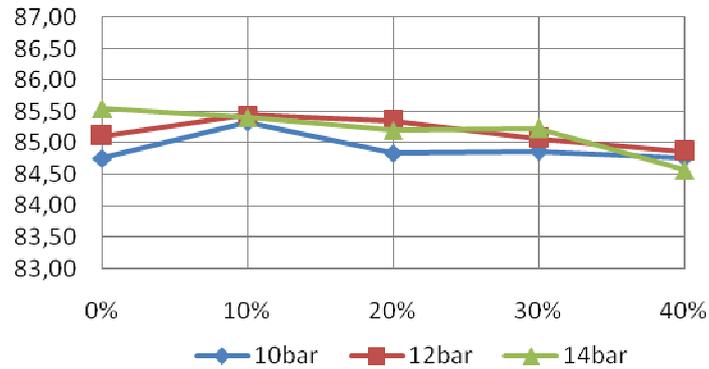


AGR, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	84,75750	85,31293	84,72836	84,28067	84,74591
P=12bar	85,10567	85,20370	85,29936	85,52949	85,26327
P=14bar	85,54939	85,28721	85,46820	85,61041	85,36982

Figura 8.55: Rendimiento para A=3,5 y T=AGR

En este caso, la influencia de la presión está más clara, y el rendimiento aumenta con la presión para todos los porcentajes. El máximo se alcanza para X=30%, y es del 85,61%.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de soja crudo (T=ASC)

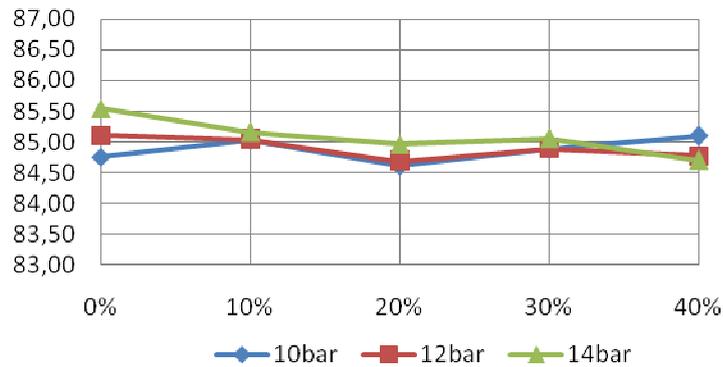


ASC, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	84,75750	85,33888	84,83663	84,86387	84,76151
P=12bar	85,10567	85,44875	85,35542	85,07000	84,86249
P=14bar	85,54939	85,41063	85,20037	85,22901	84,57592

Figura 8.56: Rendimiento para A=3,5 y T=ASC

En este caso, el máximo se da para la presión intermedia. La tendencia no está clara en este caso, ya que, si bien la presión menor da rendimientos menores, la presión intermedia y la mayor se reparten los máximos por cada porcentaje.

Representaciones gráficas del rendimiento para el aceite de soja refinado
(T=ASR)

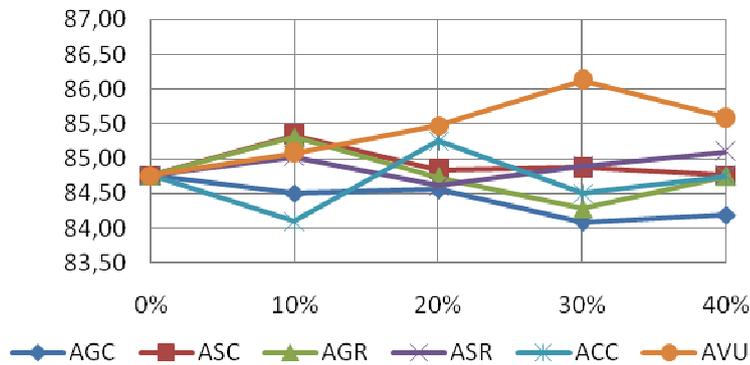


ASR, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	84,75750	85,02602	84,61271	84,88327	85,09721
P=12bar	85,10567	85,03464	84,67927	84,89123	84,77345
P=14bar	85,54939	85,15540	84,96268	85,06103	84,70187

Figura 8.57: Rendimiento para A=3,5 y T=ASR

En este último caso, la tendencia de aumento de rendimiento con la presión se sigue hasta el último porcentaje, si bien es reseñable que no existe mucha diferencia de la presión menor a la intermedia.

Representaciones gráficas del rendimiento para la presión de inyección P=10 bar

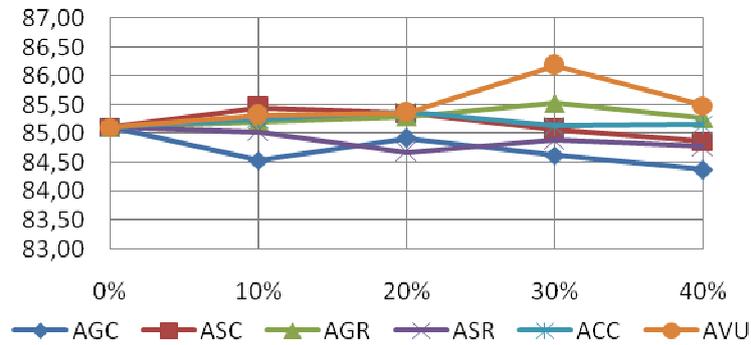


P=10bar, X=0% A=3,5	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	84,09968	85,25850	84,50137	84,74938
AVU	85,07556	85,47638	86,12837	85,58125
AGC	84,49998	84,55733	84,08382	84,18637
AGR	85,31293	84,72836	84,28067	84,74591
ASC	85,33888	84,83663	84,86387	84,76151
ASR	85,02602	84,61271	84,88327	85,09721

Figura 8.58 Rendimiento para A=3,5 y P=10 bar

Se observa que el mayor rendimiento lo ofrece el AVU. El AGC ofrece menores rendimientos como se puede ver en la gráfica.

Representaciones gráficas del rendimiento para la presión de inyección P=12 bar

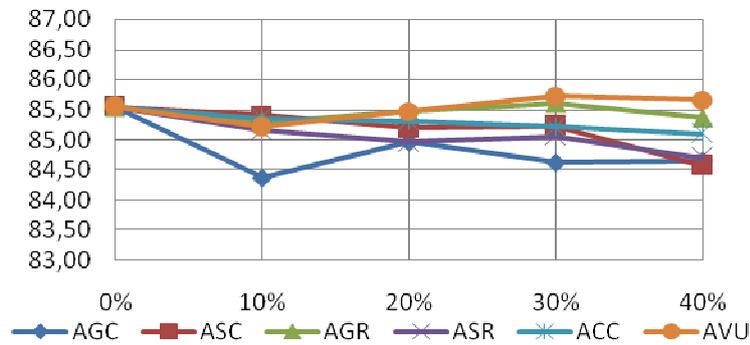


P=12bar, X=0% A=3,5	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%	
ACC	85,10566	85,25446	85,37385	85,13114	85,15520
AVU	85,10566	85,31938	85,36381	86,17902	85,48600
AGC	85,10566	84,53117	84,91403	84,61683	84,37154
AGR	85,10566	85,20369	85,29936	85,52948	85,26326
ASC	85,10566	85,44874	85,35541	85,06999	84,86249
ASR	85,10566	85,03463	84,67926	84,89123	84,77344

Figura 8.59: Rendimiento para A=3,5 y P=12 bar

Puede notarse como aumentan los valores del rendimiento con respecto al análisis anterior. El AVU vuelve a dar el máximo para X=30%. El AGC da el mínimo para X=40%. AC, ASC y AGR dan resultados por encima del 85%. Cabe destacar que el aceite de soja ofrece mejores resultados sin refino que con él.

Representaciones gráficas del rendimiento para la presión de inyección P=14 bar.

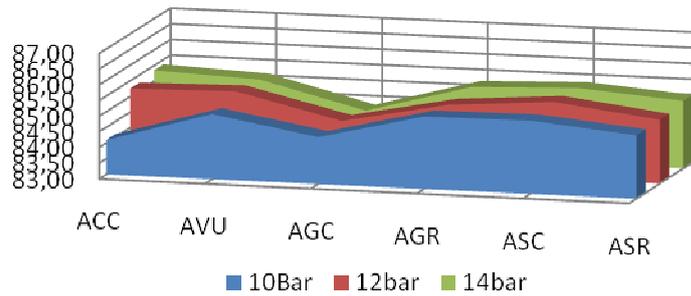


P=14bar, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	85,54939	85,35376	85,31776	85,21601	85,09748
AVU	85,54939	85,21401	85,47098	85,73066	85,66534
AGC	85,54939	84,37523	84,96797	84,62167	84,64092
AGR	85,54939	85,28721	85,46820	85,61041	85,36982
ASC	85,54939	85,41063	85,20037	85,22901	84,57592
ASR	85,54939	85,15540	84,96268	85,06103	84,70187

Figura 8.60: Rendimiento para A=3,5 y P=14 bar

El AVU ofrece el máximo al 30% de composición. Tanto AVU como AGR dan rendimientos altos. El AGC y el ASR dan los resultados más bajos.

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje de aceite de X=10%



X=10% A=3,5	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10bar	84,099684	85,075564	84,499976	85,312927	85,338880	85,026015
P=12bar	85,254469	85,319382	84,531170	85,203698	85,448745	85,034638
P=14bar	85,353756	85,214000	84,375234	85,287211	85,4106253	85,1554004

Figura 8.61: Rendimiento para A=3,5 y X=10%

Se ve claramente que el AGC ofrece un rendimiento bastante inferior al resto. El ASC ofrece los máximos para este X (máximo de 85,44% para P=12bar). Destaca que mientras el refinado de girasol da mucho mejor rendimiento que el crudo, el refinado de soja da peores rendimientos (gran diferencia de comportamiento).

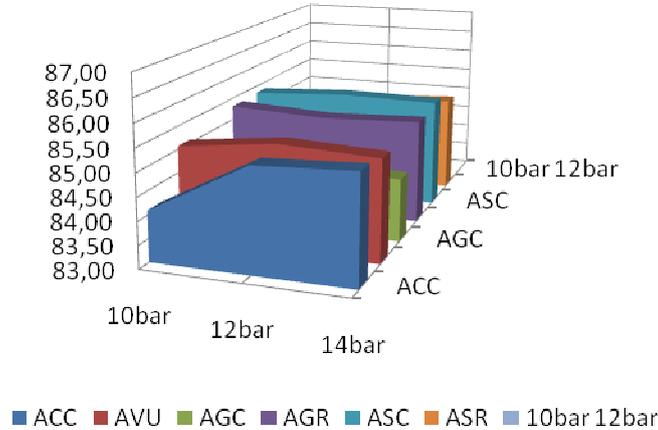
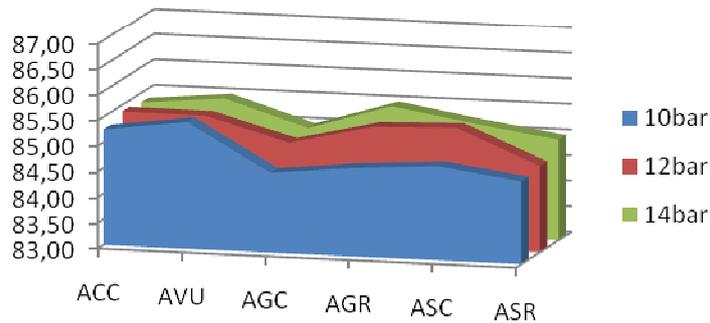


Figura 8.62: Rendimiento para A=3,5 y X=10%.

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje de aceite de X=20%



X=20%, A=3,5	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10bar	85,25850	85,47638	84,55733	84,72836	84,83663	84,61271
P=12bar	85,37386	85,36382	84,91404	85,29936	85,35542	84,67927
P=14bar	85,31776	85,47098	84,96797	85,46820	85,20037	84,96268

Figura 8.63: Rendimiento para A=3,5 y X=20%

Vuelve a darse que el AGC da malos rendimientos. Los mayores rendimientos se consiguen con el AVU para todas las presiones. Destaca que para P=10bar, el AGR y el ASC tienen un rendimiento muy inferior a los de las presiones superiores.

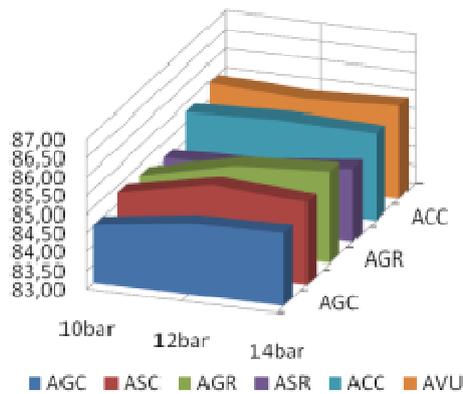
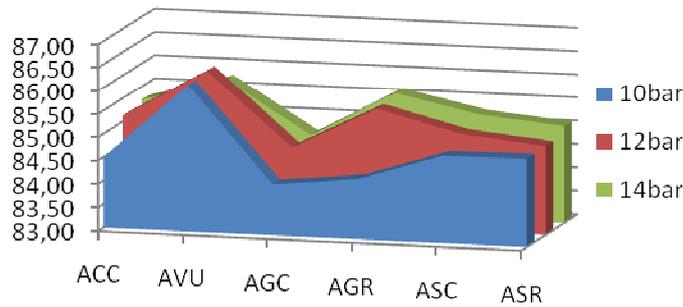


Figura 8.64: Rendimiento para A=3,5 y X=20%

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje de aceite de X=30%



X=30%, A=3,5	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10bar	84,50137	86,12837	84,08382	84,28067	84,86387	84,88327
P=12bar	85,13115	86,17902	84,61684	85,52949	85,07000	84,89123
P=14bar	85,21601	85,73066	84,62167	85,61041	85,22901	85,06103

Figura 8.65: Rendimiento para A=3,5 y X=20%

El máximo se consigue con el AVU a P=12bar, siendo los valores ofrecidos por el AVU los máximos globales. Para P=10 bar, ambos aceites de girasol dan malos rendimientos, aunque para las presiones superiores el AGR dio una medición alta. La tendencia que muestra el AVU difiere de la del resto de combustibles. La tendencia de estos es de aumentar, en mayor o menor medida, con la presión.

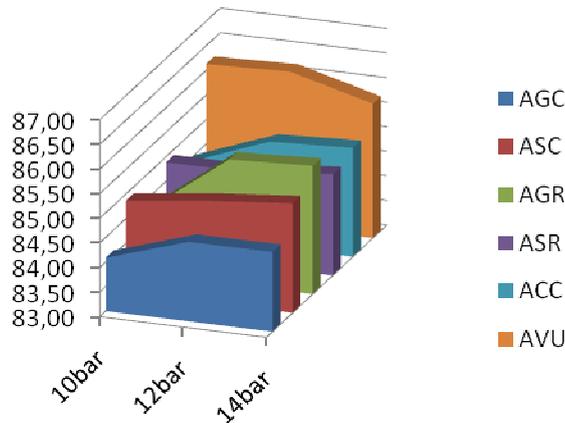
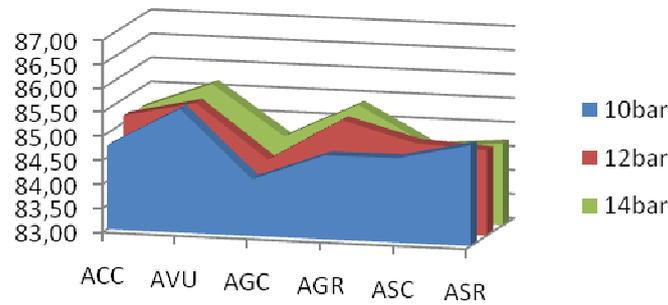


Figura 8.66: Rendimiento para A=3,5 y X=30%

Representaciones gráficas del rendimiento para el porcentaje de aceite de X=40%



X=40%, A=3,5	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10bar	84,74938	85,58125	84,18637	84,74591	84,76151	85,09721
P=12bar	85,15520	85,48600	84,37155	85,26327	84,86249	84,77345
P=14bar	85,09748	85,66534	84,64092	85,36982	84,57592	84,70187

Figura 8.67: Rendimiento para A=3,5 y X=40%

El AVU vuelve a dar los valores máximos, y el AGC los mínimos. Destaca que el ASR muestra un comportamiento inverso al normal, dando la medida que el rendimiento disminuye cuando aumenta la presión. Es en esta gráfica donde se ve que cada aceite sigue una tendencia distinta, alejándose de la esperada. AVU y AGR parecen ofrecer los valores más altos.

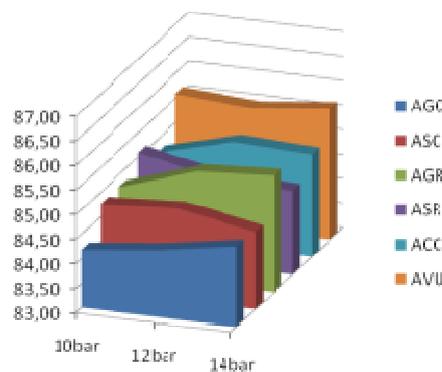


Figura 8.68: Rendimiento para A=3,5 y X=40%

8.3.4.1. Conclusiones

Tal y como se anunció en el análisis ANOVA, la variable más influyente en los datos de rendimiento que se tienen es el tipo de aceite. El comportamiento del rendimiento respecto a la variable presión de inyección del combustible (P), a pesar de ser determinante, no lo es tanto como la variable T, además de mostrar un comportamiento irregular en algunas condiciones. Esto queda demostrado en la segunda gráfica de cada análisis a X=constante, en los que puede verse que se tienen tendencias al alta y a la baja con la presión.

El máximo alcanzado es 86,18% y se consigue con el AVU para X=30% y P=12 bar. El mínimo es 84,08% y lo consigue el AGC para X=30% y P=10bar. Los mínimos de cada análisis se consiguen para P=10bar; sin embargo los máximos no siempre se consiguen con la presión superior, siendo de hecho el máximo registrado para la presión intermedia.

Los análisis de cada aceite por separado muestran comportamientos muy diferenciados:

- ACC: a presiones altas, el rendimiento se mantiene dentro de unos valores cuando variamos X (entre 85 y 85,4%). No ocurre lo mismo a la mínima presión, con fluctuaciones.
- AVU: al aumentar X, las presiones inferiores consiguen un pico de rendimiento para X=30% (86,18% para P=12bar). Aún teniendo el máximo en este porcentaje, el rendimiento a P=14 bar no sufre un pico tan acusado.
- AGC: el comportamiento seguido para las tres presiones del ensayo es equivalente, con un pico en X=20%. Aún así, no se supera el 85%.
- AGR: a las presiones superiores se tiene un pico en X=30% (85,61%). El comportamiento a la presión inferior es distinto, con el pico a X=10%, único valor de esa serie que consigue superar el 85%.
- ASC: la presión de inyección P=12bar da mejores rendimientos que la presión superior. Las tres siguen una tendencia similar, con el máximo en 85,4%.
- ASR: la tendencia que siguen es la misma, salvo un pico registrado para P=10bar y X=40%. Los valores están siempre entre 84,6 y 85%.

8.4. ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE CO.

Se estudian a continuación las emisiones de CO (en ppm) medidas con el medidor Testo modelo 342-3. Se realizan los análisis a presión constante (10, 12 y 14 bar) y a posición de admisión de aire constante.

8.5.1. Análisis a de las emisiones de CO a P=10 BAR

Se presentan a continuación la matriz de resultados de las emisiones de CO

Tabla 8.11 Matriz de resultados de Emisiones de CO

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Posición de admisión (A)	2,5	229	144	210	95	ACC	Tipo de aceite (T)
	3	300	208	279	125		
	3,5	380	300	324	200		
	2,5	0	0	3	10	AVU	
	3	0	0	12	15		
	3,5	0	0	21	20		
	2,5	170	150	99	68	AGC	
	3	230	201	131	64		
	3,5	321	288	254	115		
	2,5	187	244	252	96	AGR	
	3	294	384	364	111		
	3,5	450	644	476	120		
	2,5	26	24	42	25	ASC	
	3	19	25	39	24		
	3,5	17	22	37	23		
2,5	2	2	14	17	ASR		
3	0	0	12	14			
3,5	0	0	8	18			
		Presión de inyección: 10 bar					

Con estos datos, lo primero que se plantea es un análisis de varianza (ANOVA), mediante el cual se determinará si las tres variables influyen (admisión del aire, tipo de aceite y porcentaje de aceite en peso) o no y de qué manera.

Tabla 8.12: Análisis ANOVA

FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
A	2	78896,861	39448,431	36,796	3,316	SI	8,45021E-09
T	5	993504,944	198700,989	185,343	2,534	SI	1,31267E-21
X	3	88036,056	29345,352	27,373	2,922	SI	1,0002E-08
AxT	10	92852,639	9285,264	8,661	2,165	SI	1,84387E-06
AxX	6	11620,361	1936,727	1,807	2,421	NO	0,13148662
TxX	15	171024,944	11401,663	10,635	2,015	SI	3,37042E-08
Error	30	32162,139	1072,071				
Total	71	1468097,944					

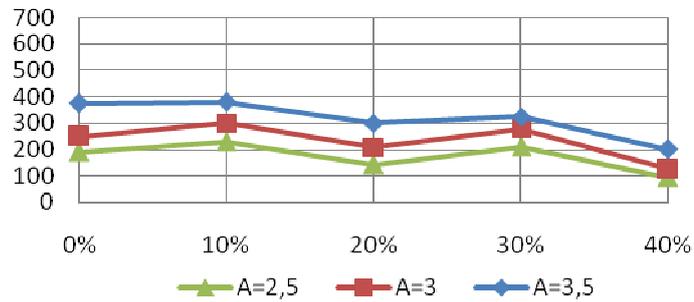
La interpretación del análisis es la siguiente: para un análisis con un 5% de confiabilidad, se tiene que la única variable rechazada para el análisis ANOVA es la interacción de la posición de admisión de aire junto con el porcentaje de aceite en peso en la mezcla (AxX). Se trata de la única variable que tiene un grado de confiabilidad crítica del orden de décimas, ya que el resto de variables se mueven varios órdenes de magnitud por debajo de ella.

Se puede sacar la conclusión de que la variable más significativa es el tipo de aceite, con un orden de confiabilidad crítico del orden de 10^{-19} (en términos porcentuales, en términos absolutos en tanto por 1 es 10^{-21}). A continuación, en orden de importancia, se sitúa la variable A y a continuación la X, ambas con órdenes de magnitud del orden de 10^{-6} . También la interacción TxX está en esos órdenes, mientras que la interacción AxT está en un orden de 10^{-4} por ciento.

A priori, será la variable T la más significativa. Sin embargo, los valores críticos obtenidos para el resto de variables y sus interacciones hacen que la única variable que de verdad sea claramente no influyente sea AxX.

Se representan a continuación los valores obtenidos para las emisiones de CO en función de las variables A, X y T.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite de colza crudo (T=ACC)

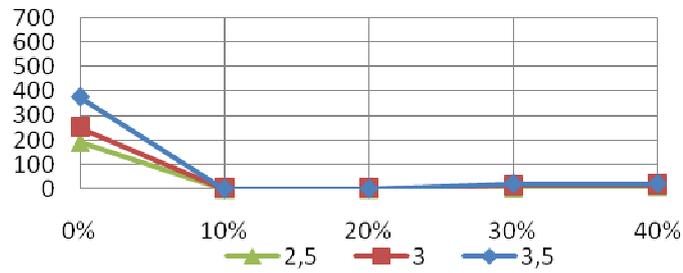


AC, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	192	229	144	210	95
A=3	250	300	208	279	125
A=3,5	376	380	300	324	200

Figura 8.69: Emisiones para P=10 bar y T=ACC

La tendencia observada es que el mayor exceso de aire provoca mayores emisiones. Las máximas emisiones se producen para dicha posición (A=3,5) y X=10%.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite vegetal usado (T=AVU)

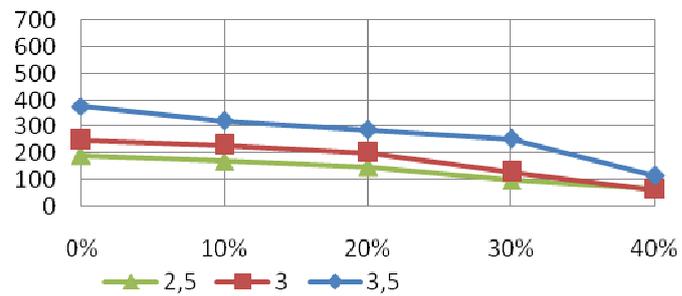


AVU, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	192	0	0	3	10
A=3	250	0	0	12	15
A=3,5	376	0	0	21	20

Figura 8.70: Emisiones para P=10 bar y T=AVU

Las medidas obtenidas para este tipo de aceite son extremadamente bajas, dando los porcentajes X=10% y X=20% valores nulos. Los otros porcentajes dan también valores bajos.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite girasol crudo (T=AGC)

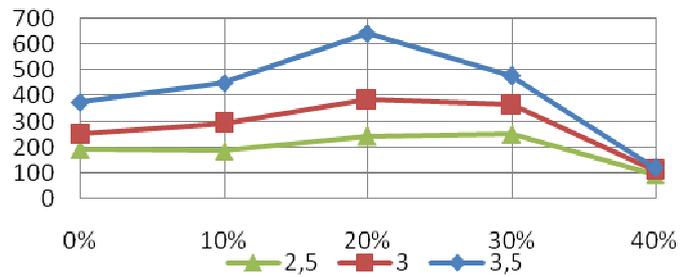


AGC, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	192	170	150	99	68
A=3	250	230	201	131	64
A=3,5	376	321	288	254	115

Figura 8.71: Emisiones para P=10 bar y T=AGC

Los valores obtenidos muestran la misma tendencia que en el ACC, dando más emisiones a mayor exceso de aire. Además, queda patente también que el porcentaje de aceite influye, dando menores emisiones a menores porcentajes.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite girasol refinado (T=AGR)

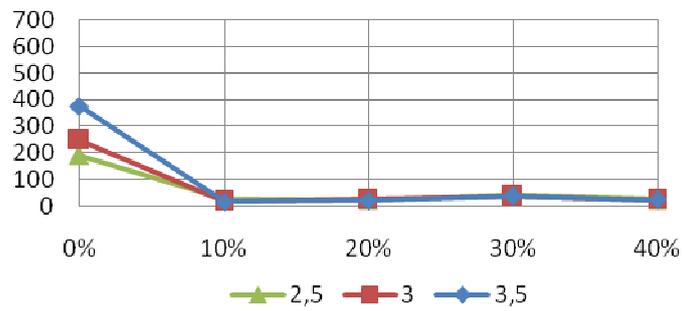


AGR, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	192	187	244	252	96
A=3	250	294	384	364	111
A=3,5	376	450	644	476	120

Figura 8.72: Emisiones para P=10 bar y T=AGR

Se observa una tendencia distinta de la de las anteriores gráficas, teniendo picos para porcentajes intermedios, si bien el mínimo sigue obteniéndose para el porcentaje mayor de aceite.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite soja crudo (T=ASC)



ASC, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	192	26	24	42	25
A=3	250	19	25	39	24
A=3,5	376	17	22	37	23

Figura 8.73: Emisiones para P=10 bar y T=ASC

La tendencia es muy parecida a la que teníamos en el AVU, con valores muy bajos para todos los porcentajes y posiciones de admisión de aire.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite soja refinado (T=ASR)

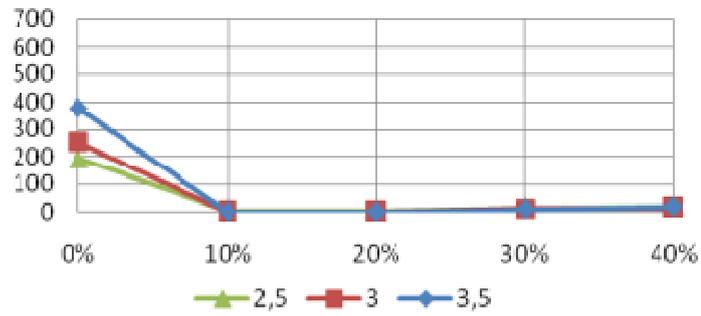
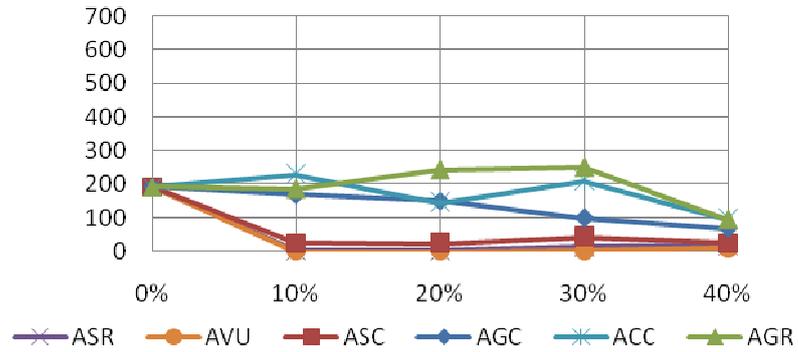


Figura 8.74: Emisiones para P=10 bar y T=ASR

Misma tendencia que el aceite sin refinar, con valores si puede ser más pequeño todavía.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para la posición del aire A=2,5

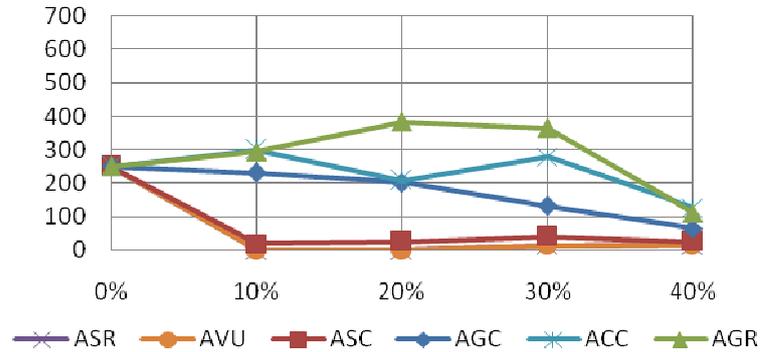


A=2,5, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
AC	192	229	144	210	95
AVU	192	0	0	3	10
AGC	192	170	150	99	68
AGR	192	187	244	252	96
ASC	192	26	24	42	25
ASR	192	2	2	14	17

Figura 8.75: Emisiones para P=10 bar y A=2,5

Puede observarse lo ya visto en el análisis de cada aceite: se tienen tres tipos de mezcla (AGR, AGC y ACC) los cuales dan unos valores de emisión de CO altos, siendo el máximo de 252 ppm obtenido para AGC y X=30%. Por otro lado, los dos aceites de soja y el vegetal usado dan unos valores muy inferiores a los otros, dando los mínimos el aceite vegetal usado (AVU).

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para la posición del aire A=3

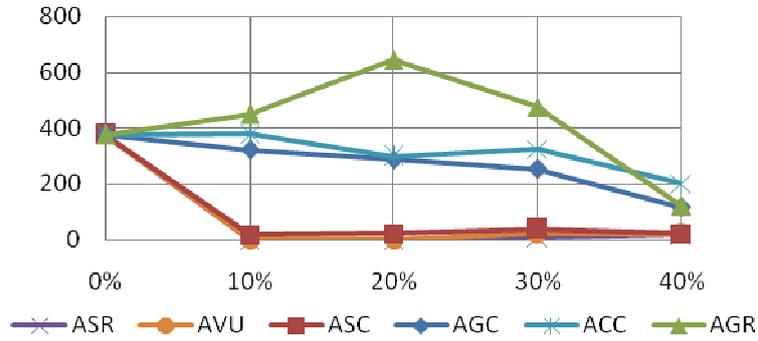


A=3, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
AC	250	300	208	279	125
AVU	250	0	0	12	15
AGC	250	230	201	131	64
AGR	250	294	384	364	111
ASC	250	19	25	39	24
ASR	250	0	0	12	14

Figura 8.76: Emisiones para P=10 bar y A=3

Misma tendencia que antes (incluso la forma de los gráficos es idéntica), pero valores de emisión mayores. El aceite de girasol refinado da unos valores excesivamente altos para X=20% y X=30% (384 y 364 ppm respectivamente). También el ACC y el AGC dan valores altos, pero inferiores al AGR. Es destacable el hecho de que el aceite refinado da más emisiones que el crudo. El comportamiento es el inverso en el aceite de soja, dando los valores mínimos el refinado. Tanto AVU, como ASR como ASC dan valores muy por debajo de los obtenidos con los otros tipos de

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para la posición del aire A=3,50.

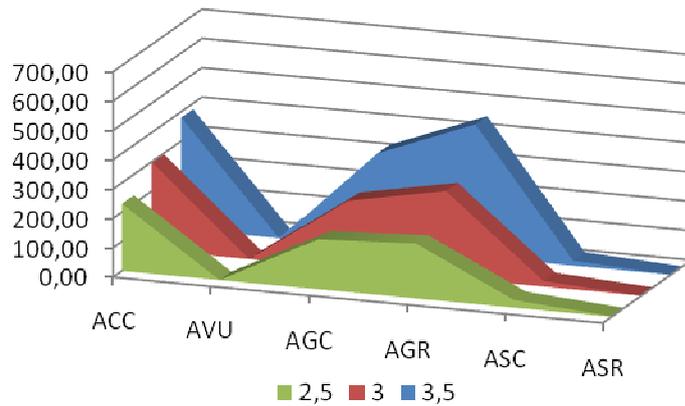


A=3,5, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
AC	376	380	300	324	200
AVU	376	0	0	21	20
AGC	376	321	288	254	115
AGR	376	450	644	476	120
ASC	376	17	22	37	23
ASR	376	0	0	8	18

Figura 8.77: Emisiones para P=10 bar y A=3,5

Comportamiento bastante parecido a los anteriores. Los grupos de aceite con grandes emisiones y con pequeñas emisiones están bien diferenciados. Los valores obtenidos para el AGR siguen siendo los más altos, con un pico para X=20% de 644 ppm. El ASR vuelve a ofrecer los mínimos.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje en peso de aceite X=10%



X=10%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	229	0	170	187	26	2
A=3	300	0	230	294	19	0
A=3,5	380	0	321	450	17	0

Figura 8.78: Emisiones para P=10 bar y X=10%

En el primer gráfico puede observarse qué aceites dan valores altos de emisión y cuáles dan emisiones casi nulas (se ve también en la tabla). La segunda gráfica no ofrece mucho más. La tendencia es al alza con el aumento de la admisión del aire.

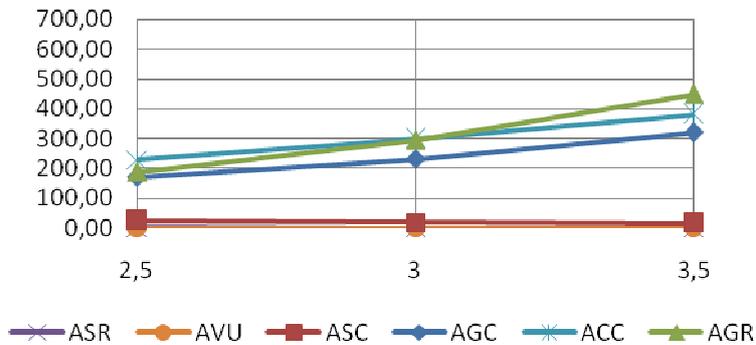
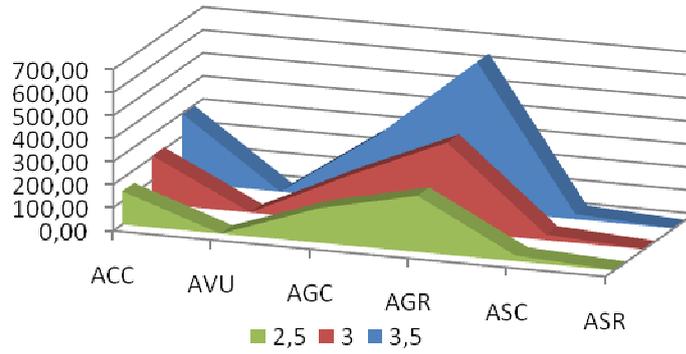


Figura 8.79: Emisiones para P=10 bar y X=10%

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje en peso de aceite X=20%



X=20%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	144	0	150	244	24	2
A=3	208	0	201	384	25	0
A=3,5	300	0	288	644	22	0

Figura 8.80: Emisiones para P=10 bar y X=20%

Se obtienen un valor muy alto para A=3,5 y AGR. Resultados nulos de nuevo en AVU y casi nulos en ASR.

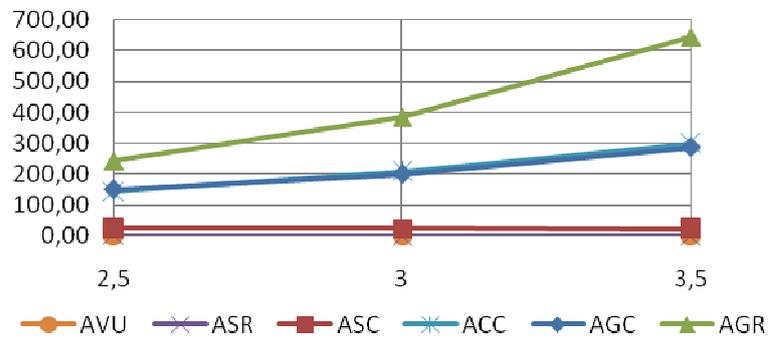
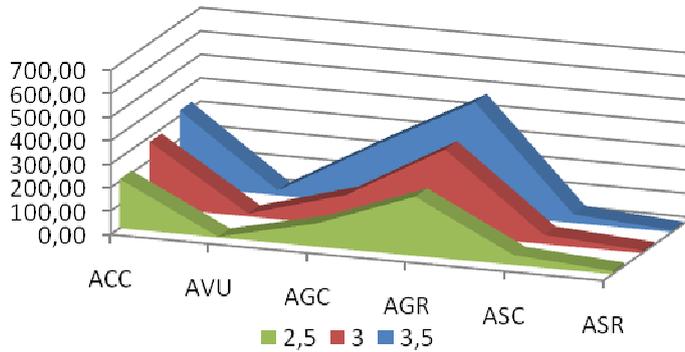


Figura 8.81: Emisiones para P=10 bar y X=20%

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje en peso de aceite X=30%



X=30%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	210	3	99	252	42	14
A=3	279	12	131	364	39	12
A=3,5	324	21	254	476	37	8

Figura 8.82: Emisiones para P=10 bar y X=30%

Aún siguiéndose la tendencia de los gráficos anteriores, los valores de AVU, ASC y ASR aumentan con respecto a porcentajes inferiores. Por otro lado, se estabilizan las emisiones en el resto de aceite, disminuyendo sus valores y el máximo obtenido. La segunda gráfica muestra que la tendencia al alza del valor de las emisiones con la admisión del aire.

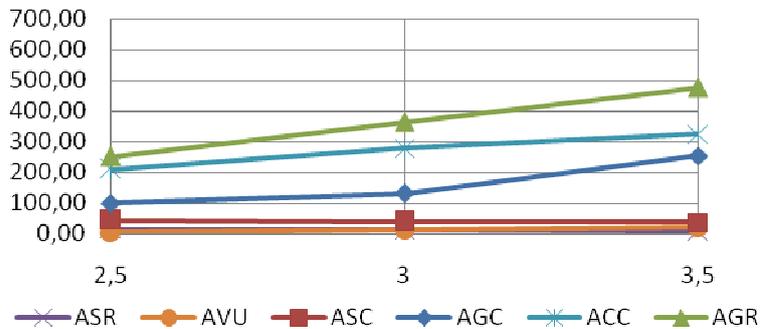
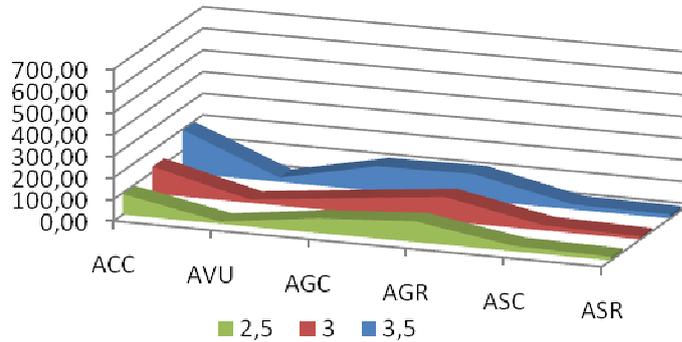


Figura 8.83: Emisiones para P=10 bar y X=30%

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje en peso de aceite X=40%.



X=40%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	95	10	68	96	25	17
A=3	125	15	64	111	24	14
A=3,5	200	20	115	120	23	18

Figura 8.84: Emisiones para P=10 bar y X=40%

El aumento de aceite en la mezcla de combustible “suaviza” el valor de las emisiones, si bien los aceites con emisiones altas en otros porcentajes siguen siendo las mismas. El máximo es de nuevo menor. El mínimo lo obtiene el AVU a A=2,5. En este caso, las emisiones del ACC fueron las más altas.

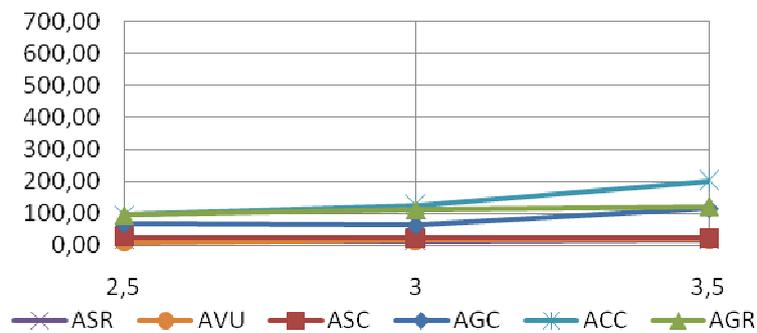


Figura 8.85: Emisiones para P=10 bar y X=40%

8.4.1.1. Conclusiones

El análisis tanto del ANOVA como de las representaciones gráficas da como conclusiones las siguientes:

- La variable más influyente del análisis es el tipo de aceite (T). Se han distinguido dentro de los tipos de aceite dos grupos: por un lado, el AGR, el AGC y el ACC nunca obtienen valores de emisión por encima de 100 ppm, llegando a superar los 400 ppm con asiduidad. El otro grupo está formado por el AVU, el ASC y el ASR, siendo el máximo de estos en todo el análisis 42 ppm. Se tiene, por tanto, que estos aceites serían, desde el punto de vista de reducción de emisiones, los mejores del análisis, con el ASR y el AVU por delante del ASC.
- Además, los tres aceites de mayores emisiones ofrecen una tendencia a la baja clara cuando aumenta el porcentaje de aceite en la mezcla (influencia de la interacción TxX). En el resto de aceites, al ser valores tan bajos en la emisión, no se aprecia tanto la tendencia. Para X=20% y A=2,5, tanto AVU como ASR tienen emisiones cero, mientras que el para X=40% y A=2,5 se tienen 10 y 17 ppm. Esto comparado con la caída que experimenta, por ejemplo, el AGR de 244 a 96 ppm para las mismas condiciones, ofrece como conclusión que este aceite sufre más (para bien, ya que las emisiones son inferiores) el aumento de X.
- El máximo obtenido es 644 ppm y se obtiene para AGR, X=20% y A=3,5. Los mínimos obtenidos son 0 ppm para las posiciones AVU (X=10 y 20%, para todos los A's) y AGR (X=10 y 20% con A=3 y 3,5).C
- La tendencia seguida por el aceite refinado para la soja y el girasol es contraria: con la soja refinada, las emisiones disminuyen, mientras que con el girasol refinado aumentan.

8.5.2. Análisis a de las emisiones de CO a P=12 BAR

Se muestra a continuación la matriz de resultados obtenidos:

Tabla 8.13:Matriz de resultados de emisiones de CO

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Posición de admisión (A)	3	156	93	53	47	ACC	Tipo de aceite (T)
	3,5	121	87	56	39		
	4	178	137	81	52		
	3	0	12	24	28	AVU	
	3,5	0	14	27	29		
	4	0	8	25	36		
	3	90	90	90	35	AGC	
	3,5	120	91	75	30		
	4	216	144	128	68		
	3	117	159	41	37	AGR	
	3,5	140	158	64	39		
	4	224	234	120	77		
3	44	51	48	33	ASC		
3,5	47	61	49	35			
4	44	60	47	33			
3	4	13	20	29	ASR		
3,5	7	15	23	29			
4	6	13	19	25			
		Presión de inyección: 12 bar					

Con los datos ya dispuestos, se plantea un análisis de varianza (ANOVA), mediante el cual se determinará si las tres variables influyen (presión de inyección, tipo de aceite y porcentaje de aceite en peso) o no y de qué manera.

Tabla 8.14: Análisis ANOVA emisiones de CO

FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
A	2	11414,528	5707,264	46,000	3,316	SI	7,26833E-10
T	5	114545,569	22909,114	184,645	2,534	SI	1,38644E-21
X	3	24627,264	8209,088	66,164	2,922	SI	2,49073E-13
AxT	10	14554,639	1455,464	11,731	2,165	SI	7,15006E-08
AxX	6	1551,361	258,560	2,084	2,421	NO	0,08491808
TxX	15	50934,486	3395,632	27,368	2,015	SI	1,99346E-13
Error	30	3722,139	124,071				
Total	71	221349,986					

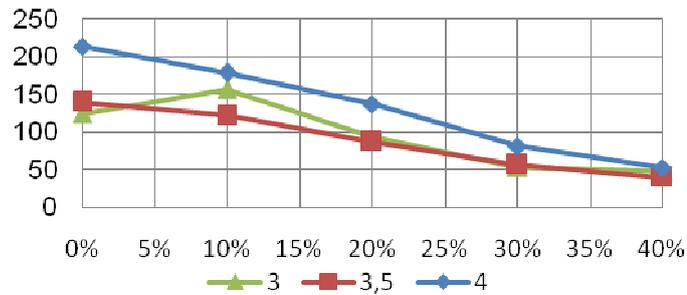
La interpretación del análisis es la siguiente: para un análisis con un 5% de confiabilidad, se tiene que la única variable rechazada para el análisis ANOVA es la interacción de la posición de admisión de aire junto con el porcentaje de aceite en peso en la mezcla (AxX). Se tiene, sin embargo,

que con un análisis al 8,5% la variable pasaría a ser significativa, de modo que no está tan lejos como la misma variable en el análisis a P=10 bar.

Se puede sacar la conclusión de que la variable más significativa es el tipo de aceite, con un orden de confiabilidad crítico del orden de 10^{-19} (en términos porcentuales, en términos absolutos en tanto por 1 es 10^{-21}). A continuación, en orden de importancia, se sitúa la variable X y a continuación la interacción TxX, ambas con órdenes de magnitud del orden de 10^{-11} . La variable A tiene un valor crítico de la confiabilidad de 10^{-8} y la interacción AxT de 10^{-6} .

A priori, será la variable T la más significativa. Sin embargo, los valores críticos obtenidos para el resto de variables y sus interacciones hacen que la única variable que de verdad sea claramente no influyente sea AxX (misma conclusión que en el anterior análisis).

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite de colza crudo (T=ACC)

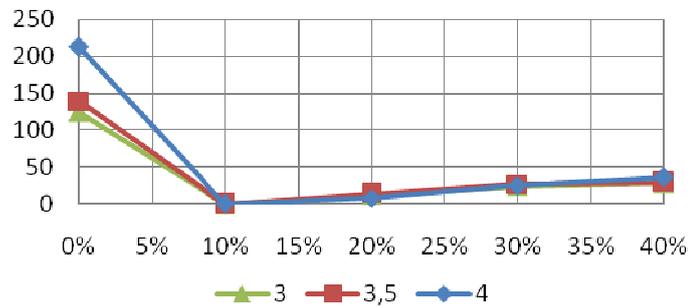


ACC, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	124	156	93	53	47
A=3,5	139	121	87	56	39
A=4	213	178	137	81	52

Figura 8.86: Emisiones para P=12 bar y T=ACC

Se observa tendencia descendente con el aumento de porcentaje en la mezcla. Además, las emisiones para la posición intermedia de la admisión del aire son inferiores a las de la posición mínima en algunos valores.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite vegetal usado (T=AVU)

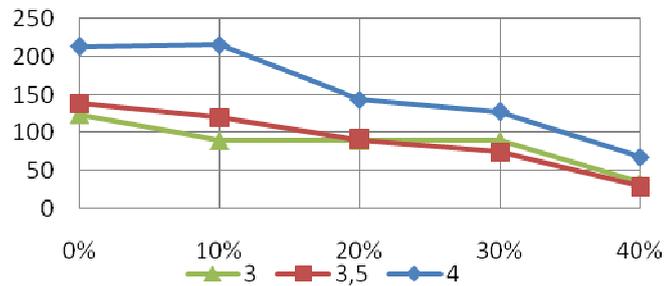


AVU, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	124	0	12	24	28
A=3,5	139	0	14	27	29
A=4	213	0	8	25	36

Figura 8.87: Emisiones para P=12 bar y T=AVU

Emisiones menores que en ACC, y con una tendencia inversa a la de ésta: las emisiones de CO aumentan con el porcentaje de aceite en la mezcla. No puede describirse una tendencia clara en el comportamiento con la variación de A.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite girasol crudo (T=AGC)

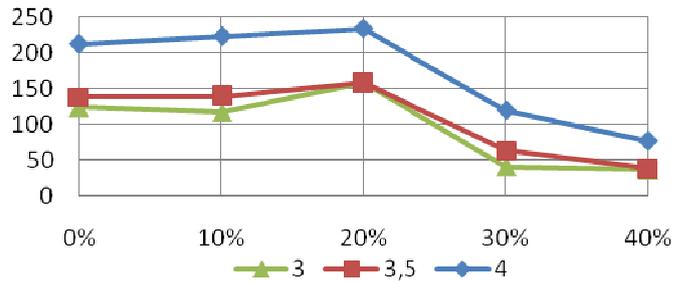


AGC, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	124	90	90	90	35
A=3,5	139	120	91	75	30
A=4	213	216	144	128	68

Figura 8.88: Emisiones para P=12 bar y T=AGC

Tendencia muy parecida a la del AC: las emisiones decrecen con X. Vuelve a no hacerse distinguible el comportamiento con la variable A: para A=4 tenemos los máximos, pero los mínimos se los reparten A=3 y A=3,5.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite girasol refinado (T=AGR)

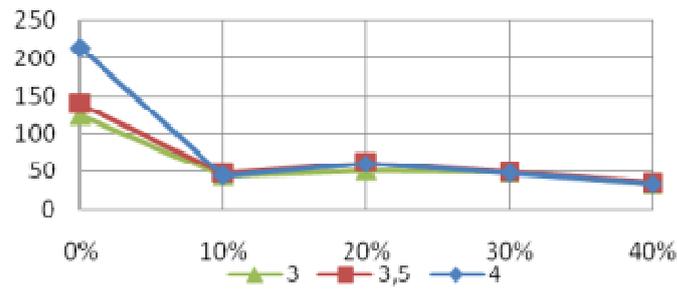


AGR, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	124	117	159	41	37
A=3,5	139	140	158	64	39
A=4	213	224	234	120	77

Figura 8.89: Emisiones para P=12 bar y T=AGR

En este caso, se tiene un pico para X=20% y luego las emisiones descienden. Además, se ve que para posiciones de admisión de aire mayores las emisiones son mayores.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite de soja crudo (T=ASC)

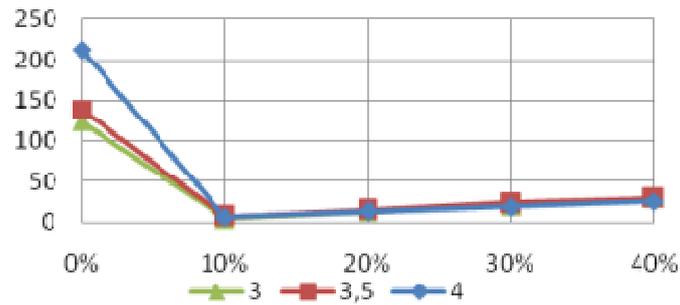


ASC, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	124	44	51	48	33
A=3,5	139	47	61	49	35
A=4	213	44	60	47	33

Figura 8.90: Emisiones para P=12 bar y T=ASC

Las emisiones vuelven a alcanzar un máximo para X=20%. El mínimo se obtiene para el porcentaje mayor del estudio (40%). No se obtiene, a priori, mucha diferencia con la variación de la posición de la admisión de aire.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite de soja refinado (T=ASR)

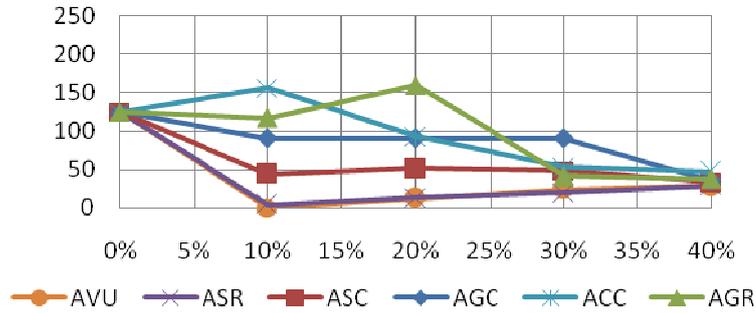


ASR, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	124	4	13	20	29
A=3,5	139	7	15	23	29
A=4	213	6	13	19	25

Figura 8.91: Emisiones para P=12 bar y T=ASR

Se observan emisiones bajas para todos los porcentajes de aceite en la mezcla. La tendencia es al alza con el porcentaje de aceite, y no se observa cambio alguno en el comportamiento variando la admisión de aire.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para la posición del aire A=3

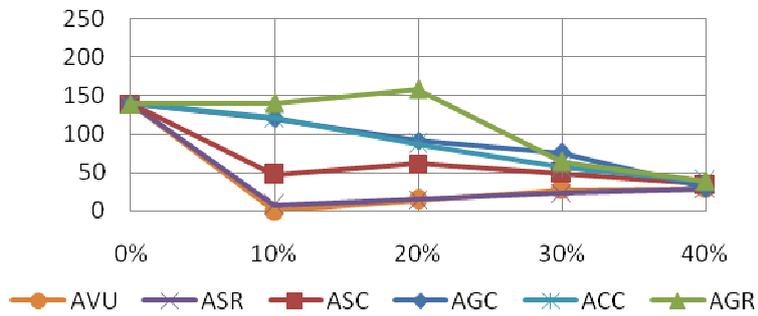


A=3, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	124	156	93	53	47
AVU	124	0	12	24	28
AGC	124	90	90	90	35
AGR	124	117	159	41	37
ASC	124	44	51	48	33
ASR	124	4	13	20	29

Figura 8.92: Emisiones para P=12 bar y A=3

Se observan las distintas tendencias que adoptan los diferentes tipos de aceite con el porcentaje en mezcla. AGR, AGC y AC descienden, con X, mientras que AVU y ASR ascienden, y ASC se mantiene dentro de unos valores. Obviando la tendencia a la alta o a la baja, se observa que las emisiones para X=40% son bastante parecidas, con valores acotados entre 47 y 28 ppm (las diferencias en otros valores de X son mucho más abultadas: para X=10%, de 0 a 156 ppm).

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para la posición del aire A=3,5

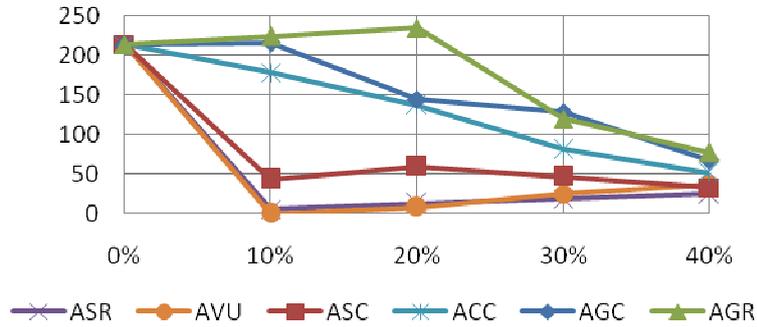


A=3,5, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	139	121	87	56	39
AVU	139	0	14	27	29
AGC	139	120	91	75	30
AGR	139	140	158	64	39
ASC	139	47	61	49	35
ASR	139	7	15	23	29

Figura 8.93: Emisiones para P=12 bar y A=3,5

El análisis hecho para A=3 vuelve a ser válido. Los valores para X=40% tienden más si cabe a valores constantes, siendo el máximo 39 y el mínimo 29 ppm. Tanto AVU como ASR tienen unas emisiones muy contenidas.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para la posición del aire A=4

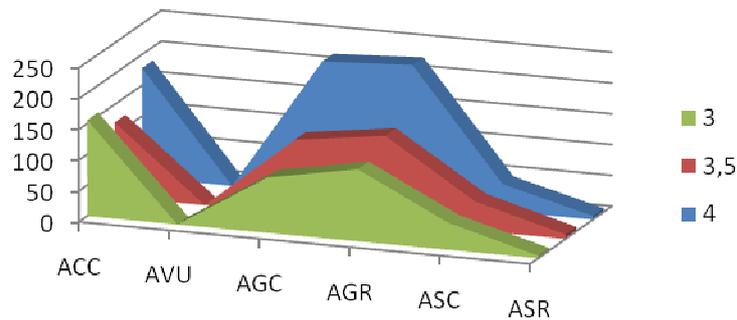


A=4, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	213	178	137	81	52
AVU	213	0	8	25	36
AGC	213	216	144	128	68
AGR	213	224	234	120	77
ASC	213	44	60	47	33
ASR	213	6	13	19	25

Figura 8.94: Emisiones para P=12 bar y A=4

Se distingue, por un lado, la tendencia de AGC, AGR y ACC: valores altos y descendentes con el porcentaje de aceite en mezcla; por otro lado ASR y AVU tendencia contraria, y valores mucho más pequeños. Entre medias, el ASC no tiene las variaciones de los otros. Los valores para el valor más alto de X, si bien son los más cercanos entre sí, tienen una diferencia mayor entre ellos que en los dos estudios anteriores.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso de X=10%



X=10%, P=12bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	156	0	90	117	44	4
A=3,5	121	0	120	140	47	7
A=4	178	0	216	224	44	6

Figura 8.95: Emisiones para P=12 bar y X=10%

Las emisiones de CO aumentan con la admisión de aire. Además, se tiene que AVU y después ASR ofrecen unas emisiones mínimas. El siguiente nivel de emisiones sería el ASC, y en el siguiente se encontrarían los aceites de girasol y el de colza. La segunda gráfica lo muestra más claramente.

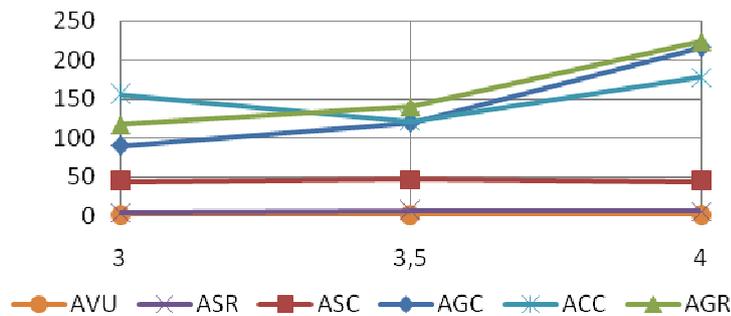
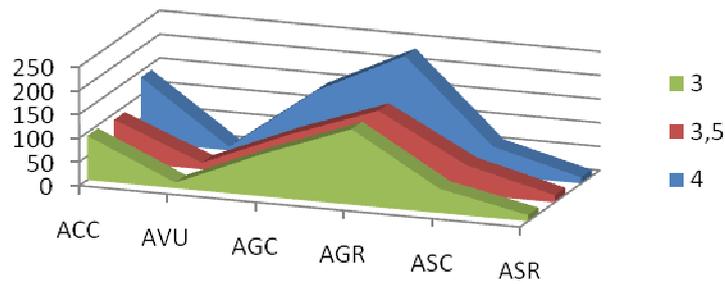


Figura 8.96: Emisiones para P=12 bar y X=20%

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso de X=20%



X=20%, P=12bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	93	12	90	159	51	13
A=3,5	87	14	91	158	61	15
A=4	137	8	144	234	60	13

Figura 8.97: Emisiones para P=12 bar y X=20%

Puede observarse una tendencia similar a la anterior, si bien es cierto que para A=3 y A=3,5 los valores obtenidos apenas difieren. Para A=4 sí que hay diferencia. El máximo nivel de emisiones corresponde al AGR, cuyo refinado parece ir en contra de las emisiones de CO. ASR y AVU ofrecen las mínimas emisiones. En el siguiente gráfico pueden observarse mejor los distintos niveles de emisiones existentes para esta X.

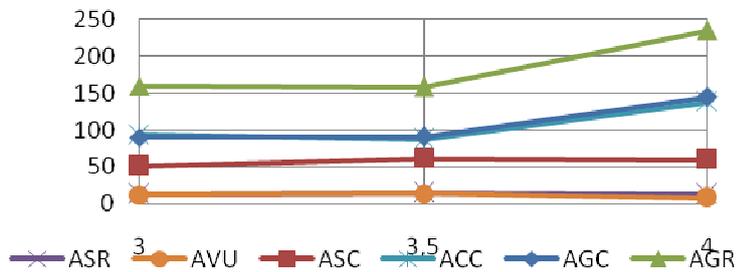
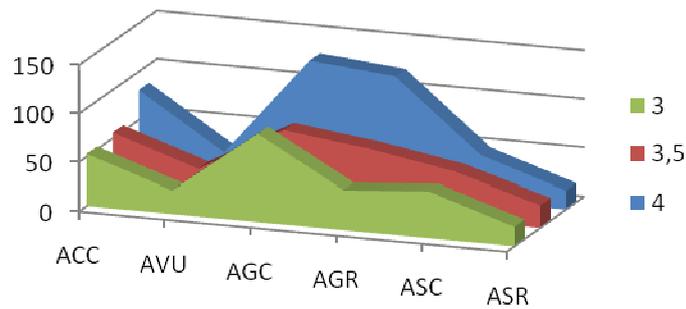


Figura 8.98: Emisiones para P=12 bar y X=20%

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso de X=30%



X=30%, P=12bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	53	24	90	41	48	20
A=3,5	56	27	75	64	49	23
A=4	81	25	128	120	47	19

Figura 8.99: Emisiones para P=12 bar y X=30%

En el primer gráfico puede apreciarse la influencia de la posición de la admisión de aire, si bien esta influencia es clara, más que nada, para la posición mayor. Esta gráfica ha sufrido una estabilización con respecto a las de los análisis X=10% y X=20%: si bien las diferencias en las emisiones son altas, no puede obviarse que son mucho menores. Esto se aprecia mucho mejor en la siguiente gráfica. Tanto AVU como ASR dan los mínimos valores. Los peores valores los da el AGC. Además, destaca la influencia tan acusada que la variable A tiene para el AGR. En términos globales, los aceites de girasol ofrecen los peores niveles de emisiones.

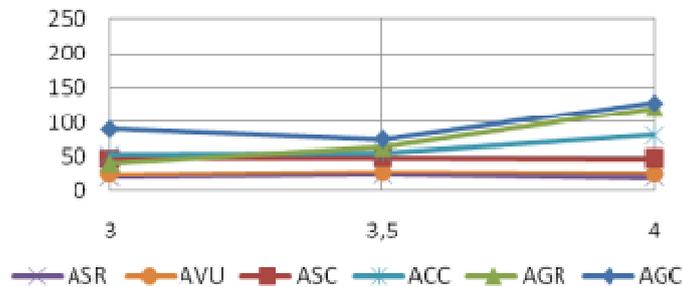
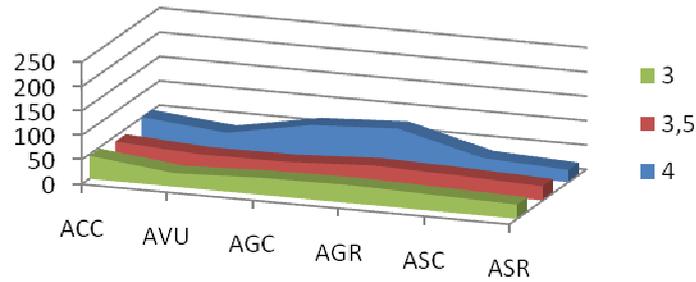


Figura 8.100: Emisiones para P=12 bar y X=30%

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso de X=40%



X=40%, P=12bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	47	28	35	37	33	29
A=3,5	39	29	30	39	35	29
A=4	52	36	68	77	33	25

Figura 8.101: Emisiones para P=12 bar y X=40%

Como se anunciaba en el análisis de gráficas anteriores, para X=40% los valores parecían estabilizarse e igualarse. Únicamente se tienen dos picos considerables para los aceites de girasol en la posición más desfavorable de admisión de aire, y aún así dichos picos son del orden de 30 o 40 ppm superiores al resto: ya no se tienen unas diferencias de 200 ppm. Los valores mínimos los dan de nuevo AVU y ASR. Es destacable que para A=3, los valores permanecen dentro de un rango reducido. Puede destacarse también que para ASR el valor de emisión para A=4 es menor que los otros dos, una tendencia que a priori no cuadra con lo visto hasta ahora.

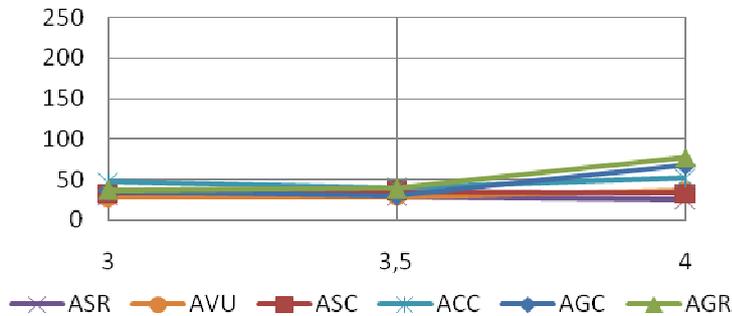


Figura 8.102: Emisiones para P=12 bar y X=40%

8.4.2.1. Conclusiones

El estudio a P=12 bar constante nos ofrece las siguientes conclusiones:

- La variable más influyente es el tipo de aceite (T), resultado predicho por el análisis ANOVA y contrastado con las gráficas anteriores. Por orden, son AVU y ASR los tipos de aceite que menores niveles de emisiones tienen. A continuación se tiene que el ASC también tiene unos valores contenidos, pero mayores. Varios niveles por detrás se tienen las emisiones producidas por los aceites de girasol y el de colza. Esta tendencia se ve, principalmente, para A=3.
- La influencia de la posición de admisión del aire (A), aún siendo menor que en otros análisis, existe. Tras lo observado en las anteriores gráficas, la tendencia es que los máximos niveles de emisión se tienen para A=4 (posición máxima de apertura de admisión en este estudio), con una diferencia considerable con los A=3,5. Los valores para A=3 son menores que los de A=3,5, pero no existe una diferencia como la citada con los de A=4.
- La variable porcentaje de aceite en la mezcla (X) tiende a igualar los niveles de emisión al aumentar X, notándose en todos los gráficos esta influencia.
- Destaca de nuevo la tendencia inversa en el refinado del aceite de girasol y el de soja, con unos resultados similares a los del estudio anterior, esto es: para la soja, el refinado es beneficioso en cuanto a emisiones de CO, mientras que para el girasol es perjudicial.
- Vuelven a obtenerse emisiones 0, las cuales corresponden para AVU al 10% y todos los valores de A. El máximo se obtiene para AGC, X=20% y A=4.

8.5.3. Análisis de las emisiones de CO a P=14 BAR

Se muestra a continuación la matriz de resultados obtenidos:

Tabla 8.15: Matriz e resultados para emisiones de CO

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Posición de admisión (A)	3,5	66	65	44	23	ACC	Tipo de aceite (T)
	4	57	46	34	22		
	4,5	84	60	46	29		
	3,5	0	20	30	31	AVU	
	4	3	23	30	31		
	4,5	5	20	29	38		
	3,5	65	51	38	24	AGC	
	4	73	50	40	21		
	4,5	133	70	63	36		
	3,5	70	77	41	26	AGR	
	4	76	79	46	24		
	4,5	123	122	79	38		
	3,5	55	69	50	36	ASC	
	4	56	69	51	35		
	4,5	53	66	49	34		
3,5	13	22	25	31	ASR		
4	17	23	28	31			
4,5	15	21	26	29			
		Presión de inyección: 14 bar					

Con los datos ya dispuestos, se plantea un análisis de varianza (ANOVA), mediante el cual se determinará si las tres variables influyen (presión de inyección, tipo de aceite y porcentaje de aceite en peso) o no y de qué manera.

Tabla 8.16: Análisis ANOVA emisiones CO para 14 bar

FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
A	2	2492,694	1246,347	30,417	3,316	SI	6,06813E-08
T	5	19746,569	3949,314	96,383	2,534	SI	1,4946E-17
X	3	6723,375	2241,125	54,695	2,922	SI	2,84491E-12
AxT	10	3852,972	385,297	9,403	2,165	SI	7,87672E-07
AxX	6	665,750	110,958	2,708	2,421	SI	0,03194129
TxX	15	14831,375	988,758	24,131	2,015	SI	1,08796E-12
Error	30	1229,250	40,975				
Total	71	49541,986					

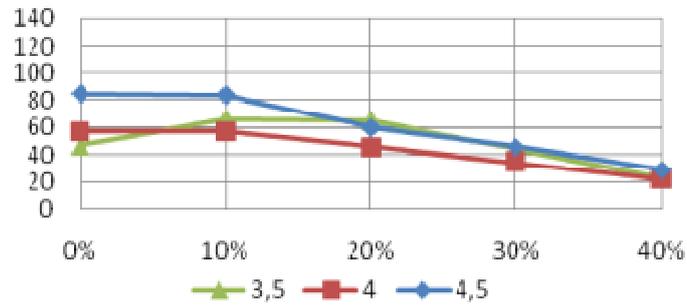
La interpretación del análisis es la siguiente: para un análisis con un 5% de confiabilidad, se tiene que todas las variables contempladas en el estudio son influyentes. Como en estudios anteriores, medimos el grado de influencia de las mismas por el valor crítico del grado de confiabilidad. En este caso, el grado de confiabilidad más “discutible” sería el de la

interacción AxX, la cual estaría en un 3,2%. Ya en los ANOVAS anteriores, esta variable había sido la que menos influencia había tenido.

Se puede sacar la conclusión de que la variable más significativa es el tipo de aceite, con un orden de confiabilidad crítico del orden de 10^{-15} (en términos porcentuales, en términos absolutos en tanto por 1 es 10^{-17}). A continuación, en orden de importancia, se sitúa la variable X junto con la interacción TxX, ambas con órdenes de magnitud del orden de 10^{-10} %. Después iría la variable A (10^{-6} %), luego AxT (10^{-3} %), y por último AxX (3%).

En un principio, volvería a ser T la variable más influyente del estudio seguida por el porcentaje de aceite en la mezcla. La influencia de la posición de admisión del aire es menor.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite de colza crudo (T=ACC)

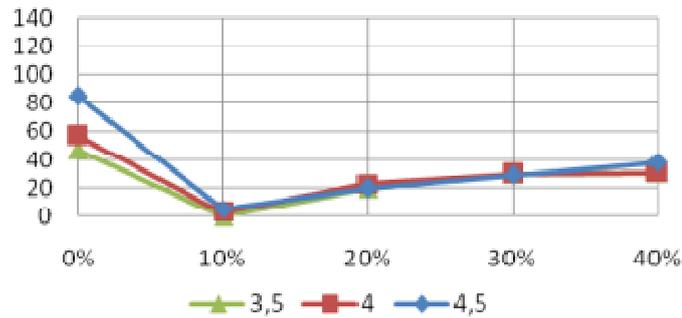


ACC, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	47	66	65	44	23
A=4	57	57	46	34	22
A=4,5	85	84	60	46	29

Figura 8.103: Emisiones para P=14 bar y T=ACC

Se observa tendencia al descenso de las emisiones de CO con el aumento de X. Además, puede verse que al contrario de lo esperado, las emisiones para A=3,5 son mayores que las obtenidas para A=4.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite vegetal usado (T=AVU)

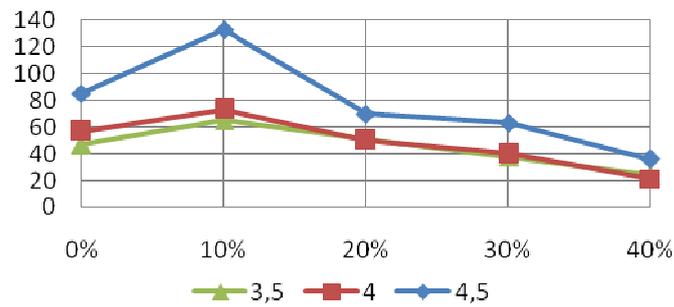


AVU, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	47	0	20	30	31
A=4	57	3	23	30	31
A=4,5	85	5	20	29	38

Figura 8.104: Emisiones para P=14 bar y T=AVU

Tendencia al alza con el valor de X, al contrario que lo que ocurría con el ACC. Valores bastante acotados, no superando las 38 ppm. Además, se tiene poca variación con los distintos grados de admisión de aire.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite de girasol crudo (T=AGC)

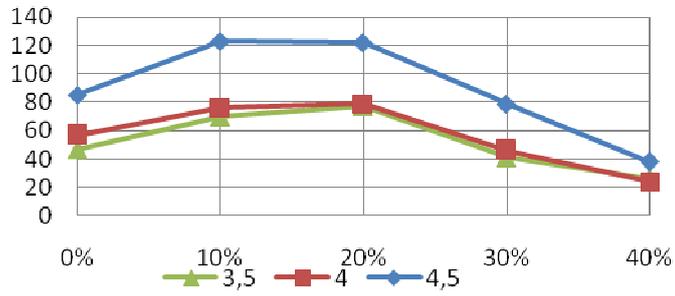


AGC, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	47	65	51	38	24
A=4	57	73	50	40	21
A=4,5	85	133	70	63	36

Figura 8.105: Emisiones para P=14 bar y T=AGC

Misma tendencia a la baja, con picos para X=10%. Puede verse además la influencia de la variable A (mayores emisiones para los A altos).

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite de girasol refinado (T=AGR)

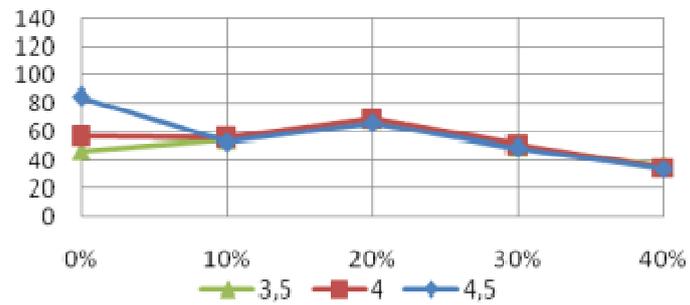


AGR, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	47	70	77	41	26
A=4	57	76	79	46	24
A=4,5	85	123	122	79	38

Figura 8.106: Emisiones para P=14 bar y T=AGR

En este caso, se tienen picos para X=10 y X=20 %. La tendencia a partir de ahí es a la baja. Para A=4,5 se tienen los valores de emisiones más altos. No se aprecian grandes diferencias entre las otras dos posiciones de admisión de aire.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite de soja crudo (T=ASC)

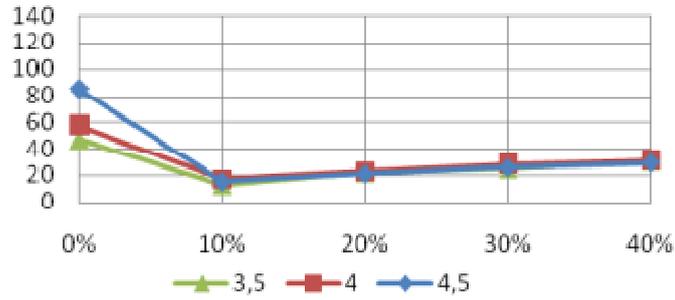


ASC, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	47	55	69	50	36
A=4	57	56	69	51	35
A=4,5	85	53	66	49	34

Figura 8.107: Emisiones para P=14 bar y T=ASC

Tendencia a la baja para valores a partir de X=20%, porcentaje para el cual se tienen picos en las emisiones, pero picos menos altos que en aceites anteriores. La influencia de la variable A es nula.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el aceite de soja refinado (T=ASR)

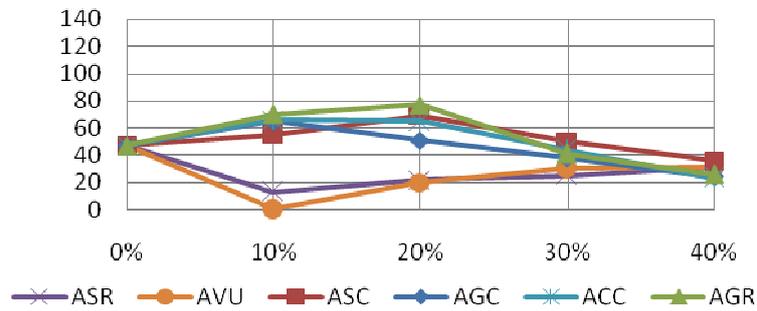


ASR, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	47	13	22	25	31
A=4	57	17	23	28	31
A=4,5	85	15	21	26	29

Figura 8.108: Emisiones para P=14 bar y T=ASR

Tendencia al alta con el aumento del porcentaje de aceite en mezcla, si bien puede apreciarse que el aumento es muy ligero. La influencia de la posición de la admisión del aire es de nuevo nula. Los valores obtenidos son los mejores que en los aceites anteriores.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para la posición de aire A=3,5

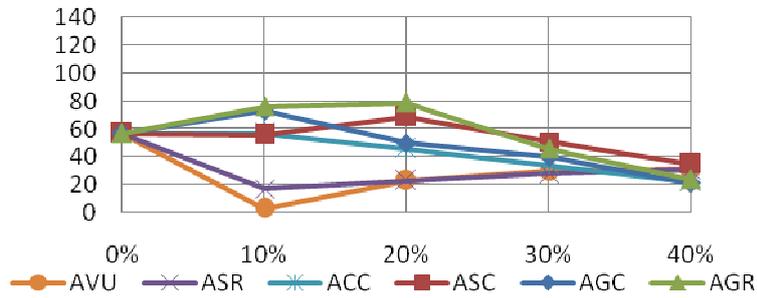


A=3,5, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	47	66	65	44	23
AVU	47	0	20	30	31
AGC	47	65	51	38	24
AGR	47	70	77	41	26
ASC	47	55	69	50	36
ASR	47	13	22	25	31

Figura 8.109: Emisiones para P=14 bar y A=3,5

Puede observarse la distinta tendencia que sufren ASR y AVU para la zona entre 10 y 20%: estas aceites tienen menores emisiones mientras que el resto de aceites obtienen sus mayores valores. Para X=40%, los valores se igualan.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para la posición de aire A=4

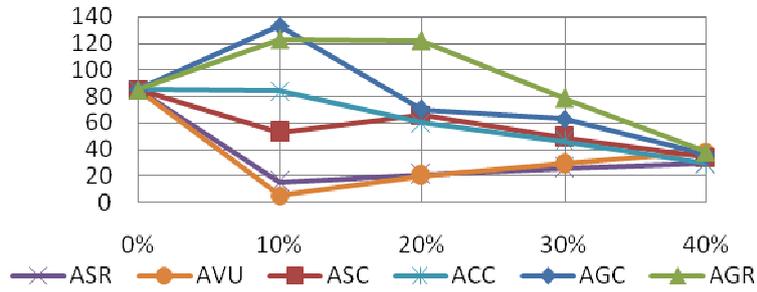


A=4, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
AC	57	57	46	34	22
AVU	57	3	23	30	31
AGC	57	73	50	40	21
AGR	57	76	79	46	24
ASC	57	56	69	51	35
ASR	57	17	23	28	31

Figura 8.110: Emisiones para P=14 bar y A=4

Nuevamente se tiene que la tendencia de AVU y ASR son contrarias a la de las demás. Valores cercanos en las emisiones para X=40%.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para la posición de aire A=4,5

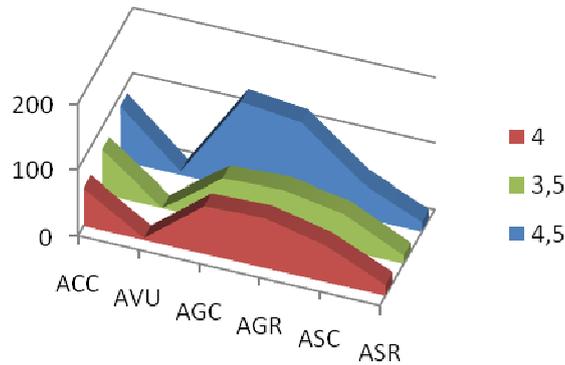


A=4,5, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
AC	85	84	60	46	29
AVU	85	5	20	29	38
AGC	85	133	70	63	36
AGR	85	123	122	79	38
ASC	85	53	66	49	34
ASR	85	15	21	26	29

Figura 8.111: Emisiones para P=14 bar y A=4,5

Comportamiento parecido pero no similar a los anteriores. AGR y AGC ofrecen los mayores niveles de emisión (los mayores del estudio se obtienen aquí), si bien para porcentajes altos de aceite vuelven a acercarse unos a otros. Las emisiones de ASR y AVU vuelven a ser las menores.

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso de X=10%



X=10%, P=14bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	66	0	65	70	55	13
A=4	57	3	73	76	56	17
A=4,5	84	5	133	123	53	15

Figura 8.112: Emisiones para P=14 bar y X=10%

Las menores emisiones de CO las consigue el AVU, seguido por el ASR. Ambos aceites de girasol obtienen los peores resultados. La influencia de la posición de admisión de aire es clara para la máxima admisión, sin embargo el efecto entre A=3,5 y A=4 no es tan clara. En la segunda gráfica puede observarse que tanto AVU como ASR emiten bastante menos que las demás. Además, se aprecia un gran aumento de las emisiones para el aceite de girasol cuando A crece.

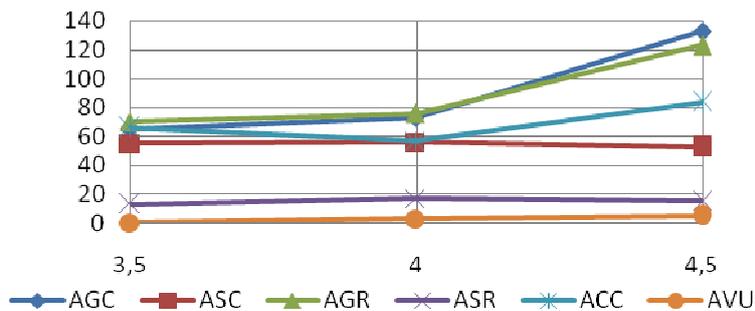
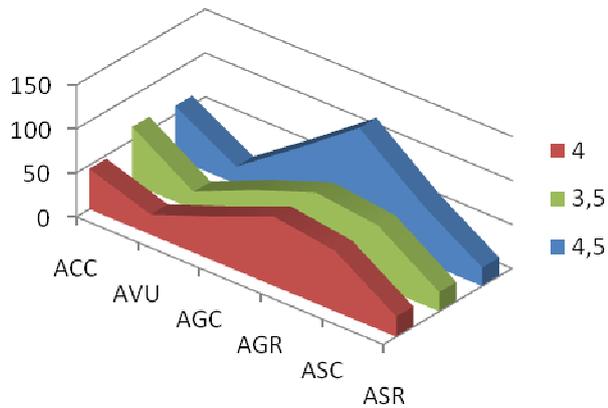


Figura 8.113: Emisiones para P=14 bar y X=10%

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso de X=20%



X=20%, P=14bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	65	20	51	77	69	22
A=4	46	23	50	79	69	23
A=4,5	60	20	70	122	66	21

Figura 8.114: Emisiones para P=14 bar y X=20%

Se observa que el mayor nivel de emisiones se obtiene para el AGR. AVU y ASR obtienen los menores niveles de emisiones, mientras que ASC, ACC y AGC se mueven en niveles bastante parecidos. La influencia del aire sólo se hace notar en los aceites de girasol.

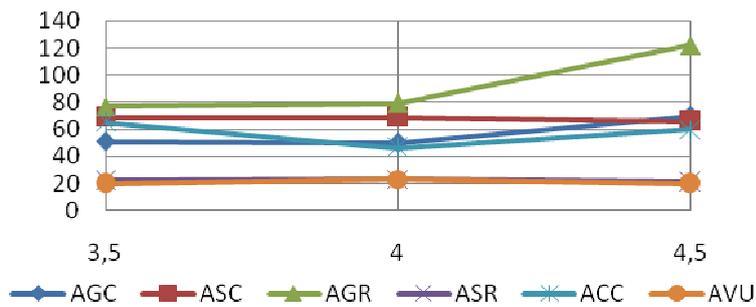
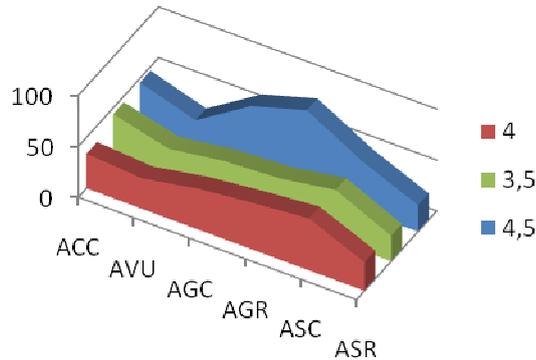


Figura 8.115: Emisiones para P=14 bar y X=20%

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso de X=30%



X=30%, P=14bar	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	44	30	38	41	50	25
A=4	34	30	40	46	51	28
A=4,5	46	29	63	79	49	26

Figura 8.116: Emisiones para P=14 bar y X=30%

Como se había observado en otras gráficas, los niveles de emisiones van homogeneizándose cuando aumenta el porcentaje de aceite en la mezcla. Se tiene un máximo de nuevo en AGR, sin embargo no es tan alto. Los mínimos que teníamos antes, tanto AVU como ASR, siguen siéndolo pero las emisiones aumentan. La influencia del aire no es tan clara de ver como en otras gráficas.

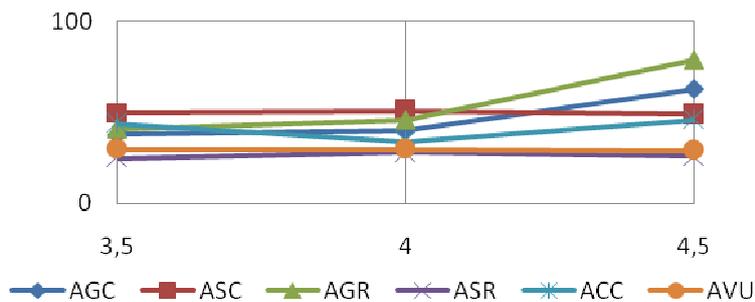
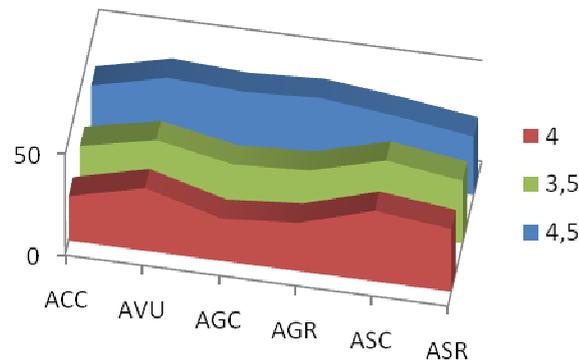


Figura 8.117: Emisiones para P=14 bar y X=30%

Representaciones gráficas de las emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso de X=40%



X=40%, P=14bar	AC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	23	31	24	26	36	31
A=4	22	31	21	24	35	31
A=4,5	29	38	36	38	34	29

Figura 8.118: Emisiones para P=14 bar y X=40%

Los niveles de emisiones para la máxima concentración de aceite en la mezcla son menores que los vistos hasta ahora. La tendencia que siguen tanto ASR como AVU sigue siendo a la alta, y en este caso el nivel de emisiones que presentan es mayor que el de otros aceites. De hecho, los mínimos son conseguidos por el grupo de aceites que daba mayor nivel de emisiones a porcentajes bajos. La influencia de la posición de admisión de aire es clara para la máxima posición, pero no lo es tanto para las dos menores, con valores muy parecidos.

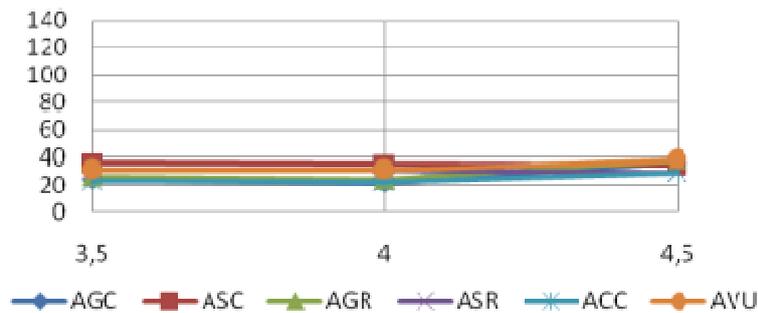


Figura 8.119: Emisiones para P=14 bar y X=40%

8.4.3.1. Conclusiones

El análisis tanto del ANOVA como de las representaciones gráficas da como conclusiones las siguientes:

- Como primera conclusión del estudio, destaca la diferencia en el comportamiento que ofrecen el AVU y el ASR frente al resto de aceites. Se tiene que estos dos aceites presentan más emisiones cuanto más aceite hay en la mezcla, partiendo de valores cercanos a cero para llegar a valores sobre las 30-40 ppm.
- Por otro lado, el ASC y el ACC se mantienen en valores intermedios y sufren un pico en torno a $X=20\%$ uno y a 10% el otro, para después descender.
- Por último, los aceites de girasol ofrecen un descenso en las emisiones según el porcentaje de aceite va aumentando. Las mínimas emisiones se consiguen con $X=40\%$.
- Siendo como son las tendencias que se han comentado, cabe destacar que las ppm obtenidas para $X=40\%$ son, en conjunto, las más bajas. Sólo las citadas AVU y ASR no se encuentran en este porcentaje en su mínimo.
- Resulta difícil hacer una distinción clara en lo que a posición de admisión de aire se refiere. El comportamiento observado ofrece mayores emisiones para $A=4,5$, pero no se llega a distinguir con claridad si la posición $A=4$ o la posición $A=3,5$ son las que ofrecen menores emisiones, ya que se resparten los mínimos.
- Dependiendo del tipo de aceite que se usase para sustituir al gasoil, se tendrían, según se acaba de comentar, que para dos de los aceites la estrategia sería un porcentaje mínimo de sustitución, con lo cual mejoraríamos las emisiones del gasoil puro; para el resto de aceites, la combustión mejora cuanto más aceite tenemos en la mezcla.

8.5.4. Análisis de las emisiones de CO para $\alpha=3,5$

A continuación se exponen los datos registrados para este análisis:

Tabla 8.17 Matriz de datos de emisiones de CO

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Presión de inyección (P)	10	380	300	324	200	ACC	Tipo de aceite (T)
	12	121	87	56	39		
	14	66	65	44	23		
	10	0	0	21	20	AVU	
	12	0	14	27	29		
	14	0	20	30	31		
	10	321	288	254	115	AGC	
	12	120	91	75	30		
	14	65	51	38	24		
	10	450	644	476	120	AGR	
	12	140	158	64	39		
	14	70	77	41	26		
	10	17	22	37	23	ASC	
	12	47	61	49	35		
	14	55	69	50	36		
	10	0	0	8	18	ASR	
	12	7	15	23	29		
	14	13	22	25	31		
		Grado de apertura de aire constante (A=3,5)					

Con los datos ya dispuestos, se plantea un análisis de varianza (ANOVA), mediante el cual se determinará si las tres variables influyen (presión de inyección, tipo de aceite y porcentaje de aceites en peso) o no y de qué manera.

Tabla 8.18: Análisis ANOVA

FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
P	2	232513,000	116256,500	56,287	3,316	SI	7,01728E-11
T	5	329737,833	65947,567	31,930	2,534	SI	3,76322E-11
X	3	42152,167	14050,722	6,803	2,922	SI	0,00123818
PxT	10	337311,167	33731,117	16,331	2,165	SI	1,508E-09
PxX	6	25923,667	4320,611	2,092	2,421	NO	0,08386236
TxX	15	81133,500	5408,900	2,619	2,015	SI	0,012064153
Error	30	61962,167	2065,406				
Total	71						

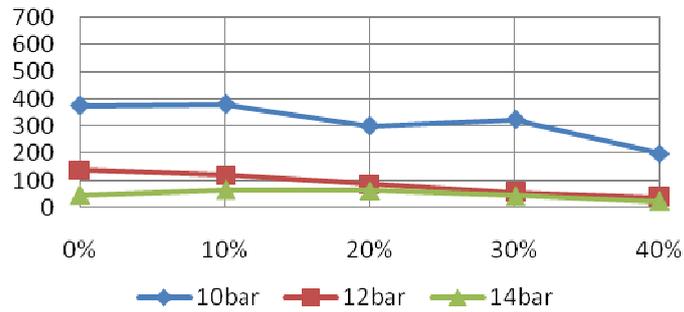
Vistos los resultados de la tabla ANOVA generada, se tiene que la única variable rechazada por el análisis ANOVA para un nivel de significación del 5% es la interacción PxX (presión y porcentaje en mezcla). Sin embargo, y como se ha dicho en otros análisis, viendo el valor crítico del grado de significación de esta variable, se queda cerca, con un 8,38%. Además, se tiene también que la interacción TxX ofrece un nivel de significación crítico del 1,2%, valor que si bien es aceptado en el análisis, probablemente no ofrezca la influencia que los demás ofrecen.

Como variables más significativas se tienen la presión de inyección (P) y el tipo de aceite (T), ambas con un nivel de significación crítico del orden de 10^{-9} %. A continuación, la interacción de ambas (PxT) con un nivel del 10^{-7} %. Por último, la variable porcentaje en peso (X) con un 0,12%, además de la ya citada TxX con un 1,2%.

Por tanto, viendo el análisis, queda claro que la variable X es la que menos influencia tiene en el estudio: ni ella misma ni sus interacciones ofrecen grandes niveles de significación. Es destacable además el gran nivel que la interacción PxT ofrece.

Se representan a continuación los valores obtenidos para la variable rendimiento en función de las variables P, X y T.

Representaciones gráficas de emisiones de CO para el aceite de colza crudo (T=ACC) con A=3,5

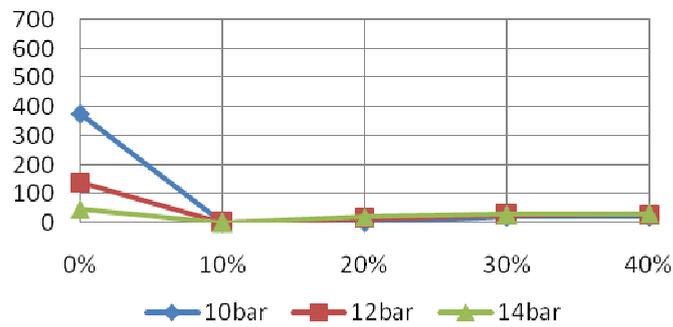


ACC, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	376	380	300	324	200
P=12bar	139	121	87	56	39
P=14bar	47	66	65	44	23

Figura 8.120: Emisiones de CO para A=3,5 y T= ACC

El análisis para el AC denota mucho cambio en lo que a comportamiento con la presión se refiere: la presión más baja ofrece unos niveles de emisión más altos. Después, la diferencia en las emisiones entre las dos presiones menores no es tan amplia, aunque existe. Como se vio en el análisis anterior, el ACC es de los aceites cuyo comportamiento en lo que a emisiones se refiere se ve mejorado con el aumento del porcentaje en mezcla.

Representaciones gráficas de emisiones de CO para el aceite vegetal usado (T=AVU) con A=3,5

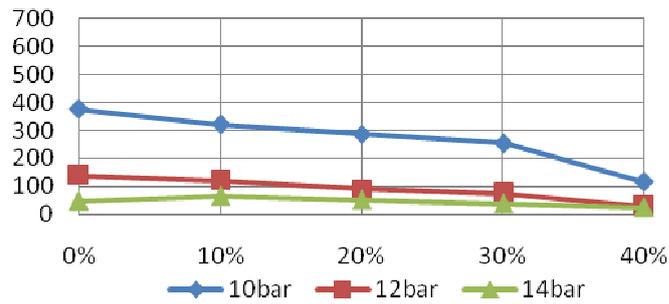


AVU, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	376	0	0	21	20
P=12bar	139	0	14	27	29
P=14bar	47	0	20	30	31

Figura 8.121: Emisiones de CO para A=3,5 y T= AVU

Se observa poca influencia con la presión (únicamente en los valores de referencia 0% se ve claramente diferencia, y ese no es el estudio). Además, como se vio antes, el AVU es de los aceites cuyas emisiones aumentan aumentando su porcentaje en mezcla.

Representaciones gráficas de emisiones de CO para el aceite de girasol crudo (T=AGC) con A=3,5

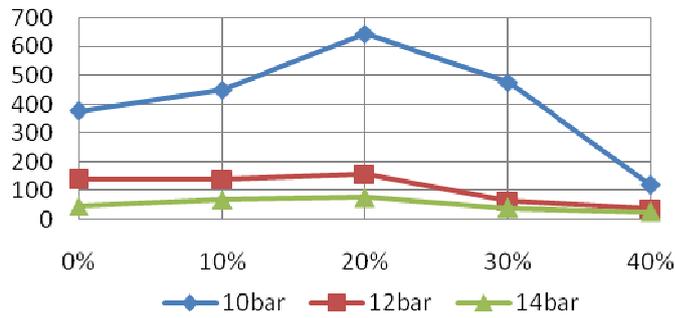


AGC, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	376	321	288	254	115
P=12bar	139	120	91	75	30
P=14bar	47	65	51	38	24

Figura 8.122: Emisiones de CO para A=3,5 y T= AGC.

Se nota la influencia de la presión, con mayores emisiones a menores presiones. Se ve además la tendencia a disminuir dichas emisiones con el aumento del porcentaje en mezcla.

Representaciones gráficas de emisiones de CO para el aceite de girasol refinado (T=AGR) con A=3,5

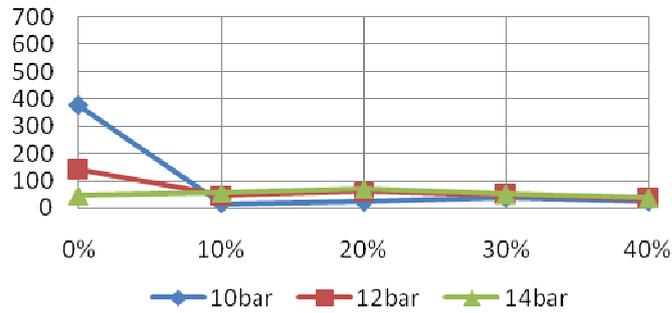


AGR, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	376	450	644	476	120
P=12bar	139	140	158	64	39
P=14bar	47	70	77	41	26

Figura 8.123: Emisiones de CO para A=3,5 y T= AGR

El AGR ofrece un pico de emisiones para todas las presiones a X=20%, para después disminuir éstas. Se aprecia la influencia de la presión claramente en la gráfica (y en la tabla).

Representaciones gráficas de emisiones de CO para el aceite de soja crudo (T=ASC) con A=3,5

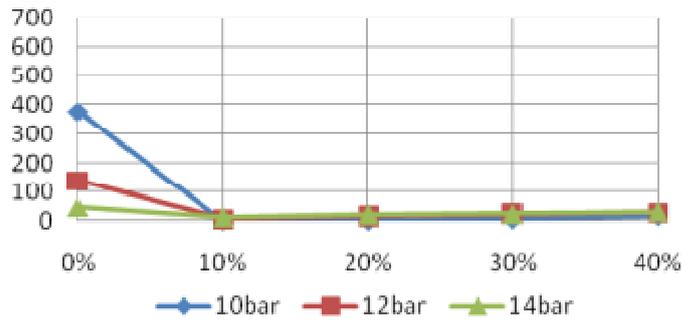


ASC, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	376	17	22	37	23
P=12bar	139	47	61	49	35
P=14bar	47	55	69	50	36

Figura 8.124: Emisiones de CO para A=3,5 y T= ASC

El ASC ofrece picos para X=20% y da su mínimo para X=40%. Resulta curioso el comportamiento con la presión, ya que es el inverso al visto hasta ahora: se tienen las mínimas emisiones para la presión mínima, si bien las máximas las ofrece la presión intermedia.

Representaciones gráficas de emisiones de CO para el aceite de soja refinado (T=ASR) con A=3,5

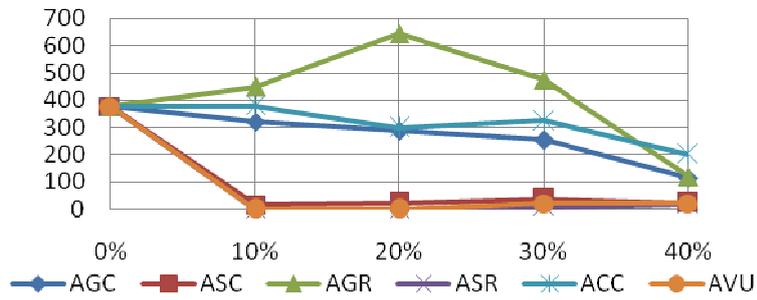


ASR, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10bar	376	0	0	8	18
P=12bar	139	7	15	23	29
P=14bar	47	13	22	25	31

Figura 8.125: Emisiones de CO para A=3,5 y T= ASR

Se tiene un nivel bajo de emisiones en el ASR. La tendencia es positiva tanto con el aumento del porcentaje de aceite en mezcla como con el aumento de presión (tal y como pasaba en AVU). Se consiguen emisiones cero a baja presión y bajo porcentaje.

Representaciones gráficas de emisiones de CO para la presión de inyección P=10 bar con A=3,5

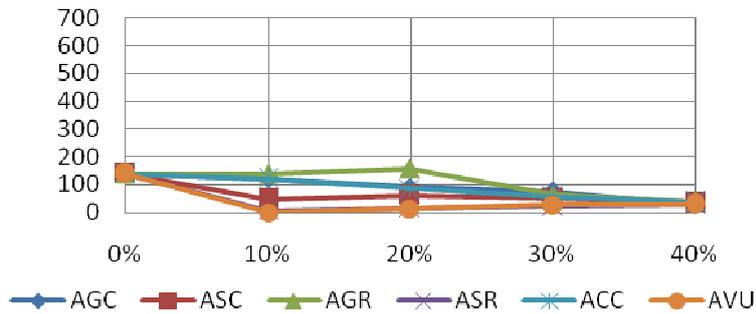


P=10bar, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	376	380	300	324	200
AVU	376	0	0	21	20
AGC	376	321	288	254	115
AGR	376	450	644	476	120
ASC	376	17	22	37	23
ASR	376	0	0	8	18

Figura 8.126: Emisiones de CO para A=3,5 y P= 10 bar

Se observa en el gráfico que tanto AVU como los aceites de soja ofrecen uno nivel mucho menor de emisión para esta presión.

Representaciones gráficas de emisiones de CO para la presión de inyección P=12 bar con A=3,5

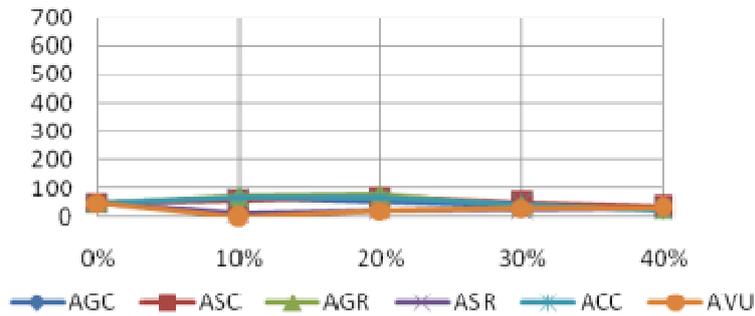


P=12bar, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	139	121	87	56	39
AVU	139	0	14	27	29
AGC	139	120	91	75	30
AGR	139	140	158	64	39
ASC	139	47	61	49	35
ASR	139	7	15	23	29

Figura 8.127: Emisiones de CO para A=3,5 y P= 12 bar

Para P=12 bar, se observan tres tendencias distintas: por un lado, una en la que las emisiones disminuyen cuando X aumenta (AGR, AGC y ACC); por otro lado, AVU y ASR, con una tendencia contraria a la anterior; y por último, la de ASC, que es intermedia entre las dos, tanto por valores como por tendencia, ya que alcanza un pico en 20% (hasta ahí aumenta) y después disminuye.

Representaciones gráficas de emisiones de CO para la presión de inyección P=14 bar con A=3,5

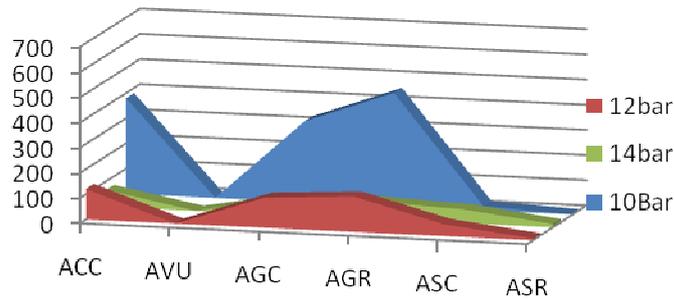


P=14bar, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	47	66	65	44	23
AVU	47	0	20	30	31
AGC	47	65	51	38	24
AGR	47	70	77	41	26
ASC	47	55	69	50	36
ASR	47	13	22	25	31

Figura 8.128: Emisiones de CO para A=3,5 y P= 14 bar

La tendencia es la misma que la que vimos en el análisis anterior, pero con valores más homogéneos y más bajos. De esta forma, las emisiones llegan a converger en un rango relativamente estrecho para X=40%: unas porque han aumentado y otras porque han disminuido.

Representaciones gráficas de emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso X=10% con A=3,5



X=10%, A=3,5	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10 bar	380	0	321	450	17	0
P=12 bar	121	0	120	140	47	7
P=14 bar	66	0	65	70	55	13

Figura 8.129: Emisiones de CO para A=3,5 y X= 10%

Se ve clara la tendencia: tres aceites con muy bajas emisiones (ASC, ASR y AVU) y tres aceites con emisiones mayores (AGC, AGR y ACC). El máximo lo consigue el AGR (450 ppm).

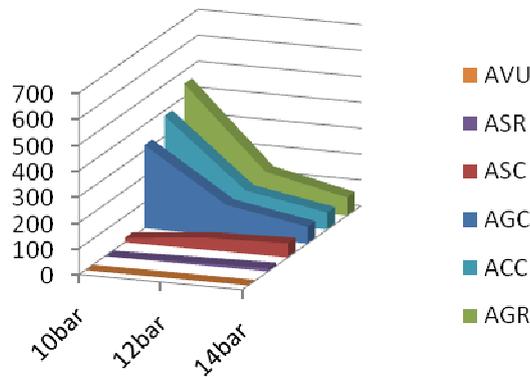
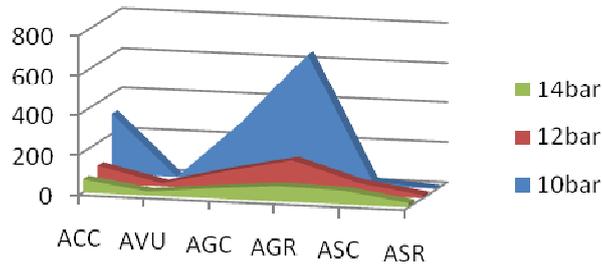


Figura 8.130: Emisiones de CO para A=3,5 y X= 10%

Representaciones gráficas de emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso X=20% con A=3,5



X=20%, A=3,5	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10 bar	300	0	288	644	22	0
P=12 bar	87	14	91	158	61	15
P=14 bar	65	20	51	77	69	22

Figura 8.131: Emisiones de CO para A=3,5 y X= 20%

Las emisiones que da el AGR son las mayores del estudio: aumentan consiguiendo un pico para X=20%, mientras que ACC y AGC no sufren este acusado pico. AVU y ASR tienen mínimos para P=10bar (0 ppm).

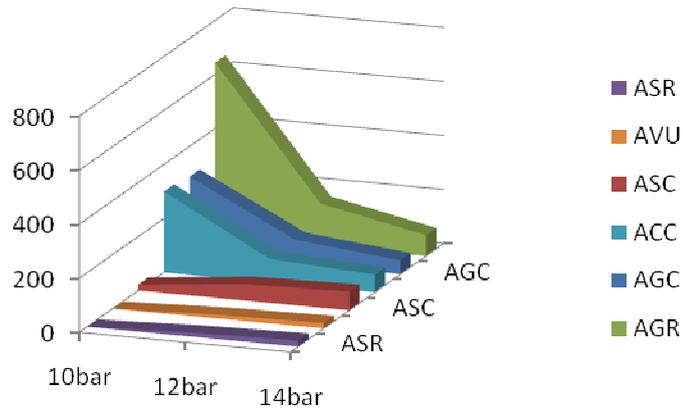
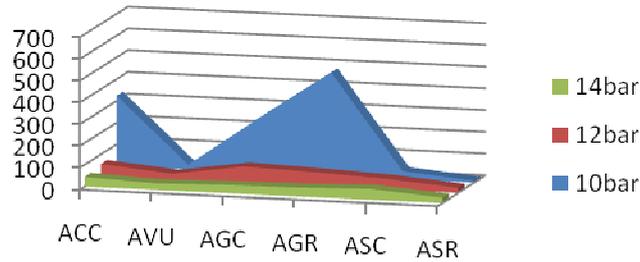


Figura 8.132: Emisiones de CO para A=3,5 y X= 20%

Representaciones gráficas de emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso X=30% con A=3,5



X=30%, A=3,5	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10 bar	324	21	254	476	37	8
P=12 bar	56	27	75	64	49	23
P=14 bar	44	30	38	41	50	25

Figura 8.133: Emisiones de CO para A=3,5 y X= 30%

En este caso, las emisiones producidas son menores que las anteriores, pero están situadas en los mismos puntos (son los mismos aceites). Aumentan las emisiones de los aceites que antes daban menos, camino esto hacia la homogeneización que se anunciaba antes. Máximo: 476 ppm para AGC y P=10bar.

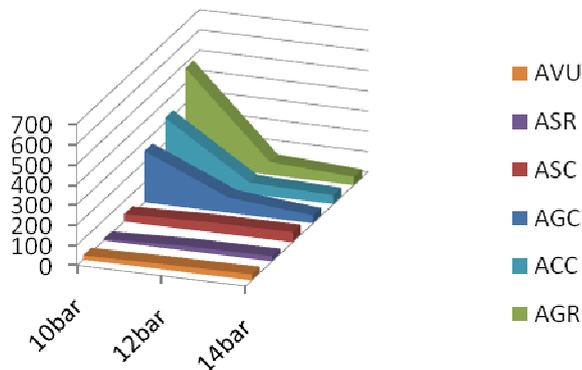
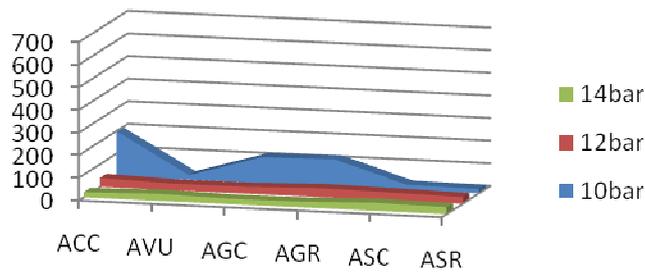


Figura 8.134: Emisiones de CO para A=3,5 y X= 30%

Representaciones gráficas de emisiones de CO para el porcentaje de aceite en peso X=30% con A=4



X=40%, A=3,5	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10 bar	200	20	115	120	23	18
P=12 bar	39	29	30	39	35	29
P=14 bar	23	31	24	26	36	31

Figura 8.135: Emisiones de CO para A=3,5 y X= 40%

Se tiene en este caso un máximo anormalmente alto (vista la tendencia) en ACC y P=10 bar. Se obtienen también máximos relativos para esa presión y los aceites de girasol. Cabe también destacar el comportamiento estable que muestran los aceites de soja y el vegetal usado, con valores todos entre 18 y 36 ppm. La influencia de la presión depende del tipo de aceite (interacción PxT).

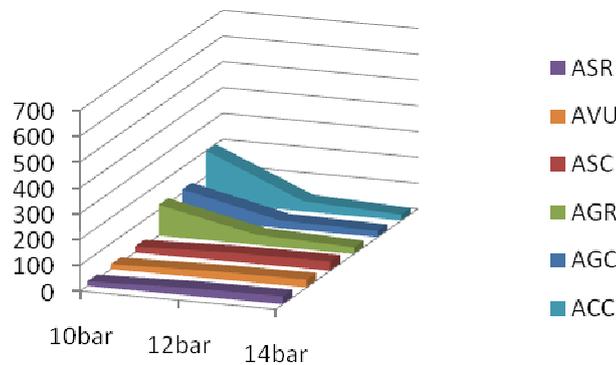


Figura 8.136: Emisiones de CO para A=3,5 y X= 40%

8.4.4.1. Conclusiones

El análisis tanto del ANOVA como de las representaciones gráficas da como conclusiones las siguientes:

- La influencia de la interacción PxT, ya comentada en el análisis ANOVA, queda refrendada después de ver las gráficas y las tablas expuestas. Por un lado, se tiene que para AVU, ASC y ASR las emisiones aumentan cuando aumenta la presión de inyección del combustible, mientras que disminuyen para el resto de aceites.
- Dentro del análisis de cada aceite, se tiene que las que tienen una interacción positiva con la presión (aumentan las emisiones cuando ésta aumenta) presentan también un comportamiento con el aumento del porcentaje en mezcla, de modo que las emisiones aumentan cuanto más aceite hay en la mezcla. El ASC no ofrece una tendencia tan clara, con picos de emisiones en el 20%. Asimismo, también el AGR ofrece picos de emisiones para el 20%, pero estos picos son de valores mucho mayores. Los aceites de girasol no ofrecen picos, sino tendencias negativas con el porcentaje de aceite en mezcla, de modo que la comparativa para el porcentaje mayor (40%) ofrece unos resultados bastante homogéneos dentro de todos los tipos de aceite.
- Queda patente también lo diferente del resultado del refino en girasol y soja: el ASR ofrece los mejores resultados (junto con el AVU), mientras que el AGR no sólo es peor que el AGC, si no que es el peor en una buena cantidad de condiciones de ensayo.

Como conclusión final a este análisis, puede decirse que, a caudal de aire constante, dependerá de la presión de inyección el aceite a elegir. Normalmente elegiríamos siempre AVU y ASR, pero para altos porcentajes de sustitución se podría valorar el elegir cualquiera de los otros aceites por delante de estos.

8.5. ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE NOx

Se estudian a continuación las emisiones de NOx (en ppm) medidas con el medidor Testo modelo 342-3. Se realizan los análisis a presión constante (10, 12 y 14 bar) y a posición de admisión de aire constante para las distintas mezclas.

8.5.1. Análisis de las emisiones de NOx para P=10bar

Tabla 8.19 Matriz de resultados para P=10bar

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Posición de admisión (A)	2,5	26	31	29	35	ACC	Tipo de aceite (T)
	3	26	28	28	33		
	3,5	24	25	24	28		
	2,5	31	26	27	32	AVU	
	3	30	23	30	27		
	3,5	28	30	33	22		
	2,5	22	22	22	24	AGC	
	3	20	20	20	23		
	3,5	17	18	16	19		
	2,5	22	24	27	32	AGR	
	3	21	22	23	32		
	3,5	18	16	19	33		
	2,5	22	20	23	28	ASC	
	3	20	18	23	26		
	3,5	18	15	20	22		
2,5	28	28	30	34	ASR		
3	26	28	31	30			
3,5	23	25	27	32			
		Presión de inyección: 10 bar					

Con estos datos, lo primero que se plantea es un análisis de varianza (ANOVA), mediante el cual se determinará si las tres variables influyen (admisión del aire, tipo de aceite y porcentaje de aceite en peso) o no y de

Tabla 8.20 Matriz de resultados para P=10bar

FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
A	2	182,694	91,347	19,356	3,316	SI	3,99415E-06
T	5	837,069	167,414	35,473	2,534	SI	1,0077E-11
X	3	310,375	103,458	21,922	2,922	SI	1,03345E-07
AxT	10	35,639	3,564	0,755	2,165	NO	0,66879327
AxX	6	8,083	1,347	0,285	2,421	NO	0,93927647
TxX	15	255,208	17,014	3,605	2,015	SI	0,00136102
Error	30	141,583	4,719				
Total	71	1770,653					

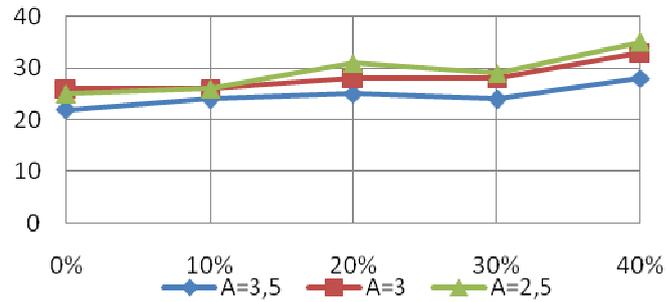
Vistos los resultados de la tabla ANOVA generada, se tiene que tanto la interacción AxT como la interacción AxX son rechazadas por el análisis ANOVA para un nivel de significación del 5%. Los valores críticos de significación de ambas interacciones son además valores muy altos, con lo que la conclusión es clara e indiscutible. La interacción sobrante, TxX, supera el análisis con un grado de confiabilidad crítico de 0,136%, lejos de los niveles de influencia que ofrecía esta misma interacción en análisis anteriores.

Como variables más significativas se tienen el tipo de aceite (T) (10^{-9} %) y porcentaje de aceite en la mezcla (X) (10^{-5}), con lo cual las emisiones de NO_x las marcarán las características del combustible que introduzcamos en la caldera. Sin embargo, la posición de la admisión del aire (A) también es una variable muy importante dentro del análisis ($3 \cdot 10^{-4}$ %), lo cual se verá a continuación.

Como conclusión del análisis ANOVA, se puede decir que a priori lo que marcará la cantidad de emisiones será la naturaleza del combustible por encima de las condiciones de admisión de aire.

Se representan a continuación los valores obtenidos para la variable rendimiento en función de las variables A, X y T.

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para el aceite de colza crudo (T=ACC)

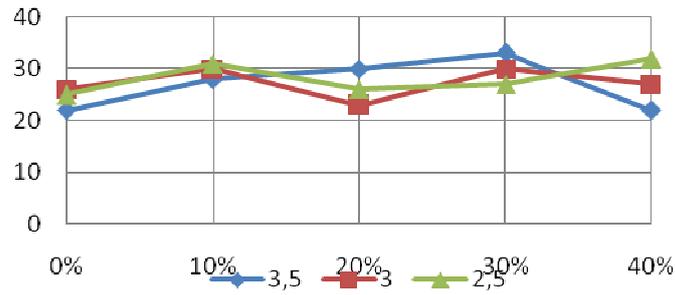


ACC, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	25	26	31	29	35
A=3	26	26	28	28	33
A=3,5	22	24	25	24	28

Figura 8.137: Emisiones para P=10bar y T=ACC

La gráfica muestra una ligera tendencia al alta cuando aumenta el porcentaje de aceite en mezcla. En cuanto a la posición de admisión de aire, se tienen menores emisiones con la posición más abierta (A mayor).

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para el aceite vegetal usado (T=AVU)

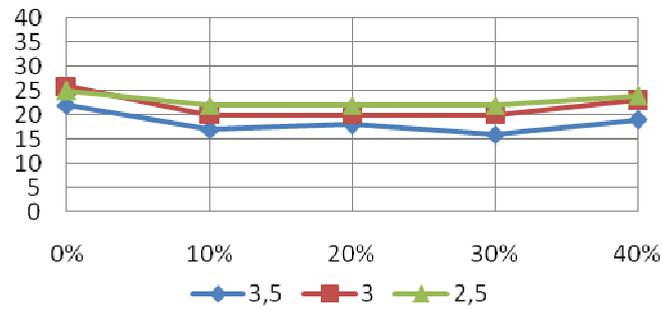


AVU, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	25	31	26	27	32
A=3	26	30	23	30	27
A=3,5	22	28	30	33	22

Figura 8.138: Emisiones para P=10bar y T=AVU

Cada posición de admisión de aire sigue un comportamiento, teniéndose el mínimo para A=3,5 y X=40%. Dependiendo del porcentaje, las emisiones crecen o decrecen con la posición de aire.

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para el aceite de girasol crudo (T=AGC)

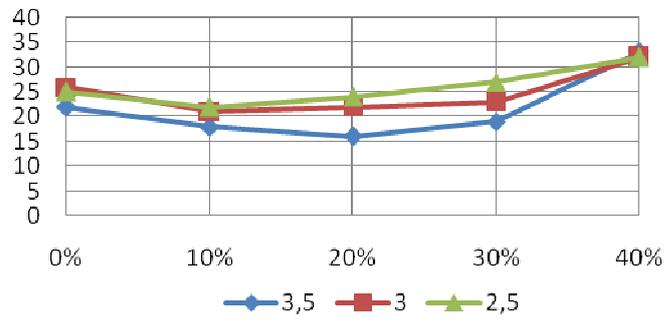


AGC, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	25	22	22	22	24
A=3	26	20	20	20	23
A=3,5	22	17	18	16	19

Figura 8.139: Emisiones para P=10bar y T=AGC

Tendencia al alza en las emisiones con el porcentaje de aceite en mezcla, y a la baja con la posición de admisión de aire. Se registra, sin embargo, máximos para X=40%.

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para el aceite de girasol refinado (T=AGR)

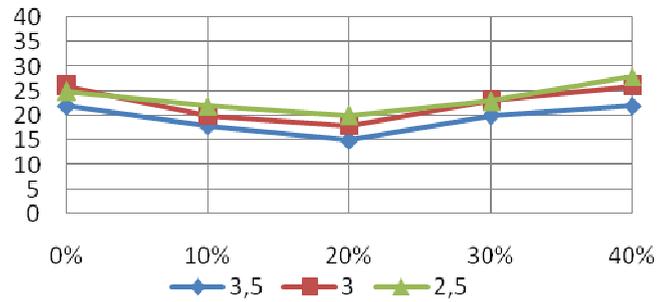


AGR, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	25	22	24	27	32
A=3	26	21	22	23	32
A=3,5	22	18	16	19	33

Figura 8.140: Emisiones para P=10bar y T=AGR

Se tienen máximos para X=40% tal y como ocurría en el aceite sin refinar, y tendencia a la baja con la posición de aire.

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para el aceite de soja crudo (T=ASC)

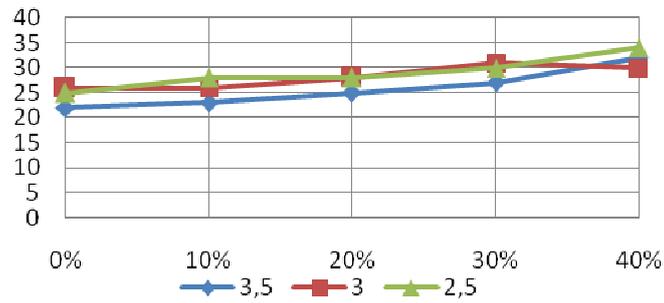


ASC, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	25	22	20	23	28
A=3	26	20	18	23	26
A=3,5	22	18	15	20	22

Figura 8.141: Emisiones para P=10bar y T=ASC

El gráfico muestra mínimos para el porcentaje X=20 % en todas las posiciones de admisión de aire. Tendencia a la baja con el aumento de la posición de admisión de aire.

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para el aceite de soja refinado (T=ASR)

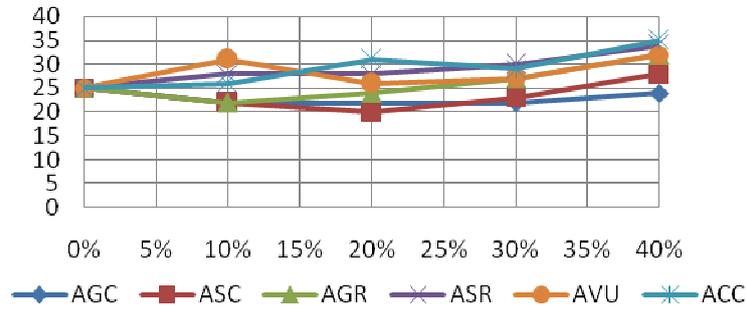


ASR, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=2,5	25	28	28	30	34
A=3	26	26	28	31	30
A=3,5	22	23	25	27	32

Figura 8.142: Emisiones para P=10bar y T=ASR

Poco tiene que ver la tendencia del aceite refinado con la del aceite sin refinar: el nivel de emisiones crece desde X=10% ininterrumpidamente para cada posición de admisión de aire.

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para la posición de aire A=2,5

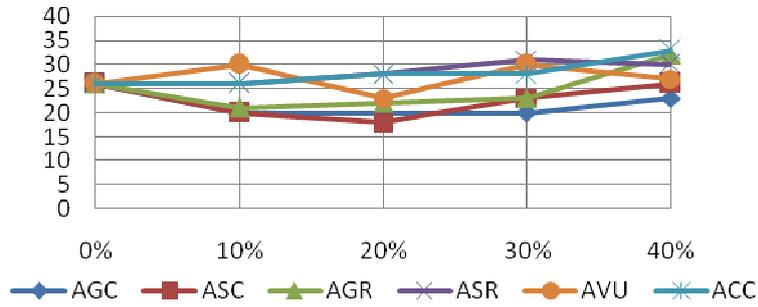


A=2,5, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	25	26	31	29	35
AVU	25	31	26	27	32
AGC	25	22	22	22	24
AGR	25	22	24	27	32
ASC	25	22	20	23	28
ASR	25	28	28	30	34

Figura 8.143: Emisiones para P=10bar y A=2,5

Ambos aceites crudos, AGC y ASC, ofrecen menores niveles de emisiones que los aceites refinados. El que peor nivel de emisiones presenta es el ACC, sobre todo en porcentajes altos en mezcla tiene un comportamiento peor que el de los demás. Destaca el pico que presenta el AVU para X=10%.

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para la posición de aire A=3

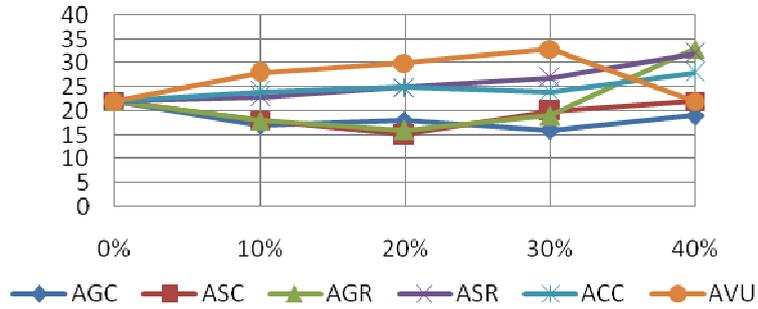


A=3, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	26	26	28	28	33
AVU	26	30	23	30	27
AGC	26	20	20	20	23
AGR	26	21	22	23	32
ASC	26	20	18	23	26
ASR	26	26	28	31	30

Figura 8.144: Emisiones para P=10bar y A=3

De nuevo destaca el menor nivel de emisiones de los aceites crudos con respecto a los aceites refinados de la misma especie (en primer término en la gráfica). Sin embargo, el AGR no da malos niveles de emisión, aunque estén por debajo del AGC. ACC, AVU y ASR dan más emisiones que los aceites citados anteriormente.

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para la posición de aire A=3,5

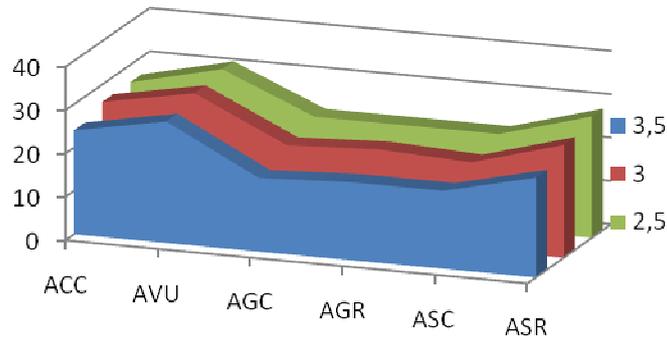


A=3,5, P=10bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	22	24	25	24	28
AVU	22	28	30	33	22
AGC	22	17	18	16	19
AGR	22	18	16	19	33
ASC	22	18	15	20	22
ASR	22	23	25	27	32

Figura 8.145: Emisiones para P=10bar y A=3,5

ASC y AGC vuelven a dar los mínimos. Los máximos los da el AVU, aunque para el máximo porcentaje ofrece un nivel de emisiones aceptable comparado con el de los demás. También da un nivel aceptable el AGR, no siendo así para el otro aceite refinado.

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=10%



X=10%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	26	31	22	22	22	28
A=3	26	30	20	21	20	26
A=3,5	24	28	17	18	18	23

Figura 8.146: Emisiones para P=10bar y X=10%

En la primera gráfica se observa que, para X=10%, el AVU da el peor nivel de emisiones, seguido por ASR y ACC. A su vez, se ve que las menores emisiones las dan los aceites de girasol y ASC. La segunda gráfica muestra que, en mayor o menor medida, el aumento de la apertura de la posición de aire disminuye las emisiones.

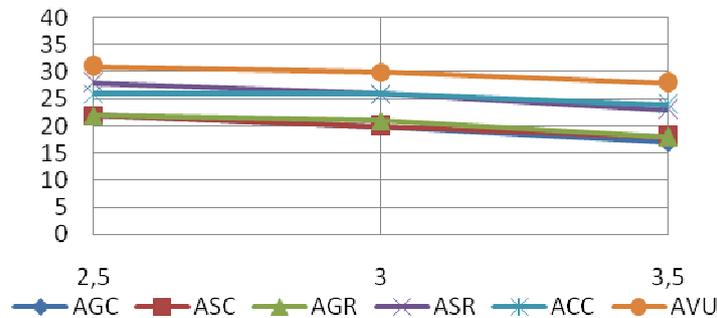
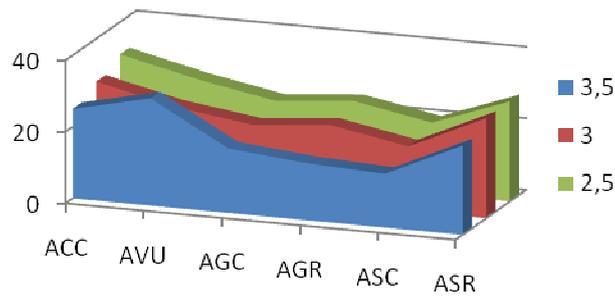


Figura 8.147: Emisiones para P=10bar y X=10%

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=20%



X=20%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	31	26	22	24	20	28
A=3	28	23	20	22	18	28
A=3,5	25	30	18	16	15	25

Figura 8.148: Emisiones para P=10bar y X=20%

Para este porcentaje de aceite, el ASC da las menores emisiones para cualquier posición del aire. La mayoría de aceites tienen tendencia a la disminución de emisiones cuando aumenta la posición de admisión de aire (salvando el pico del AVU para A=3,5). El segundo gráfico muestra claramente la existencia de dos niveles bien diferenciados: ACC, AVU y ASR dan emisiones altas, y AGC, AGR y ASC dan emisiones más bajas.

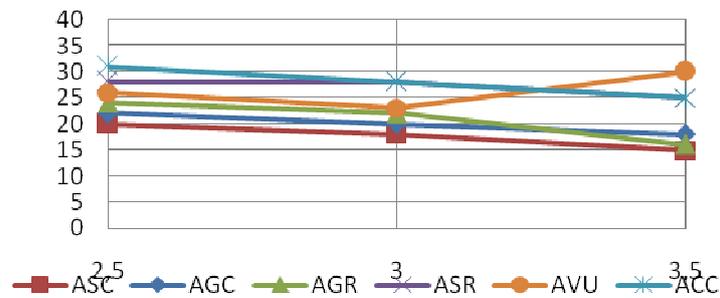
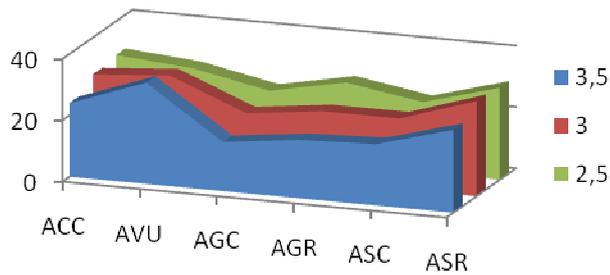


Figura 8.149: Emisiones para P=10bar y X=20%

Representaciones gráficas de la emisión de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=30%



X=30%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	29	27	22	27	23	30
A=3	28	30	20	23	23	31
A=3,5	24	33	16	19	20	27

Figura 8.150: Emisiones para P=10bar y X=30%

En este caso, los menores niveles de emisión de NO_x los da el AGC. El AGR tiene un comportamiento muy progresivo (a la baja) con la apertura de la admisión de aire. El ASC tiene un comportamiento bastante constante con la variación de A. Por último, tanto ASR, como ACC como AVU dan valores mayores, destacando que éste da, al contrario que los otros aceites, mayores emisiones a mayor posición de admisión de aire. Esto se aprecia claramente en la segunda gráfica.

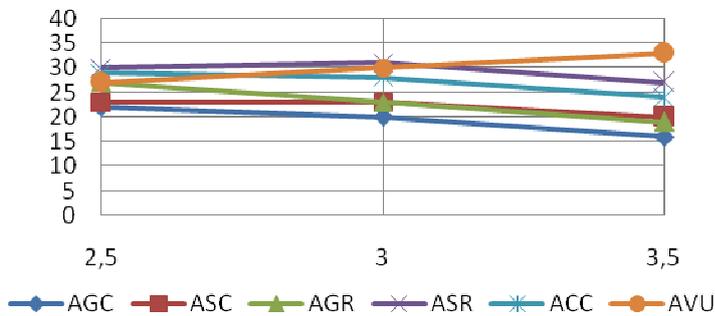
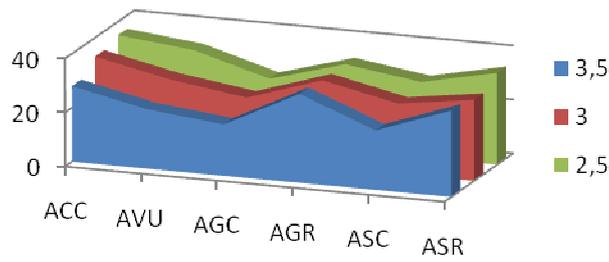


Figura 8.151: Emisiones para P=10bar y X=30%

Representaciones gráficas de la emisión de NO_x para el porcentaje en peso de aceite X=40%



X=40%, P=10bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=2,5	35	32	24	32	28	34
A=3	33	27	23	32	26	30
A=3,5	28	22	19	33	22	32

Figura 8.152: Emisiones para P=10bar y X=40%

El AGC ofrece los menores niveles de emisiones para cada posición de admisión de aire. A continuación, ASC y AVU. Tanto ACC, como AGR y ASR están un nivel por encima. Salvo el AGR, todos los aceites ofrecen un comportamiento inversamente proporcional al aumento en A.

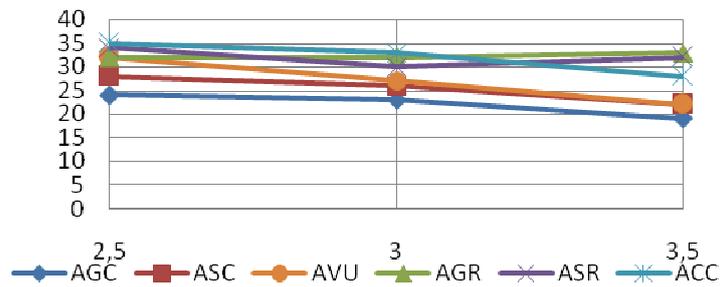


Figura 8.153: Emisiones para P=10bar y X=40%

8.5.1.1. Conclusiones

El análisis tanto del ANOVA como de las representaciones gráficas da como conclusiones las siguientes:

- El hecho de que la variable con mayor influencia en el análisis ANOVA sea el tipo de aceite (T) queda demostrado viendo la representación gráfica para cada tipo de aceite, no por valores, si no por la tendencia y las curvas que describen. Caso a caso:
 - ACC: valores bastante estables con subida al final para porcentajes altos.
 - AVU: comportamiento difícilmente explicable.
 - AGC: ligera tendencia al alta con el aumento del porcentaje de aceite en mezcla, pero con un comportamiento muy, muy estable.
 - AGR: estabilidad, con picos para el porcentaje alto.
 - ASC: mínimas emisiones para el 20% en mezcla.
 - ASR: ligera tendencia al alza con el aumento de X.
- La tendencia que tienen las emisiones de NO_x con el aumento de la posición de admisión de aire es inversamente proporcional a ésta: a mayor posición, menores emisiones. Cabe destacar que el AVU contradice esta ley para dos porcentajes de aceite en mezcla (20 y 30%).
- Las gráficas a posición de aire constante demuestran que para la gran mayoría de casos, cuando X=40% se tiene el mayor nivel de emisiones, consiguiendo los máximos en estos puntos. Si bien esto es cierto, también se puede decir que el patrón no es claro, con picos intermedios en algunos casos y un ascenso/descenso en los valores poco pronunciado.
- Claramente se ha ido viendo durante el análisis que AVU, AC y ASR son los tres aceites que peores niveles de emisiones ofrecen. A continuación, AGR, y por último, los aceites con menores niveles de emisiones son AGC y ASC, los aceites crudos.
- En cuanto al grado de afectación que sufren las emisiones de NO_x con el refino, puede decirse que éste afecta para mal. Sobre todo en aceite de soja (en menor medida en girasol) se tiene un aumento considerable del nivel de emisiones.
- Viendo los valores críticos de confiabilidad que nos da el análisis ANOVA, puede concluirse que, comparando este análisis con los de emisiones de CO o con los de rendimiento, no se tiene una influencia tan claramente distinguible de una variable como en aquellos análisis. La razón para que esto ocurra puede venir dada por el hecho de que entre los grados de confiabilidad críticos que ofrecen las tres variables (las interacciones no son tampoco tan

representativas) no exista uno dominante. De esta forma, pese a existir tendencia, la descripción resulta más complicada.

8.5.2. Análisis a de las emisiones de NO_xa P=12 BAR

Se estudian a continuación las emisiones de NO_x (en ppm) medidas con el medidor Testo modelo 342-3. Se realizan los análisis a presión constante de 12 bar y a posición de admisión de aire constante.

Tabla 8.21 Matriz de emisiones de NO_x

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Posición de admisión (A)	3	30	34	38	40	ACC	Tipo de aceite
	3,5	30	33	37	38		
	4	26	30	34	35		
	3	35	36	39	36	AVU	
	3,5	33	33	37	38		
	4	21	30	32	37		
	3	25	25	25	27	AGC	
	3,5	22	23	24	25		
	4	19	21	21	22		
	3	27	30	37	37	AGR	
	3,5	25	27	35	36		
	4	20	24	31	33		
3	25	27	28	31	ASC		
3,5	23	25	28	29			
4	20	22	25	26			
3	30	32	35	39	ASR		
3,5	28	31	34	35			
4	27	28	30	30			
		Presión de inyección: 12 bar					

Con estos datos, lo primero que se plantea es un análisis de varianza (ANOVA), mediante el cual se determinará si las tres variables influyen (admisión del aire, tipo de aceite y porcentaje de aceite en peso) o no y de qué manera.

Tabla 8.22 Análisis ANOVA emisiones de NO_x

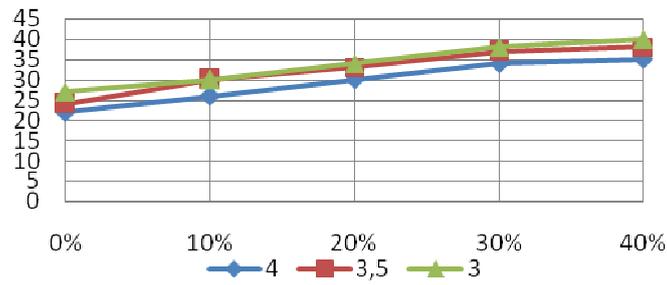
FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
A	2	335,02778	167,51389	66,43959	3,31583	SI	9,52435E-12
T	5	1141,73611	228,34722	90,56739	2,53355	SI	3,57465E-17
X	3	557,93056	185,97685	73,76239	2,92228	SI	6,02016E-14
AxT	10	11,47222	1,14722	0,45501	2,16458	NO	0,90550943
AxX	6	9,86111	1,64352	0,65185	2,42052	NO	0,68833347
TxX	15	110,31944	7,35463	2,91700	2,01480	SI	0,00610283
Error	30	75,638889	2,521296				
Total	71	2241,986111					

Vistos los resultados de la tabla ANOVA generada, se tiene que tanto la interacción AxT como la interacción AxX son rechazadas por el análisis ANOVA para un nivel de significación del 5%. Los valores críticos de significación de ambas interacciones son valores bastante altos, de modo que la conclusión es que no afectan. En orden ascendente de importancia se tiene que la interacción TxX está en un nivel de confianza del 0,6 %, de modo que pasa el análisis con un margen amplio, siendo la variable menos influyente dentro de las que lo son.

El resto de variables significativas, que son las variables simples A, X y T, tienen valores bastante alejados del valor de la confiabilidad del análisis: 10^{-10} (%) la variable A, 10^{-12} (%) la variable X y 10^{-15} (%) la variable T.

La conclusión del análisis ANOVA tendrá que ser, primero, que las tres variables simples son variables influyentes con un alto nivel de confiabilidad. A priori la más importante deberá ser la variable T, a continuación la X y después la A, pero sus niveles de confiabilidad son tan altos que se hará difícil distinguir cuál es la variable que más influye en según qué caso. Dentro de las interacciones, la más influyente será la TxX, mientras que el resto no aportarán significancia al análisis.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de colza crudo (T=ACC)

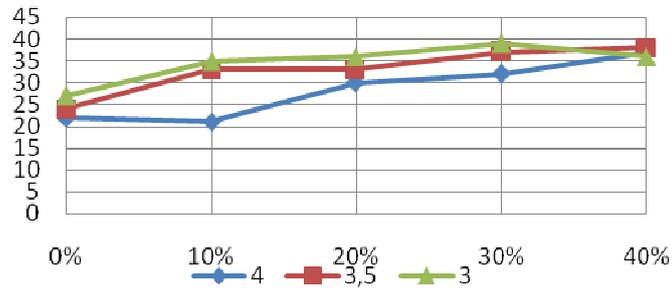


ACC, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	27	30	34	38	40
A=3,5	24	30	33	37	38
A=4	22	26	30	34	35

Figura 8.154: Emisiones de NOx para para P=12 bar y T=ACC

La tendencia es la siguiente: cuanto mayor es la posición de aire y menor el porcentaje de aceite en mezcla, menores son las emisiones. Tendencia igual en todas las posiciones.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite vegetal usado (T=AVU)

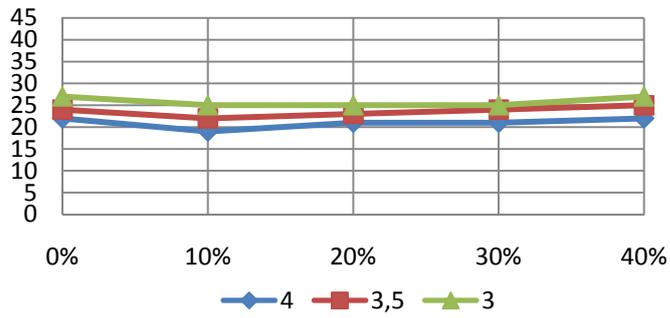


AVU, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	27	35	36	39	36
A=3,5	24	33	33	37	38
A=4	22	21	30	32	37

Figura 8.155: Emisiones de NOx para para P=12 bar y T=AVU

Misma tendencia: a mayor porcentaje de aceite y mayor posición de aire, menores emisiones, salvo para X=40%, porcentaje en el cual no se sigue la tendencia. Destaca el mínimo tan acusado que hay para X=10% y A=4.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de girasol crudo (T=AGC)

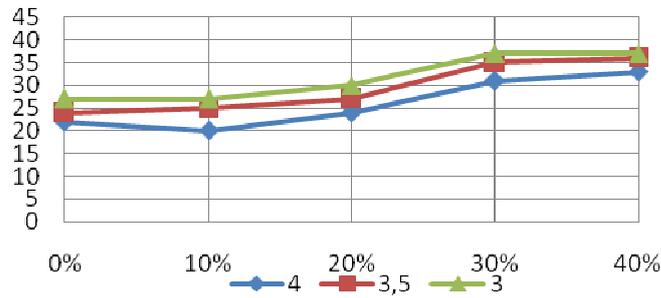


AGC, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	27	25	25	25	27
A=3,5	24	22	23	24	25
A=4	22	19	21	21	22

Figura 8.156: Emisiones de NOx para P=12 bar y T=AGC

Este aceite sigue la tendencia de los anteriores pero con un nivel de emisiones mucho más constante que en aquellos.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de girasol refinado (T=AGR)

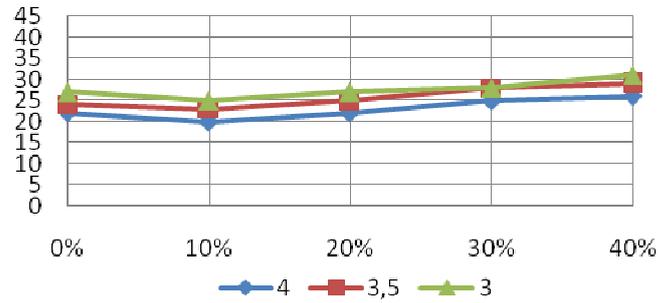


AGR, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	27	27	30	37	37
A=3,5	24	25	27	35	36
A=4	22	20	24	31	33

Figura 8.157: Emisiones de NOx para P=12 bar y T=AGR

Misma tendencia que las anteriores, tendencia más acusada que en el aceite crudo anterior, y con mayores emisiones: el refino provoca ese efecto, sobre todo con altos niveles de participación en la mezcla.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de soja crudo (T=ASC)

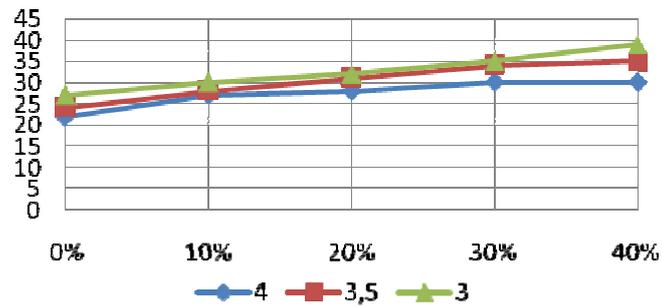


ASC, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	27	25	27	28	31
A=3,5	24	23	25	28	29
A=4	22	20	22	25	26

Figura 8.158: Emisiones de NOx para P=12 bar y T=ASC

De nuevo la misma tendencia: mayores emisiones a mayor posición de admisión de aire y a mayor porcentaje en mezcla.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de soja refinado (T=ASR)

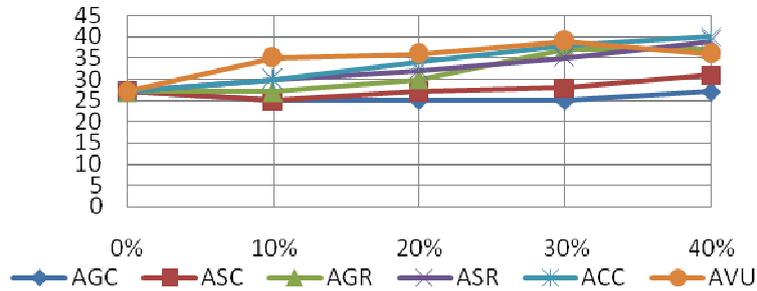


ASR, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3	27	30	32	35	39
A=3,5	24	28	31	34	35
A=4	22	27	28	30	30

Figura 8.159: Emisiones de NOx para P=12 bar y T=ASR

Como ocurría en el aceite de girasol, aún permaneciendo casi inalterable la tendencia, el efecto del refino ha sido aumentar los niveles de emisiones entre 5 y 7 ppm del aceite sin refinar al refinado.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para la posición de aire A=3

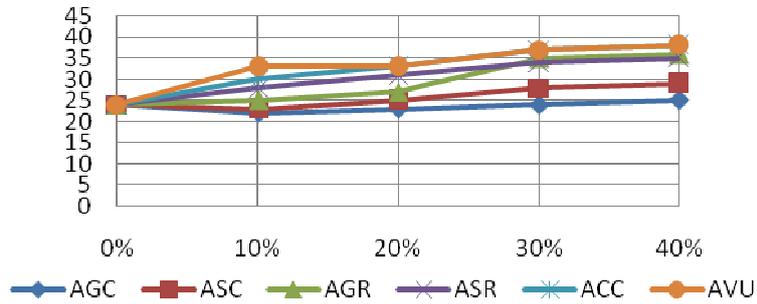


A=3, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	27	30	34	38	40
AVU	27	35	36	39	36
AGC	27	25	25	25	27
AGR	27	27	30	37	37
ASC	27	25	27	28	31
ASR	27	30	32	35	39

Figura 8.160: Emisiones de NOx para P=12 bar y A=3

Ambos aceites crudos, girasol y soja, ofrecen los mejores niveles de emisiones del estudio (algo mejor el de girasol). Salvo dos picos ofrecidos por AVU y AGR en X=30%, el resto de aceites ofrecen todos la tendencia al alza cuando aumenta el porcentaje de aceite en mezcla. La tendencia más clara se aprecia en el ACC, con un aumento casi lineal de las emisiones. El AGR es el tercer mejor comportamiento, mientras que los otros tres (AVU, AC y ASR) ofrecen los peores datos, siendo bastante similares entre ellos.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para la posición de aire A=3,5

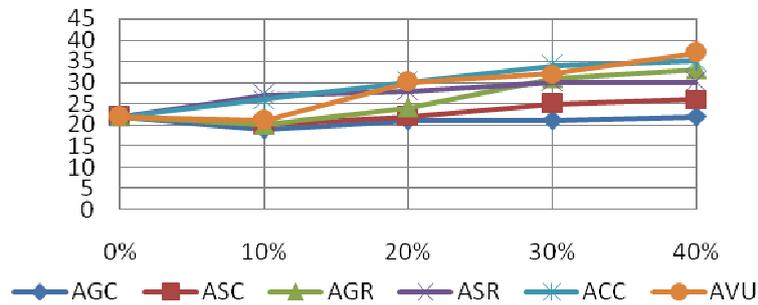


A=3,5, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	24	30	33	37	38
AVU	24	33	33	37	38
AGC	24	22	23	24	25
AGR	24	25	27	35	36
ASC	24	23	25	28	29
ASR	24	28	31	34	35

Figura 8.161: Emisiones de NOx para P=12 bar y A=3,5

El AGC ofrece los menores niveles de emisiones para todos los porcentajes de aceite en mezcla. A continuación el ASC y el AGR. Estos tres aceites, tal y como se vio en el anterior estudio, son los que para esta presión de inyección ofrecen las menores emisiones (falta por validar esta teoría con el último ensayo para A=4). EL AGR, sin embargo, da buenos valores para porcentajes pequeños de participación en la mezcla, pero para valores altos da valores tan malos como los que más.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para la posición de aire A=4

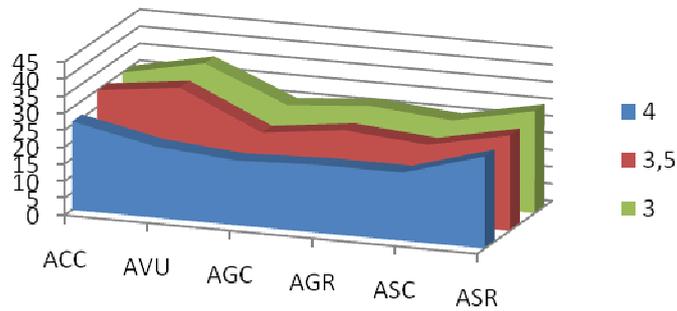


A=4, P=12bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	22	26	30	34	35
AVU	22	21	30	32	37
AGC	22	19	21	21	22
AGR	22	20	24	31	33
ASC	22	20	22	25	26
ASR	22	27	28	30	30

Figura 8.162: Emisiones de NOx para P=12 bar y A=4

El nivel de las emisiones cae para todos los aceites del estudio cuando aumenta la posición de admisión de aire. Como se adelantaba en la gráfica anterior, la tendencia es que los aceites de girasol y el de soja crudo ofrecen los menores niveles de emisiones. El AVU también ofrece un buen resultado para X=10%, pero se trata de un error aislado o un error de medida casi con total seguridad, ya que después da los mayores niveles de emisiones de toda la tabla. Es destacable también que el ASR tiene menos emisiones para X altas que el AGR, sin embargo para X bajas es mejor este último.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=10%



X=10%, P=12bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	30	35	25	27	25	30
A=3,5	30	33	22	25	23	28
A=4	26	21	19	20	20	27

Figura 8.163: Emisiones de NOx para P=12 bar y X=10%

La primera gráfica muestra que para todas las A´s tanto AGC, como AGR y ASC tienen menores niveles de emisiones, además de que la posición de admisión del aire resulta determinante en los resultados de emisiones. Todos los aceites obtienen sus mínimos para A=4, y conociendo de las gráficas anteriores que los menores niveles de emisiones se dan para X=10%, entonces estos resultados son los mejores del estudio P=12 bar.

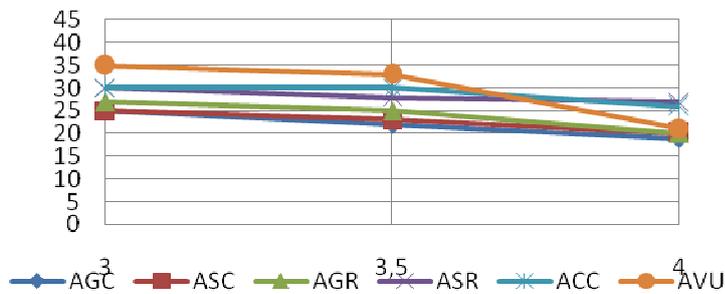
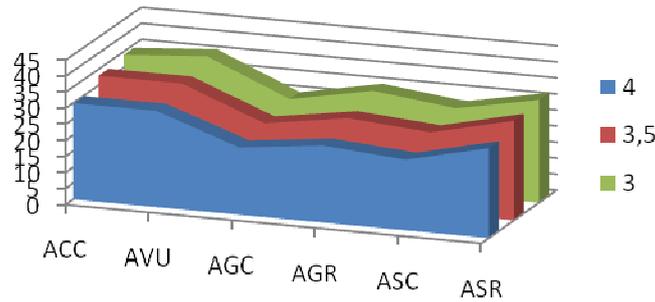


Figura 8.164: Emisiones de NOx para P=12 bar y X=10%

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=20%



X=20%, P=12bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	34	36	25	30	27	32
A=3,5	33	33	23	27	25	31
A=4	30	30	21	24	22	28

Figura 8.165: Emisiones de NOx para P=12 bar y X=20%

La primera gráfica muestra una tendencia más marcada en el comportamiento de las emisiones de NOx. El mejor comportamiento lo vuelve a dar el AGC, teniendo todas las gráficas un valle en dicho aceite. Después: ASC, AGR, ASR, ACC y AVU. Con respecto a X=10%, se aprecia un aumento en las emisiones de entre 2 y 4 ppm. La segunda gráfica vuelve a mostrar la tendencia que muestran todos los aceites con respecto a la posición de admisión de aire.

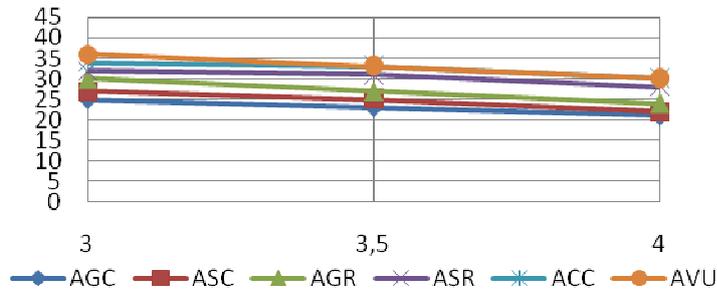
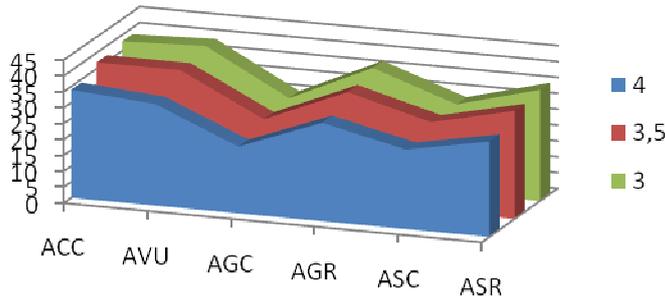


Figura 8.166: Emisiones de NOx para P=12 bar y X=20%

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=30%



X=30%, P=12bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	38	39	25	37	28	35
A=3,5	37	37	24	35	28	34
A=4	34	32	21	31	25	30

Figura 8.167: Emisiones de NOx para para P=12 bar y X=30%

Con respecto a X=20%, los picos y valles de la primera gráfica vuelven a remarcar, siendo más alta la diferencia entre los máximos y mínimos. Destaca que las emisiones de AGC apenas han variado: el resto lo han hecho en una cantidad entre las 3 y las 5 ppm. En cuanto a la dependencia con A, parece más marcada entre la posición intermedia A=3,5 y A=4 que entre A=3 y A=3,5. Este hecho es observable en la segunda gráfica.

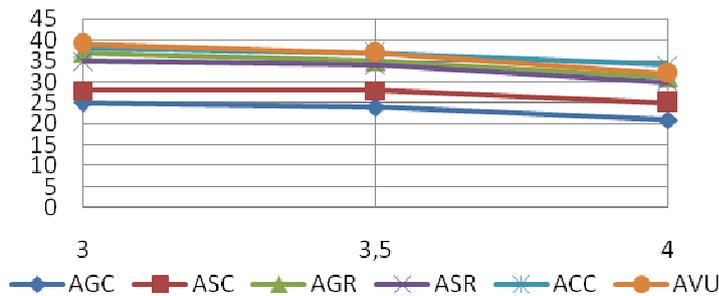
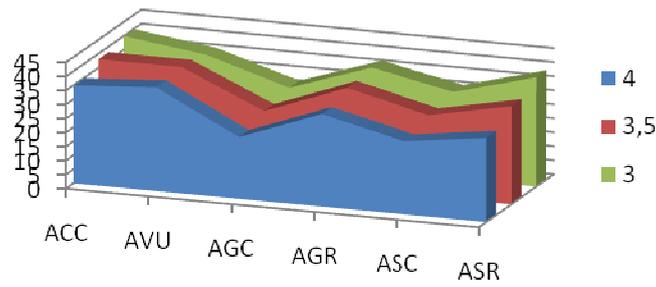


Figura 8.168: Emisiones de NOx para P=12 bar y X=30%

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=40%



X=40%, P=12bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3	40	36	27	37	31	39
A=3,5	38	38	25	36	29	35
A=4	35	37	22	33	26	30

Figura 8.169: Emisiones de NOx para P=12 bar y X=40%

La diferencia con respecto al X anterior no parece a priori tan abultada como en los estudios anteriores: entre las 2 y 3 ppm. De nuevo las menores emisiones las da el AGC, tendencia que se ve clarísima en la gráfica. Se puede ver una tendencia que se empezó a ver en el estudio de X=30%: el AGR da bastantes más emisiones que el ASC para estos porcentajes. Queda por tanto demostrada la influencia del refinado del aceite en las emisiones de NO_x. AC, AVU, AGR y ASR muestran niveles de emisiones bastante mayores a los otros dos tipos de aceite.

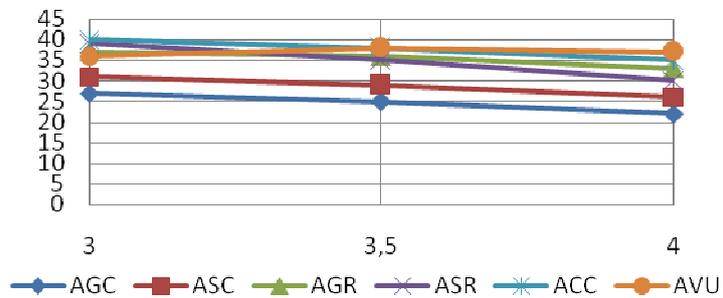


Figura 8.170: Emisiones de NOx para para P=12 bar y X=40%

8.5.2.1. Conclusiones

El análisis tanto del ANOVA como de las representaciones gráficas da como conclusiones las siguientes:

- Como predijo el análisis ANOVA, el tipo de aceite (variable T) es la variable más determinante del estudio, dando unos resultados muy diferenciados unos aceites y otros.
- La variable X, porcentaje de aceite en mezcla, es la segunda variable en orden de importancia según el ANOVA. Esto ha quedado demostrado en las gráficas realizadas, siendo la tendencia sin ninguna duda la de aumento de las emisiones de NO_x al aumentar el contenido de aceite en la mezcla.
- Por último, la variable A, posición de admisión del aire, influye también de manera bastante evidente, ya que los mínimos conseguidos son todos con la posición A=4, la mayor.
- El mejor aceite del estudio en cuanto a emisiones de NO_x es sin duda el AGC, y después el ASC, ambos aceites crudos, lo cual indica que el tratamiento del refino empeora el comportamiento de las emisiones de NO_x.
- Puede concluirse, por tanto, que las mejores condiciones observadas para evitar las emisiones de NO_x son bajos porcentajes de aceite en mezcla, posición de admisión de aire alta y aceite crudo.
- El aceite de colza (ACC) y el aceite vegetal usado (AVU) son, gráfica a gráfica y tabla a tabla, los peores indicados para tener bajos niveles de emisiones.
- Como en el análisis a P=10 bar, y comparando este análisis con los realizados para las emisiones de CO o el rendimiento, puede decirse que no existe una variable que domine a las demás en cuanto a importancia se refiere. En este estudio en concreto, son las tres variables controladas las que marcan la influencia de una manera difícil de describir, ya que todas tienen un grado de significancia alto.

8.5.3. Análisis de las emisiones de NO_x a P=14 BAR

Se estudian a continuación las emisiones de NO_x (en ppm) medidas con el medidor Testo modelo 342-3. Se realizan los análisis a presión constante de 14 bar y a posición de admisión de aire constante.

Tabla 8.23 Matriz de resultados de emisiones de NO_x

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Posición de admisión (A)	3,5	33	36	39	41	ACC	Tipo de aceite
	4	31	34	40	40		
	4,5	28	31	36	37		
	3,5	35	37	40	41	AVU	
	4	35	35	38	40		
	4,5	32	32	35	39		
	3,5	23	26	27	28	AGC	
	4	22	24	25	27		
	4,5	20	22	24	25		
	3,5	28	32	38	40	AGR	
	4	25	28	36	39		
	4,5	23	26	33	37		
	3,5	26	27	31	32	ASC	
	4	24	25	30	32		
	4,5	21	23	28	30		
3,5	32	35	37	40	ASR		
4	31	34	36	38			
4,5	28	33	34	34			
		Presión de inyección: 14 bar					

Con estos datos, lo primero que se plantea es un análisis de varianza (ANOVA), mediante el cual se determinará si las tres variables influyen (admisión del aire, tipo de aceite y porcentaje de aceite en peso) o no y de qué manera.

Tabla 8.24 Análisis ANOVA

FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
A	2	183,861111	91,930556	170,30017	3,31583	SI	4,1998E-17
T	5	1401,111111	280,222222	519,10806	2,53355	SI	3,5812E-28
X	3	694,111111	231,370370	428,61063	2,92228	SI	1,0357E-24
AxT	10	5,472222	0,547222	1,01372	2,16458	NO	0,45508473
AxX	6	3,138889	0,523148	0,96913	2,42052	NO	0,46273734
TxX	15	106,555556	7,103704	13,15952	2,01480	SI	2,6395E-09
Error	30	16,194444	0,539815				
Total	71	2410,444444					

Vistos los resultados de la tabla ANOVA generada, se tiene que tanto la interacción AxT como la interacción AxX son rechazadas por el análisis ANOVA para un nivel de significación del 5%. Los valores críticos de significación de ambas interacciones son valores altos, de modo que la conclusión es que no afectan.

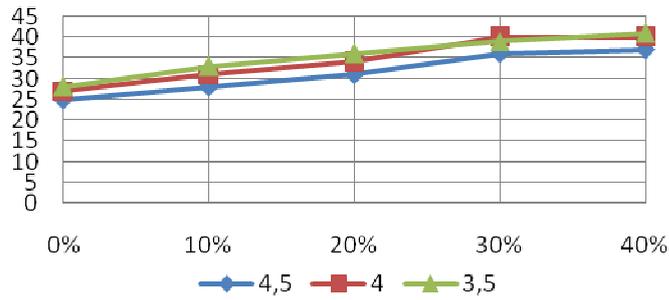
En este caso se tiene que la interacción TxX sí influye, y con un grado de confiabilidad crítico del orden de 10^{-7} %, el cual está bastante bien teniendo en cuenta que se trata de una interacción. Sin embargo, como se va a comentar ahora, los valores de confiabilidad críticos mostrados por el resto de variables (las simples) hacen que la “influencia absoluta” que a priori parecía importante de la interacción, en términos relativos quedará en clara muy por debajo.

La variable más influyente del estudio es el tipo de aceite, T, con una grado de confiabilidad crítico del orden de 10^{-26} %. A continuación en orden de importancia estaría el porcentaje de aceite en mezcla (X), con un grado de confiabilidad crítico del orden de 10^{-22} %. Por último, se tiene que el factor posición de admisión del aire (A) tiene un grado de confiabilidad crítico del orden de 10^{-15} %.

La conclusión del análisis ANOVA realizado a los datos del análisis a P=14 bar es que la variable tipo de aceite es, si cabe, más importante que en cualquier análisis que se haya visto hasta ahora. El grado de confiabilidad crítico obtenido es ínfimo. Destaca la influencia de la variable X también, y también la de la variable A: a priori se tendrán caracteres muy marcados dentro de las gráficas, pero al ser las tres variables principales tan significativas, resultará difícil una descripción exacta de estos.

Se representan a continuación los valores obtenidos para la variable emisiones de NOx en función de las variables A, X y T.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de colza crudo (T=ACC)

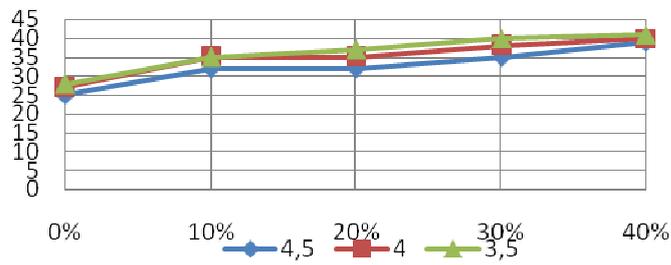


ACC, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	28	33	36	39	41
A=4	27	31	34	40	40
A=4,5	25	28	31	36	37

Figura 8.171: Emisiones de NOx para 14 bar y ACC

Se observa claramente que el aumento de porcentaje de aceite en la mezcla provoca un aumento de las emisiones. Además, se ve la influencia de la posición del aire, de modo que para A=4,5 las emisiones son menores que para el resto de posiciones.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite vegetal usado (T=AVU)

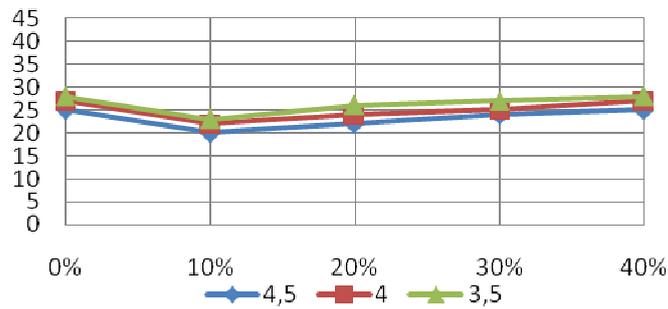


AVU, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	28	35	37	40	41
A=4	27	35	35	38	40
A=4,5	25	32	32	35	39

Figura 8.172: Emisiones de NOx para 14 bar y AVU

Mayores emisiones cuanto mayor es el porcentaje de aceite en la mezcla y menor cuanto mayor es la posición de admisión de aire. Tendencia uniforme.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de girasol crudo (T=AGC)

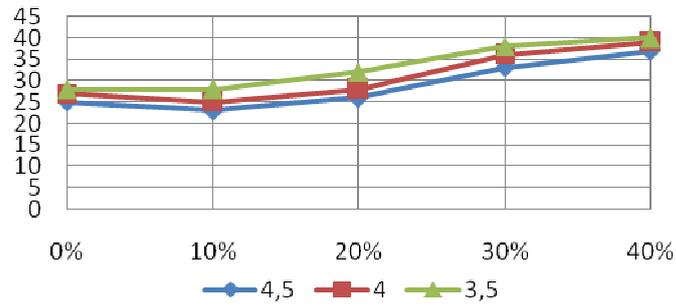


AGC, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	28	23	26	27	28
A=4	27	22	24	25	27
A=4,5	25	20	22	24	25

Figura 8.173: Emisiones de NOx para 14 bar y AGC

Misma tendencia que las dos anteriores, pero con valores menores. En los dos análisis anteriores, el comportamiento del AGC con las emisiones de NOx era peor que éste.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de girasol refinado (T=AGR)

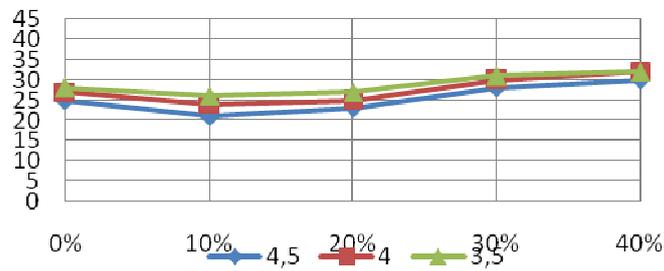


AGR, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	28	28	32	38	40
A=4	27	25	28	36	39
A=4,5	25	23	26	33	37

Figura 8.174: Emisiones de NOx para 14 bar y AGR

Valores más altos en las emisiones de NOx en el AGR que en el AGC. La tendencia al alza crece más de lo esperado para X>20%. Comportamiento esperado en cuanto a la dependencia de A.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de soja crudo (T=ASC)

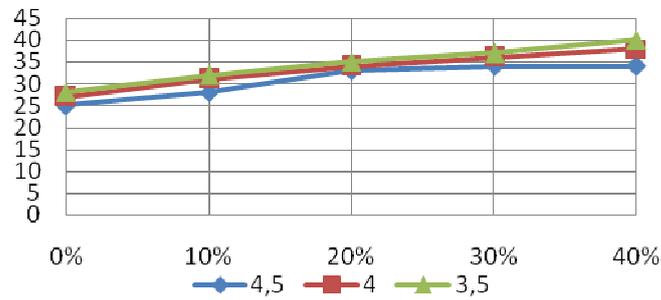


ASC, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	28	26	27	31	32
A=4	27	24	25	30	32
A=4,5	25	21	23	28	30

Figura 8.175: Emisiones de NOx para 14 bar y ASC

El ASC, como se vio en los análisis para otras presiones, registra buenos valores de emisiones, pero siempre un escalón por debajo del AGC. El comportamiento es el mismo que se describió para los aceites anteriores.

Representaciones gráficas de las emisiones de NO_x para el aceite de soja refinado (T=ASR)

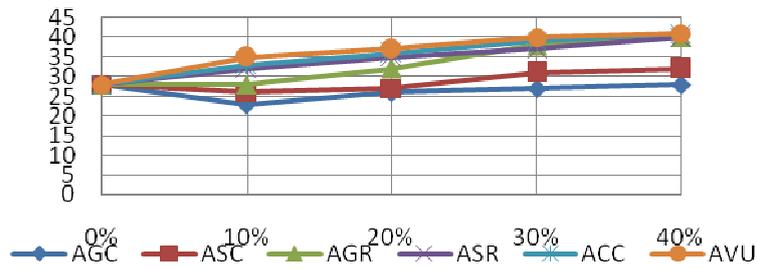


ASR, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
A=3,5	28	32	35	37	40
A=4	27	31	34	36	38
A=4,5	25	28	33	34	34

Figura 8.176: Emisiones de NO_x para 14 bar y ASR

La tendencia es la explicada en los gráficos anteriores. Los valores que da son bastante más altos que los del ASC, de modo que queda comprobado el comportamiento anteriormente mencionado de que el refino provoca un aumento considerable de las emisiones de NO_x.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para la admisión de aire A=3,5

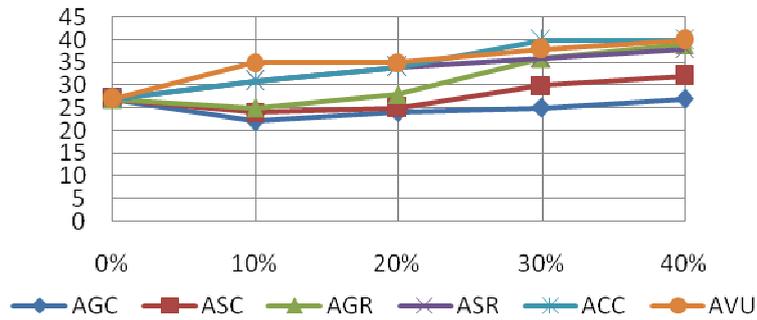


A=3,5, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	28	33	36	39	41
AVU	28	35	37	40	41
AGC	28	23	26	27	28
AGR	28	28	32	38	40
ASC	28	26	27	31	32
ASR	28	32	35	37	40

Figura 8.178: Emisiones de NOx para 14 bar y A=3,5

El análisis para una posición de admisión fija muestra un comportamiento al alza de las emisiones con respecto a la variable X. En el gráfico se observa que AVU, ACC y ASR están un nivel por encima del resto. Además, puede verse como para X>20%, el AGR también muestra unos niveles similares a los anteriores. Los dos aceites crudos dan los mejores resultados, siendo mejores los del aceite de girasol que los del aceite de soja.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para la admisión de aire A=4

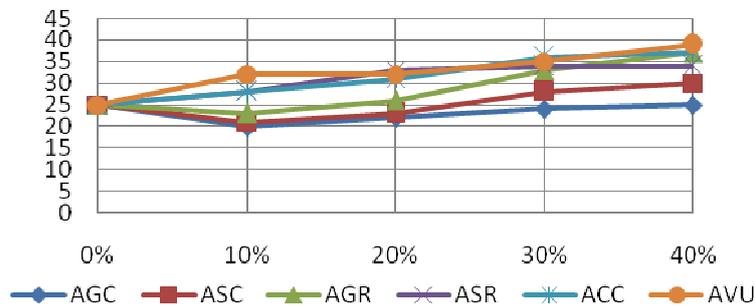


A=4, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	27	31	34	40	40
AVU	27	35	35	38	40
AGC	27	22	24	25	27
AGR	27	25	28	36	39
ASC	27	24	25	30	32
ASR	27	31	34	36	38

Figura 8.179: Emisiones de NOx para 14 bar y A=4

El comportamiento es similar al de la posición A=3,5, aunque con matices. En el AVU, destaca las elevadas emisiones que registra para porcentajes bajos de aceite en mezcla, mayores incluso que los de los aceites crudos para X=40%. Tanto ACC como AGR sufren una subida “inesperada” a partir de X=20%, cosa que no le ocurre al ASR, cuyo comportamiento es casi perfectamente lineal. AGC, ASC y AGR registran emisiones menores con el mínimo porcentaje de la mezcla que con un porcentaje nulo, lo cual queda plasmado en el pequeño valle que muestran los 3 aceites para ese valor de X. El menor nivel de emisiones, de nuevo, para AGC.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para la admisión de aire A=4,5

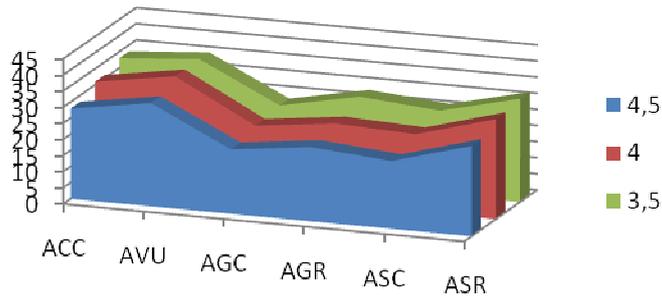


A=4,5, P=14bar	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
ACC	25	28	31	36	37
AVU	25	32	32	35	39
AGC	25	20	22	24	25
AGR	25	23	26	33	37
ASC	25	21	23	28	30
ASR	25	28	33	34	34

Figura 8.180: Emisiones de NOx para 14 bar y A=4,5

Comparados con los datos de las dos últimas gráficas, estos son claramente menores, lo cual confirma el hecho de que la posición de aire más recomendable para reducir emisiones es la mayor posible. El gráfico muestra de nuevo como los valores para X=10% son menores que los de X=0% para AGC, AGR y ASC, incluso los del 20% en AGC y ASC, no llegando a superarse en el AGC. El comportamiento del ASC no es tan lineal, creciendo más las emisiones para aumentos de X. El AVU y el ACC, en ese orden, son los aceites que peores niveles de emisiones ofrecen. Destaca también que por una vez, las emisiones del aceite de soja son menores que las del aceite de girasol en el apartado de refinados.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=10%



X=10%, P=14bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	33	35	23	28	26	32
A=4	31	35	22	25	24	31
A=4,5	28	32	20	23	21	28

Figura 8.181: Emisiones de NOx para 14 bar y X=10%

La primera gráfica muestra, por un lado, que AGC y ASC son las mejores para este porcentaje. Destaca que el AVU tiene el mayor nivel de emisiones. De nuevo se ve que la posición de admisión de aire más favorable es la mayor (A=4,5). En la segunda gráfica puede verse, además, la diferencia existente entre AVU, ACC, ASR y el resto.

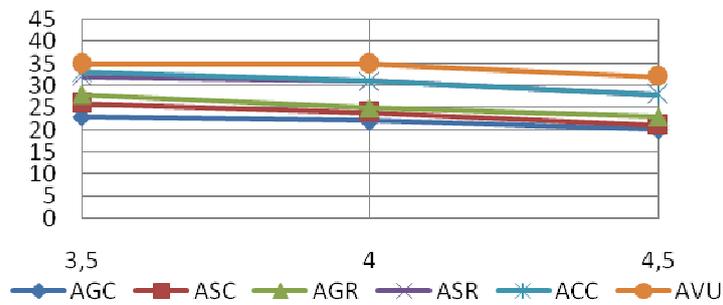
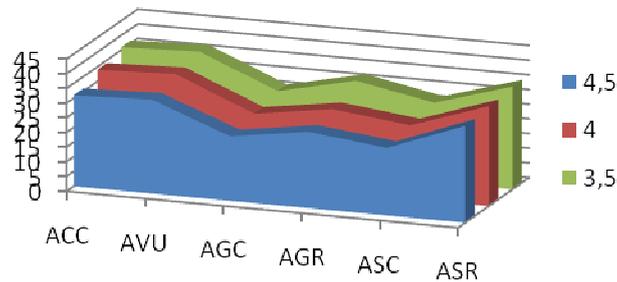


Figura 8.182: Emisiones de NOx para 14 bar y X=10%

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=20%



X=20%, P=14bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	36	37	26	32	27	35
A=4	34	35	24	28	25	34
A=4,5	31	32	22	26	23	33

Figura 8.183: Emisiones de NOx para 14 bar y X=20%

Las diferencias para este porcentaje parecen estar más suavizadas que en el anterior. Para este porcentaje de mezcla los aceites crudos tienen un comportamiento casi igual (siempre un poco mejor el AGC. ACC, AVU y ASR muestran un comportamiento bastante peor, y entre medias se tiene el AGR. En la segunda gráfica se aprecia cómo tanto en ACC como en AVU el aumento de la posición de admisión de aire las beneficia más.

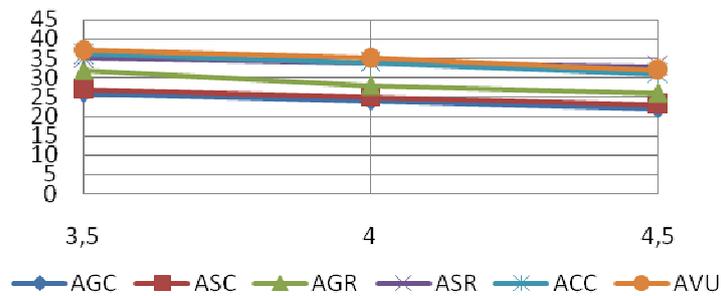
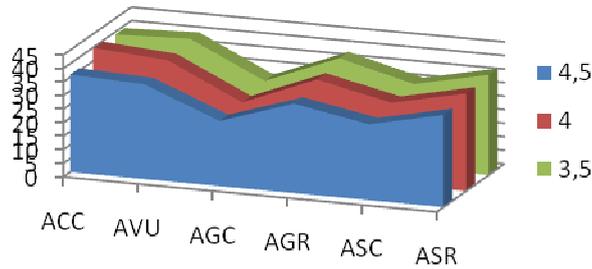


Figura 8.184: Emisiones de NOx para 14 bar y X=20%

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=30%



X=30%, P=14bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	39	40	27	38	31	37
A=4	40	38	25	36	30	36
A=4,5	36	35	24	33	28	34

Figura 8.185: Emisiones de NOx para 14 bar y X=30%

El AGC provoca la aparición de un pronunciado valle en la primera gráfica. ACC, AVU, AGR y ASR vuelven a dar niveles similares de emisiones, mucho más altos que los obtenidos con los aceites crudos. La segunda gráfica muestra esto claramente, amén de la influencia de la variable A. El único “punto extraño” es el registrado para AC en A=4, el cual da mayores emisiones que A=3,5.

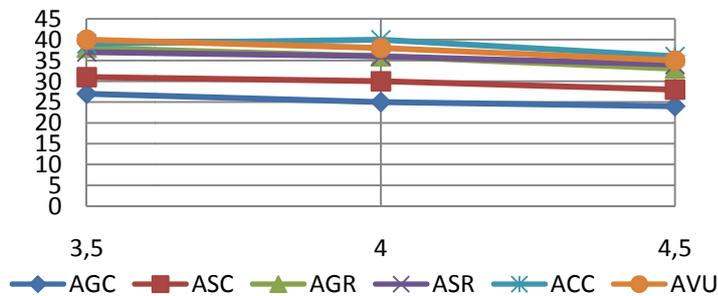
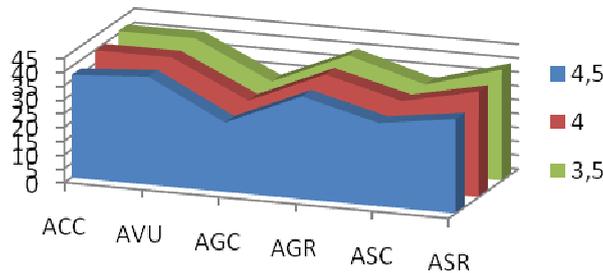


Figura 8.186: Emisiones de NOx para 14 bar y X=30%

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=40%



X=40%, P=14bar	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
A=3,5	41	41	28	40	32	40
A=4	40	40	27	39	32	38
A=4,5	37	39	25	37	30	34

Figura 8.187: Emisiones de NOx para 14 bar y X=40%

AVU, ACC y AGR dan valores muy similares para el porcentaje máximo de estudio en todas las posiciones de admisión de aire. ASR da valores menores, sobre todo para A=4,5, mientras que ASC da valores todavía menores. De nuevo vuelve a ser el AGC el aceite que menor nivel de emisiones ofrece, marcando el mínimo para la posición de mayor admisión de aire. La segunda gráfica muestra esto más claramente.

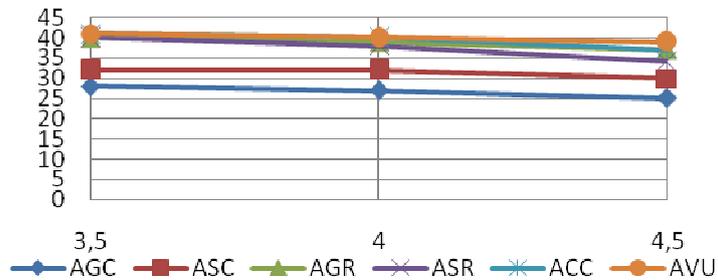


Figura 8.188: Emisiones de NOx para 14 bar y X=40%

8.5.3.1. Conclusiones

El análisis tanto del ANOVA como de las representaciones gráficas da como conclusiones las siguientes:

- Como predijo el análisis ANOVA, el tipo de aceite (variable T) es la variable más determinante del estudio y con diferencia.
- La variable X, porcentaje de aceite en mezcla, es la segunda variable en orden de importancia según el ANOVA. La influencia que tiene el aumento del porcentaje de aceite en mezcla es bastante clara, sufriendo esto todos los combustibles casi por igual.
- Los mínimos vuelven a conseguirse para la mayor posición de admisión de aire posible, A=4,5 en este caso. Pese a no ser la variable más influyente en teoría, la inmensa mayoría de las series de datos vistas en este análisis cumplen esto.
- El mejor aceite del estudio en cuanto a emisiones de NO_x es sin duda el AGC, y después el ASC, ambos aceites crudos, lo cual indica que el tratamiento del refino empeora el comportamiento de las emisiones de NO_x.
- Puede concluirse, por tanto, que las mejores condiciones observadas para evitar las emisiones de NO_x son bajos porcentajes de aceite en mezcla, posición de admisión de aire alta y aceite crudo.
- El aceite de colza (ACC) y el aceite vegetal usado (AVU) son, gráfica a gráfica y tabla a tabla, los peores indicados para tener bajos niveles de emisiones.
- Debido al ínfimo grado de confiabilidad crítico obtenido en el ANOVA, y al igual que se dijo en el análisis anterior, no cabe establecer que una variable es la que “somete” a las demás en este estudio.

8.5.4. Análisis de las emisiones de NO_x para A=3,5

A continuación se exponen los datos registrados para este análisis:

Tabla 8.25 Matriz de resultados de emisiones de NO_x

		Porcentaje de aceite en la mezcla (X)					
		10%	20%	30%	40%		
Presión de inyección (P)	10	24	25	24	28	ACC	Tipo de aceite
	12	30	33	37	38		
	14	33	36	39	41		
	10	28	30	33	22	AVU	
	12	33	33	37	38		
	14	35	37	40	41		
	10	17	18	16	19	AGC	
	12	22	23	24	25		
	14	23	26	27	28		
	10	18	16	19	33	AGR	
	12	25	27	35	36		
	14	28	32	38	40		
	10	18	15	20	22	ASC	
	12	23	25	28	29		
	14	26	27	31	32		
	10	23	25	27	32	ASR	
	12		31	34	35		
	14		35	37	40		
		28					
		32					

Con los datos ya dispuestos, se plantea un análisis de varianza (ANOVA), mediante el cual se determinará si las tres variables influyen (presión de inyección, tipo de aceite y porcentaje de aceite en peso) o no y de qué manera.

Tabla 8.26 Análisis ANOVA

FACTOR	GdL	SS	MS	F	VC al 5%	Influye	G. C. Crítica
P	2	1395,2500	697,6250	152,36299	3,31583	SI	1,93409E-16
T	5	1262,1250	252,4250	55,13023	2,53355	SI	3,22156E-14
X	3	430,15278	143,3842	31,31547	2,92228	SI	2,25698E-09
PxT	10	39,75000	3,97500	0,86815	2,16458	NO	0,571401465
PxX	6	32,97222	5,49537	1,20020	2,42052	NO	0,333234368
TxX	15	169,26389	11,28426	2,46451	2,01480	SI	0,017273716
Error	30	137,36111	4,57870				
Total	71	3466,87500					

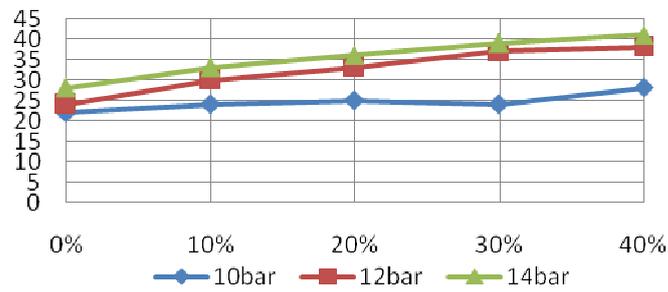
Los resultados generados en la tabla ANOVA muestran que las interacciones PxT y PxX son rechazadas en un estudio con un grado de confiabilidad al 5%. Además, la interacción TxX pasa el test pero no con un valor excesivamente bajo, 1,72%, de modo que la influencia que pueda llegar a tener será bastante menor a la que tengan las variables simples.

Como variables más significativas se tienen la presión de inyección (P) (orden de 10^{-14} %) y el tipo de aceite (T) (orden de 10^{-12} %). El grado de confiabilidad crítica que ofrece la variable X es del orden de 10^{-7} %.

A priori las variables que más van a influir en el análisis son P y T. X influirá pero estará en un escalón inferior, mientras que, a pesar de haber pasado el test una de ellas, ninguna interacción mostrará una influencia excesiva dentro del estudio.

Se representan a continuación los valores obtenidos para la variable emisión de NOx en función de las variables P, X y T.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de colza crudo (T=ACC)

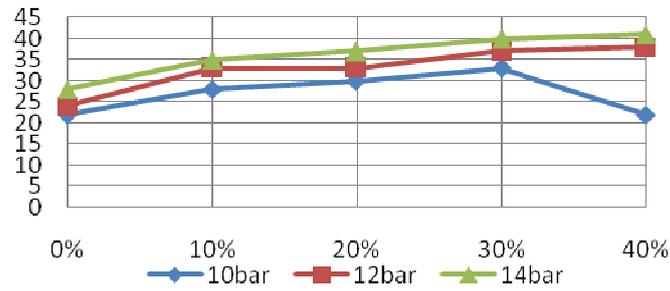


ACC, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10 bar	22	24	25	24	28
P=12 bar	24	30	33	37	38
P=14 bar	28	33	36	39	41

Figura 8.189: Emisiones de NOx para A=3,5 y T=ACC

Se observa que las emisiones crecen cuanto más aumenta la presión de inyección del combustible, y además puede verse que cuanto más porcentaje de aceite se tiene en la mezcla las emisiones son mayores.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite vegetal usado (T=AVU)

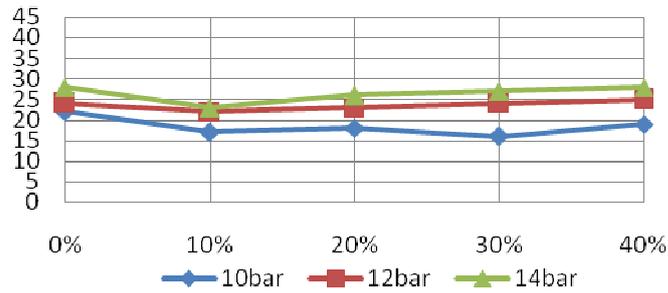


AVU, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10 bar	22	28	30	33	22
P=12 bar	24	33	33	37	38
P=14 bar	28	35	37	40	41

Figura 8.190: Emisiones de NOx para A=3,5 y T=AVU

De nuevo, y salvo el valor registrado para P=10 bar y X=40%, la tendencia es al alza con el porcentaje de aceite en mezcla y la presión. Los valores obtenidos son mayores en este caso que en el anterior para valores bajos de X, pero para valores altos están muy igualados.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de girasol crudo (T=AGC)

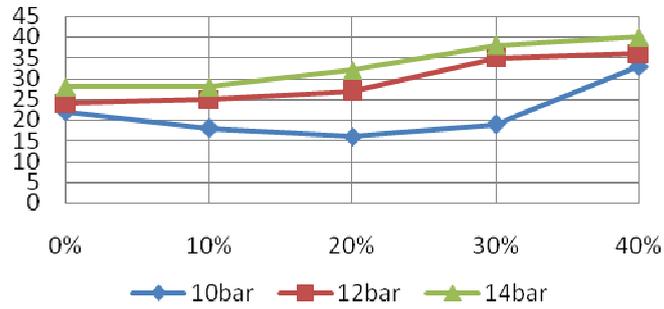


AGC, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10 bar	22	17	18	16	19
P=12 bar	24	22	23	24	25
P=14 bar	28	23	26	27	28

Figura 8.191: Emisiones de NOx para A=3,5 y T=AGC

Puede apreciarse un comportamiento bastante más “suave” de las gráficas, de manera que los valores no aumentan tanto con X (pero aumentan). Los mínimos se registran a la menor presión y menor porcentaje en mezcla. Los valores obtenidos con este aceite están bastante por debajo de los obtenidos con los dos anteriores.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de girasol refinado (T=AGR)

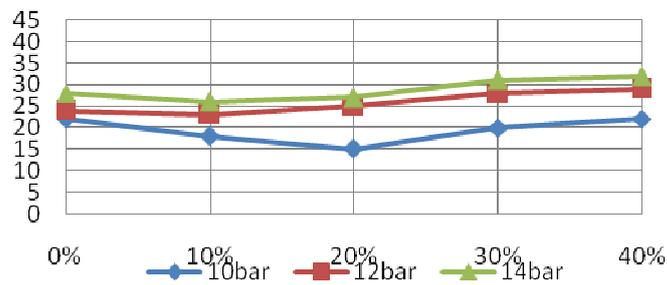


AGR, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10 bar	22	18	16	19	33
P=12 bar	24	25	27	35	36
P=14 bar	28	28	32	38	40

Figura 8.192: Emisiones de NOx para A=3,5 y T=AGR

Las emisiones obtenidas con el AGR son bastante más radicales que las obtenidas anteriormente. Para P=10 bar, el comportamiento es difícilmente descriptible, con un pico final que no se adapta a la serie pero si a la lógica del resto de la gráfica. En cuanto a los valores registrados para P=12 bar y P=14 bar, son más razonables, con mayores emisiones cuanto mayor porcentaje de aceite en mezcla hay y menores para presión menor.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de soja crudo (T=ASC)

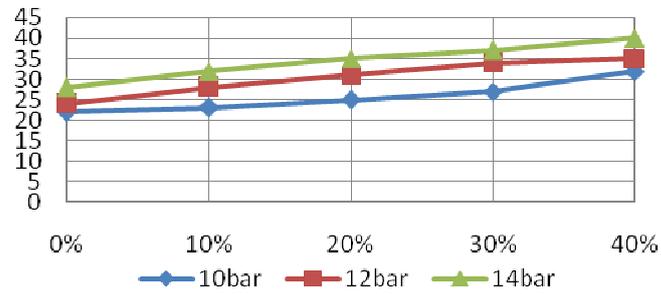


ASC, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10 bar	22	18	15	20	22
P=12 bar	24	23	25	28	29
P=14 bar	28	26	27	31	32

Figura 8.193: Emisiones de NOx para A=3,5 y T=ASC

Las emisiones obtenidas para P=10 bar muestran un mínimo para X=20 %, un suceso extraño ya que el mínimo ha venido dado siempre por el mínimo porcentaje de aceite en mezcla. Los valores para P=12 bar y P=14 bar siguen una tendencia casi exacta, con una emisión de 3 ppm superior en P=14 bar.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el aceite de soja refinado (T=ASR)

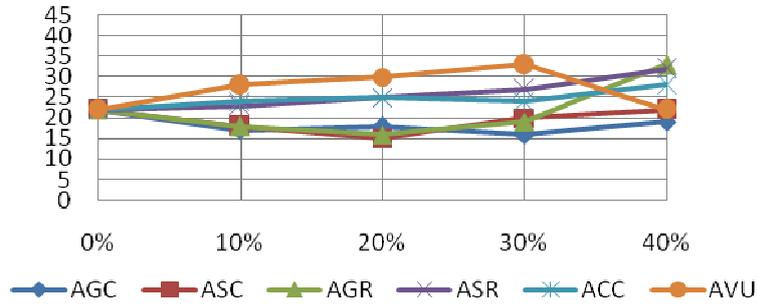


ASR, A=3,5	X=0%	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%
P=10 bar	22	23	25	27	32
P=12 bar	24	28	31	34	35
P=14 bar	28	32	35	37	40

Figura 8.194: Emisiones de NOx para A=3,5 y T=ASR

Al contrario que el crudo, el aceite de soja refinado sigue la tendencia “lógica” vista hasta ahora: el aumento de la presión provoca aumento de emisiones, y el aumento de aceite en la mezcla también.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para la presión de inyección P=10bar

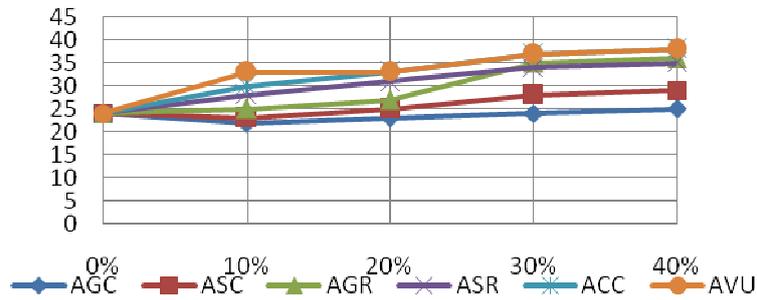


P=10 bar, X=0% A=3,5	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%	
ACC	22	24	25	24	28
AVU	22	28	30	33	22
AGC	22	17	18	16	19
AGR	22	18	16	19	33
ASC	22	18	15	20	22
ASR	22	23	25	27	32

Figura 8.195: Emisiones de NOx para A=3,5 y P=10 bar

El dato comentado anteriormente para ASC, X=20% y P=10 bar vuelve a ser el mínimo. Sin embargo, en esta tabla se ve claramente que a posición de admisión de aire constante, también el AGR tiene su mínimo en X=20%. Por lo general puede decirse que todos los aceites muestran subidas bastante comedidas en sus emisiones de X=10% a X=20% en mezcla. Por lo demás, queda claro que el AVU tiene las emisiones más altas para todos los porcentajes (salvo en X=40% en un probable fallo de medida), lo cual lo coloca como el peor en este estudio. Tanto el gráfico como los datos muestran claramente que los dos aceites crudos muestran los mejores niveles de emisiones. También muestra el AGR unos buenos niveles, salvo para X=40%, donde el comportamiento mostrado extraña por la subida tan pronunciada que representa.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para la presión de inyección P=12bar

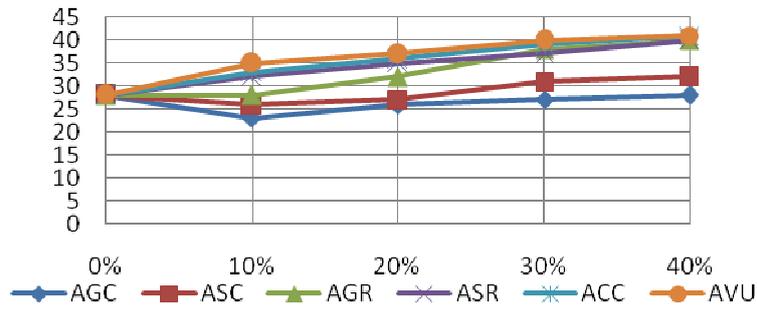


P=12 bar, X=0% A=3,5	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%	
ACC	24	30	33	37	38
AVU	24	33	33	37	38
AGC	24	22	23	24	25
AGR	24	25	27	35	36
ASC	24	23	25	28	29
ASR	24	28	31	34	35

Figura 8.196: Emisiones de NOx para A=3,5 y P=12 bar

Al contrario que en el ensayo a P=10 bar, en éste el comportamiento seguido es más familiar ya que es el que se ha ido describiendo en otros ensayos. La tendencia mostrada es que al aumentar el porcentaje de aceite en mezcla aumenta el nivel de emisiones. En cuanto a los distintos aceites, puede verse que AGC y ASC muestran un comportamiento parecido, mejor en el AGC para todos los niveles. El AGR tiene también un comportamiento bueno, pero a partir de X=20% sufre un aumento, y a partir de ahí se iguala con el ASR. Por su parte, tanto AC como AVU ofrecen las mayores emisiones del apartado.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para la presión de inyección P=14bar

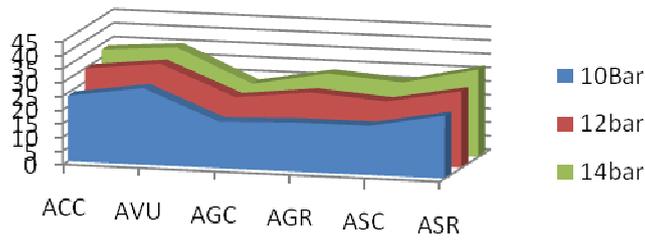


P=14 bar, X=0% A=3,5	X=10%	X=20%	X=30%	X=40%	
ACC	28	33	36	39	41
AVU	28	35	37	40	41
AGC	28	23	26	27	28
AGR	28	28	32	38	40
ASC	28	26	27	31	32
ASR	28	32	35	37	40

Figura 8.197: Emisiones de NOx para A=3,5 y P=14 bar

El último estudio a presión constante ofrece unos resultados en cuanto a valores de las emisiones superiores a los anteriores; sin embargo, la tendencia seguida se asemeja bastante al estudio a P=12 bar. Vuelve a tenerse que los mínimos los da el AGC, seguido por el ASC y el AGR: la conclusión que se extrae de aquí es que el aceite de girasol ofrece menores emisiones de NO_x en estas condiciones (y en todas las vistas hasta ahora) y que el no refinado también hace que las emisiones sean menores (es más importante el hecho de no refinarse a que sea de girasol). AVU, ASR y ACC tienen valores del orden de 10 ppm superiores al AGC. Vuelve a destacar el aumento repentino en las emisiones del AGR, que pasa de ser el tercero menos emisor a estar en cabeza en el camino que va de 10% a 40%. Por otra parte, destaca el hecho de que las emisiones del AGC no llegan a superar a las del gasoil puro en todo el estudio, y las del ASC sólo lo hacen a partir del 30%.

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=10%



X=10%, A=3,5	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10 bar	24	28	17	18	18	23
P=12 bar	30	33	22	25	23	28
P=14 bar	33	35	23	28	26	32

Figura 8.198: Emisiones de NOx para A=3,5 y X=10%

En la primera gráfica se observa que para todas las presiones el AVU es el que más emite, seguido por el AC y el ASR. El AGC mantiene un nivel bastante bajo para las tres presiones. Tanto AGR como ASC aumentan mucho su nivel de emisiones al aumentar la presión. La segunda gráfica muestra más claramente el “ranking” descrito y sus tendencias.

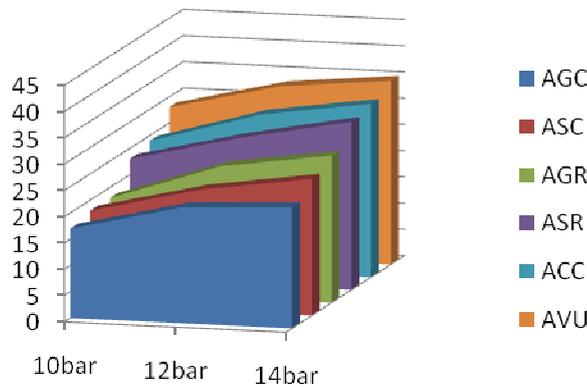
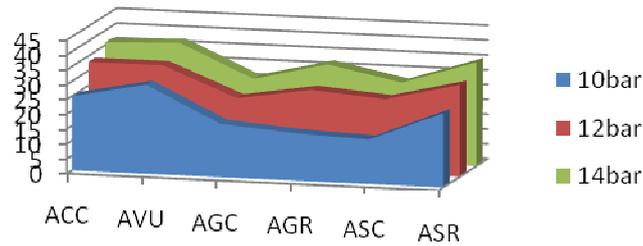


Figura 8.199: Emisiones de NOx para A=3,5 y X=10%

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=20%



X=20%, A=3,5	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10 bar	25	30	18	16	15	25
P=12 bar	33	33	23	27	25	31
P=14 bar	36	37	26	32	27	35

Figura 8.200: Emisiones de NOx para A=3,5 y X=20%

La primera gráfica muestra que para alta presión la tendencia de todos los aceites es la misma. Destaca que es el ASC el que consigue el mínimo, para P=10 bar (en las otras presiones es el AGC el que lo consigue). En la segunda gráfica se aprecia que el aumento en la presión influye de manera más grande tanto al ASC como al AGR (pendiente más alta desde 10 hasta 12 bar).

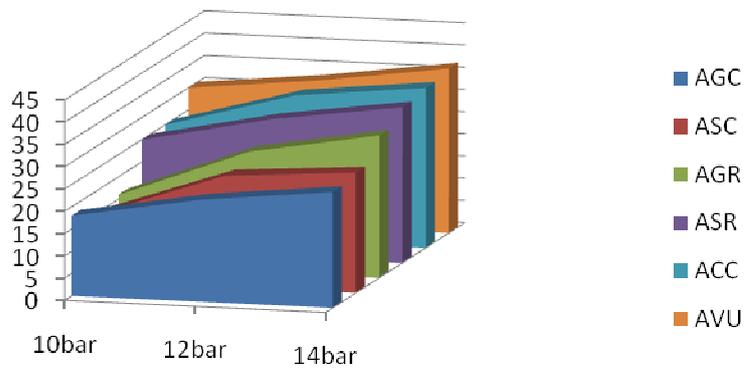
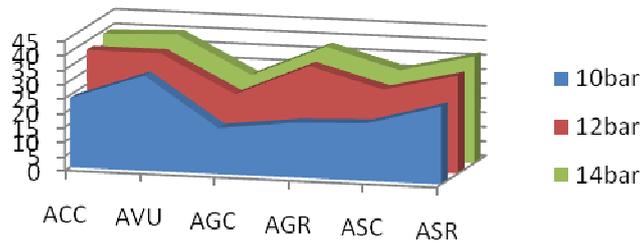


Figura 8.201: Emisiones de NOx para A=3,5 y X=20%

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=30%



X=30%, A=3,5	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10 bar	24	33	16	19	20	27
P=12 bar	37	37	24	35	28	34
P=14 bar	39	40	27	38	31	37

Figura 8.202: Emisiones de NOx para A=3,5 y X=30%

El AGC marca los mínimos para todas las presiones. Destaca que el AGR marca unas emisiones muy bajas con la presión mínima, pero después “se desmadra” en sus valores estando al nivel de los más contaminantes. En la segunda gráfica se ve la estratificación existente. Vuelve a ser el peor el AVU, a todas las presiones.

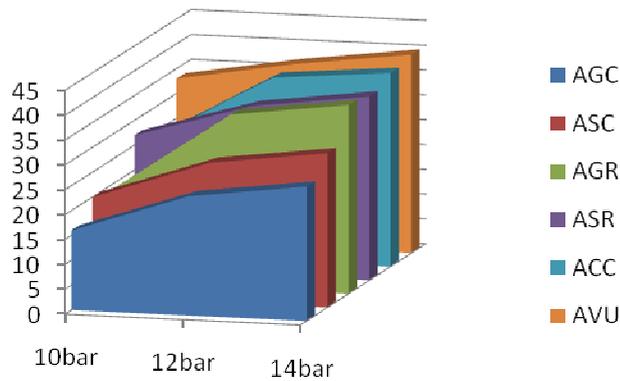
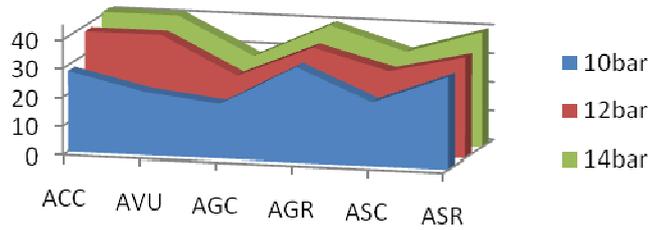


Figura 8.203: Emisiones de NOx para A=3,5 y X=30%

Representaciones gráficas de las emisiones de NOx para el porcentaje en peso de aceite X=40%



X=40%, A=3,5	ACC	AVU	AGC	AGR	ASC	ASR
P=10 bar	28	22	19	33	22	32
P=12 bar	38	38	25	36	29	35
P=14 bar	41	41	28	40	32	40

Figura 8.204: Emisiones de NOx para A=3,5 y X=40%

Destaca el bajo valor del AVU a P=10 bar, ya que en todo el estudio ha dado valores tan bajos, y lo hace con el porcentaje en mezcla a priori más desfavorable. Sin embargo luego vuelve a dar valores altos (los que más). El AGC vuelve a ser el que menos emisiones produce, con un mínimo a P=10 bar al que ni AVU, ni ACC, ni ASR han conseguido acercarse en todo este último estudio. Destaca el mal comportamiento que ambos aceites refinados ofrecen con la participación al 40%. En la segunda gráfica puede verse como llegan a solapar las emisiones de AVU y ACC, algo que todavía no había ocurrido en el estudio.

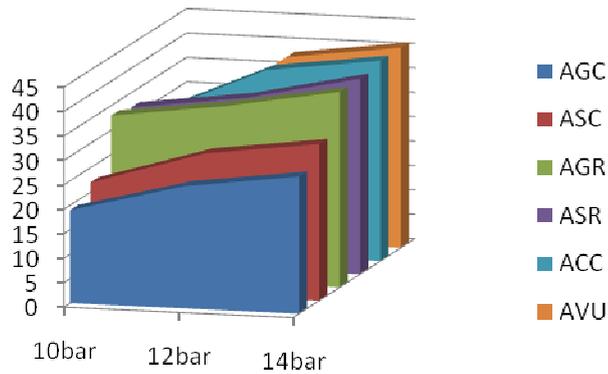


Figura 8.205: Emisiones de NOx para A=3,5 y X=40%

8.5.4.1. Conclusiones

El análisis tanto del ANOVA como de las representaciones gráficas da como conclusiones las siguientes:

.Como predijo el análisis ANOVA, la presión de inyección (P) y el tipo de aceite (T) son las variables más significativas del estudio. Puede parecer que destaca más el tipo de aceite, pero la estratificación del nivel de emisiones según la presión de inyección elegida puede verse en todas y cada una de las gráficas.

.La variable X, porcentaje de aceite en mezcla es importante tal y como rebela el ANOVA, pero no tanto como las dos mencionadas anteriormente. Los valores de emisión tienen la tendencia a crecer cuando aumenta X; sin embargo, en el AGC la tendencia no es tan clara y se mantiene en niveles más o menos constantes (bajos).

.Los mínimos se consiguen para la menor presión de inyección posible, P=10 bar en este caso. La presión de inyección es la variable más determinante del estudio.

.El mejor aceite del estudio en cuanto a emisiones de NOx es sin duda el AGC, y después el ASC, ambos aceites crudos, lo cual indica que el tratamiento del refino empeora el comportamiento de las emisiones de NOx. Cabe destacar que en algunas condiciones otros aceites, como el AVU o el ASR, ofrecen unos valores de emisiones también muy bajos, pero más que una tendencia puede llegar a parecer un error de medida.

.Puede concluirse, por tanto, que las mejores condiciones observadas para evitar las emisiones de NOx son bajos porcentajes de aceite en mezcla, presión baja y aceite crudo (AGC o ASC).

.El aceite de colza (AC) y el aceite vegetal usado (AVU) son, gráfica a gráfica y tabla a tabla, los peores indicados para tener bajos niveles de emisiones. También el ASR ofrece valores muy altos en algunos de los estudios.

.Destaca que para AGC (todas las presiones), ASC (P=10 bar y valores sueltos) y AGR (valores sueltos) se obtienen valores de emisión menores que con el gasoil puro (X=0%).

.Las emisiones de los aceites refinados crecen con el porcentaje de aceite en mezcla en mayor medida que lo que lo hacen el resto de aceites.

CAPITULO 9 CONCLUSIONES

9.1 INTRODUCCIÓN.

Se fijaba como objetivo general de la presente tesis, el estudio de la combustión en un generador convencional, en una cámara a presión constante y con un quemador de pulverización mecánica por presión, de mezclas de aceites vegetales con gasóleo, logrando una combustión eficiente con la consiguiente reducción en la emisión de gases de efecto invernadero. La consecución de dicho objetivo principal queda reflejada en la serie de datos correspondientes a los distintos ensayos que se han realizado y que se presentan en el capítulo 8.

Al margen del objetivo principal se caracterizaban otros objetivos cuyo alcance se presenta a continuación en forma de conclusiones ordenadas conforme a los siguientes apartados:

- a) Los biocombustibles como recurso energético, recursos disponibles, aspectos sociales y económicos.
- b) Caracterización de los distintos aceites y mezclas como biocombustibles.
- c) Adecuación de los aceites para su uso con fines térmicos.
- d) Combustión de las mezclas con distintos parámetros de funcionamiento del quemador.
- e) Análisis de resultados, estudiando rendimiento, emisiones de CO y emisiones de NOx.

9.2 CONCLUSIONES

Seguimos para presentar las conclusiones el orden que hemos determinado en el apartado anterior

9.2.1. Los biocombustibles como recurso energético.

La utilización de aceites vegetales en mezcla con combustibles fósiles como el gasóleo en M.C.I. (Biodiesel) para obtención de energía mecánica está en este momento condicionando enormemente el uso de los aceites para la obtención de biodiesel, por los fuertes compromisos establecidos por la CEE, aunque paradójicamente factores económicos internacionales han llevado a las empresas de transformación españolas y de otros países europeos a no producir biodiesel. En el caso de España las plantas de producción de biodiesel están al 14% de la producción después de las fuertes inversiones realizadas. El biodiesel importado de Argentina y de Indonesia representa el 89% del consumo¹⁰⁸. El actual conflicto con Argentina, por la expropiación de YPF, puede modificar esta situación.

Este problema de precios con las importaciones de biodiesel no es el único conflicto de intereses en el sector. El difícil equilibrio entre el uso como recurso energético de los aceites y el uso para el consumo humano añaden nuevas incertidumbres a su desarrollo.

Las fuertes exigencias requeridas a los combustibles de automoción (biodiesel) lo que origina un porcentaje de rechazos significativo, el coste del proceso de transformación (transesterificación), la utilización de aceites usados de difícil reciclaje para biodiesel, excedentes de producción, etc. garantizan la disponibilidad de aceites que pueden ser utilizados como combustibles para fines térmicos en calderas de pequeña y mediana potencia con quemadores convencionales sin ninguna transformación, contribuyendo a los objetivos de diversificación, sostenibilidad y reducción de GEI.

9.2.2. Caracterización de los biocombustibles

La caracterización de los distintos tipos de aceite que se estudian permite observar que no existen grandes diferencias con el gasóleo.

Las diferencias más notables son la densidad, ligeramente mayor que la del gasóleo, la viscosidad, sensiblemente mayor, el contenido de C

¹⁰⁸APPA Biocarburantes. Datos biodiesel 2011

ligeramente menor lo que hace que el PCI sea menor y el contenido en O mayor lo que permite el empleo de un dosado relativo menor.

La diferencia más notable es pues la viscosidad. La influencia de esta característica se pone de manifiesto en la dificultad de pulverización o atomización del combustible, el aumento de la temperatura del combustible y el aumento de la presión de inyección compensan el aumento de viscosidad. A la vista de los resultados, vemos como en casi todos los casos el aumento de presión de inyección aumenta el rendimiento de la combustión pero en valores muy poco significativos incluso en algunos disminuye.

El PCI en todos los casos tiene valores inferiores al del gasóleo al tener un contenido en Carbono inferior, esta disminución del PCI queda en parte compensada con el aumento de O en el combustible que permite la utilización de menor aire de exceso y por lo tanto un aumento en el rendimiento de la combustión al haber menores pérdidas en los humos.

9.2.3. Adecuación del combustible

Los procesos de obtención del aceite de semillas varían según la naturaleza y el origen de la semilla pero en términos generales se recogen en el apartado 2.6 de una forma genérica. Hay que señalar los mejores resultados que proporcionan los aceites refinados frente a los crudos sobre todo en el caso del aceite de girasol.

Esta adecuación de los aceites podría simplificarse para el uso del aceite como combustible, limitándose a procesos de prensado mecánico y filtrado obteniéndose como subproducto harinas para consumo animal o bien procediendo a la extracción con solventes que aumentan la producción de aceite, con mayor inversión.

En resumen es un equilibrio económico con distintas soluciones para distintos casos. Aunque en líneas generales el rendimiento aumenta al utilizar aceites refinados tampoco el aumento es demasiado significativo.

La composición de las mezclas de aceite y gasóleo no presenta problemas de solubilidad y la mezcla es totalmente homogénea a temperatura ambiente.

9.2.4. Combustión de las mezclas

El proceso de combustión que se ha desarrollado ha permitido observar el comportamiento de las distintas mezclas aceite-gasóleo para distintos aceites con modificación de los parámetros de la combustión: admisión de

aire y la presión de inyección. El n^o total de experimentos que se han efectuado ha sido de 216.

Los factores que intervienen en el análisis son, como ya se ha indicado en Capítulo 6, el tipo de aceite, el porcentaje de mezcla, la presión de inyección y el caudal de aire.

El objetivo de los ensayos no era encontrar el punto óptimo de cada una de las muestras ensayadas sino ver el comportamiento frente a los cambios de los parámetros de la combustión lo que permitirá un uso en equipos convencionales en los que las condiciones de funcionamiento no corresponden a las de laboratorio..

Los datos correspondientes a los productos de la combustión y el rendimiento de la misma se calculan partiendo de la composición elemental del combustible para cada una de las mezclas y de los datos obtenidos en el analizador de humos utilizado en los experimentos. Los datos se tratan en una hoja de cálculo desarrollada a tal efecto.

9.2.5. Análisis de los resultados

El análisis de resultados se estructura en los tres parámetros que se consideran los más significativos del proceso de combustión que son el rendimiento, las emisiones en humos de CO y NO_x.

La conclusión en resumen del análisis del Rendimiento es que la variable más influyente es el tipo de aceite, que el parámetro de presión de inyección tiene un comportamiento en algunos casos irregular, no siempre aumenta el rendimiento con el aumento de la presión de inyección.

El comportamiento para cada tipo de aceite varía sensiblemente y es necesario analizar separadamente los distintos tipos de aceite.

En el análisis de las emisiones de CO, tal y como predecía el análisis ANOVA la mayor interacción entre factores se da en la interacción Aceite- Presión de inyección, aunque su comportamiento difiere según el tipo de aceite, para el aceite de soja Crudo y refinado y para el aceite vegetal usado (ASC, ASR, AVU) las emisiones de CO aumentan con la presión, mientras que para el resto de los aceites disminuyen. También en el grupo de aceites con interacción positiva las emisiones aumentan al aumentar el porcentaje de aceite. En el resto de los aceites presentan en unos casos picos de emisiones y en otros tendencias negativas con el aumento de porcentaje.

En el caso de las emisiones de NOx también se predecía que las variables más significativas eran el tipo de aceite y la presión de inyección.

Con respecto al porcentaje de aceite en la mezcla, las emisiones tienden a crecer en general al aumentar dicho porcentaje, aumenta el nivel de Nitrógeno y sobre todo el contenido en O del combustible lo que hace que aumente la temperatura de combustión, mecanismo fundamental para la generación de NOx.

Los mínimos de emisión se producen a las presiones de inyección más bajas.

En cuanto al tipo de aceite las emisiones aumentan al utilizar aceites refinados frente a los crudos. Las tendencias de todos ellos pueden observarse en las gráficas correspondientes donde se han comentado cada una de ellas.

9.3 DESARROLLOS FUTUROS

La experiencia obtenida en la presente tesis y en otras desarrolladas en el mismo laboratorio del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica puede aplicarse al estudio de la combustión de otros tipos de residuos líquidos que permita además de la valorización de dichos residuos, la capacidad de deshacerse de ellos sin perjuicio medioambiental. La variedad de residuos que se generan hace que sea necesaria su destrucción de una forma segura con el mínimo coste, valorizarlos energéticamente puede ser una de las formas de eliminación. La Lista Europea de Residuos (LER)¹⁰⁹ contiene una amplia clasificación de residuos y su valoración.

Desde el punto de vista experimental el disponer de un equipo de combustión que permita la medición de los caudales de aire de forma precisa podría aportar datos más elaborados sobre el proceso de combustión y sobre las condiciones óptimas de maniobra.

El disponer de analizadores más completos que permitan la obtención directa de más parámetros de la combustión, no teniendo que calcularlos teóricamente, y con mayor precisión, puede aportarnos la explicación a algunos resultados que parecen contradecir los pronósticos teóricos.

¹⁰⁹ LER (Lista Europea de Residuos) MAM/304/2002 de 8 de Febrero

Para el ensayo de fluidos más viscosos sería necesario profundizar en los procesos de atomización, incluso ensayos de atomización con fluido auxiliar que permitan asimismo el uso de equipos convencionales de combustión.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 9

- 108) APPA Biocarburantes. Datos biodiesel 2011
- 109) LER (Lista Europea de Residuos) MAM/304/2002de 8 de Febrero

A1. ANÁLISIS DE LOS ACEITES


Junta de Castilla y León
 ECONOMÍA Y ENERGÍA
 Laboratorio Regional de Combustibles - LARECOM

DATOS ADMINISTRATIVOS

CODIGO LABORATORIO..... **L-363.09**
 TIPO DE MUESTRA..... **Líquida**
 REFERENCIA SOLICITANTE..... **M 1**
 FECHA DE ENTRADA..... **24-noviembre-09**
 SOLICITANTE..... **Univ. de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales
Dpto de Ingeniería Energética y Fluidomecánica**

RESULTADOS

Densidad a 15° (calc.).....	920	Kg/m ³	UNE 51116
Densidad a 35°.....	907,5	Kg/m ³	UNE 51116
Densidad a 60°.....	891	Kg/m ³	UNE 51116
Viscosidad cinemática a 40°C.....	41,22	mm ² /s	UNE 51009
Viscosidad cinemática a 100°C.....	8,87	mm ² /s	UNE 51008
Carbono.....	77,3	%m/m	ASTM 5291
Hidrógeno.....	11,3	%m/m	ASTM 5291
Nitrógeno.....	<0,05	%m/m	ASTM 5291
Azufre.....	<0,02	%m/m	ASTM 1552
Cenizas.....	0,009	%m/m	EN 6243
Agua.....	409	mg/Kg	ASTM 1744
Oxígeno (ácido peróxido).....	11,3	%m/m	-
Poder calorífico superior.....	9390	Kcal/Kg	ASTM 240
Poder calorífico inferior.....	8817	Kcal/Kg	ASTM 240

León, 23 de diciembre de 2008


 Facultad Alfonso de Linaje
 Director del Laboratorio

Avenida de los Reyes Leoneses, 9-11 24008 LEÓN - Tlfno 987 804080 - Fax: 987 804099

Análisis del aceite vegetal usado


Junta de Castilla y León
 Laboratorio Regional de Combustibles - LABCOM

DATOS ADMINISTRATIVOS

CODIGO LABORATORIO..... L-364/09
 TIPO DE MUESTRA..... Líquida
 REFERENCIA SOLICITANTE..... M 2
 FECHA DE ENTRADA..... 24-noviembre-09
 SOLICITANTE..... Univ. de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales
 Dpto de Ingeniería Energética y Fluidomecánica

RESULTADOS

Densidad a 15° (tab.).....	919,5	Kg/m ³	UNE 31116
Densidad a 35°.....	906,5	Kg/m ³	UNE 31116
Densidad a 60°.....	890	Kg/m ³	UNE 31116
Viscosidad cinemática a 40°C.....	35,45	mm ² /s	UNE 31189
Viscosidad cinemática a 100°C.....	8,24	mm ² /s	UNE 31189
Carbono.....	77,5	%m/m	ASTM 5291
Hidrógeno.....	11,7	%m/m	ASTM 5291
Nitrógeno.....	<0,05	%m/m	ASTM 5291
Azufre.....	<0,02	%m/m	ASTM 1552
Cenizas.....	0,027	%m/m	EN 6245
Agua.....	447	mg/kg	ASTM 1744
Oxígeno (cont. por dif.).....	10,8	%m/m	-
Poder calorífico superior.....	9406	Kcal/Kg	ASTM 240
Poder calorífico inferior.....	8813	Kcal/Kg	ASTM 240

León, 23 de diciembre de 2009


 Fdo. L. Alonso de Linaje
 Director del Laboratorio

Avda. de los Reyes Leoneses, 9-11 24008 LEÓN - Tfn: 987 804080 - Fax: 987 804099

Análisis del aceite de colza crudo


Junta de Castilla y León
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y EMPLEO
Laboratorio Regional de Castañón - LARECOSI

DATOS ADMINISTRATIVOS

CODIGO LABORATORIO..... L-366 /09
 TIPO DE MUESTRA..... Líquida
 REFERENCIA SOLICITANTE..... M 4
 FECHA DE ENTRADA..... 24-noviembre-09
 SOLICITANTE..... Univ. de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales
 Dpto de Ingeniería Energética y Fluidomecánica

RESULTADOS

Densidad a 15° (ast.).....	922,5	Kg/m ³	UNE 31116
Densidad a 35°	909,5	Kg/m ³	UNE 31116
Densidad a 60°.....	894	Kg/m ³	UNE 31116
Viscosidad cinemática a 40°C	31,96	mm ² /s	UNE 31108
Viscosidad cinemática a 100°C.	7,67	mm ² /s	UNE 31108
Carbono.....	77,4	%m/m	ASTM 5291
Hidrógeno.....	11,5	%m/m	ASTM 5291
Nitrógeno.....	<0,05	%m/m	ASTM 5291
Azufre.....	<0,02	%m/m	ASTM 1552
Cenizas.....	0,069	%m/m	EN 6245
Agua.....	494	mg/Kg	ASTM 1744
Oxígeno (sum. por dif)	11,0	%m/m	-
Poder calorífico superior.....	9397	Kcal/Kg	ASTM 240
Poder calorífico inferior.....	8814	Kcal/Kg	ASTM 240

León, 23 de diciembre de 2009

 Fdo.: J. Alonso de Linaje
 Director del Laboratorio Regional de Castañón

Avda. de los Reyes Leoneses, 9-11 24008 LEÓN - Tfno: 987 804080 - Fax: 987 804099

Análisis del aceite de soja crudo



DATOS ADMINISTRATIVOS

CODIGO LABORATORIO..... L-367 /09
 TIPO DE MUESTRA..... Líquida
 REFERENCIA SOLICITANTE..... M 5
 FECHA DE ENTRADA..... 24-noviembre-09
 SOLICITANTE..... Univ. de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales
 Dpto de Ingeniería Energética y Fluidomecánica

RESULTADOS

Densidad a 15° (calc.).....	922,5	Kg/m ³	UNE 51116
Densidad a 25°	910	Kg/m ³	UNE 51116
Densidad a 60°	893,5	Kg/m ³	UNE 51116
Viscosidad cinemática a 40°C	32,52	mm ² /s	UNE 51108
Viscosidad cinemática a 100°C	7,95	mm ² /s	UNE 51108
Carbono.....	77,4	%m/m	ASTM 5291
Hidrógeno.....	11,6	%m/m	ASTM 5291
Nitrógeno.....	<0,05	%m/m	ASTM 5291
Azufre.....	<0,02	%m/m	ASTM 1552
Cenizas.....	<0,001	%m/m	EN 6245
Agua.....	268	mg/Kg	ASTM 1744
Oxígeno (catm. por dif)	10,9	%m/m	-
Poder calorífico superior.....	9380	Kcal/Kg	ASTM 240
Poder calorífico inferior.....	8792	Kcal/Kg	ASTM 240

León, 23 de diciembre de 2009



Análisis del aceite soja refinado


Junta de Castilla y León
 Laboratorio Regional de Combustibles - LABCOM

DATOS ADMINISTRATIVOS

CODIGO LABORATORIO..... L-368 /09
 TIPO DE MUESTRA..... Líquida
 REFERENCIA SOLICITANTE..... M 6
 FECHA DE ENTRADA..... 24-noviembre-09
 SOLICITANTE..... Univ. de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales
 Dpto de Ingeniería Energética y Fluidomecánica

RESULTADOS

Densidad a 15° (calc.).....	922,5	Kg/m ³	UNE 51116
Densidad a 35°	909,5	Kg/m ³	UNE 51116
Densidad a 60°.....	893	Kg/m ³	UNE 51116
Viscosidad cinemática a 40°C.....	33,68	mm ² /s	UNE 51108
Viscosidad cinemática a 100°C.....	8,25	mm ² /s	UNE 51108
Carbono.....	77,5	%sm/m	ASTM 3291
Hidrógeno.....	11,5	%sm/m	ASTM 3291
Nitrógeno.....	-0,05	%sm/m	ASTM 3291
Azufre.....	0,03	%sm/m	ASTM 1352
Cenizas.....	0,004	%sm/m	EN 4245
Agua.....	287	mg/Kg	ASTM 1744
Oxígeno (como per. d.f.)	10,9	%sm/m	-
Poder calorífico superior.....	9355	Kcal/Kg	ASTM 249
Poder calorífico inferior.....	8772	Kcal/Kg	ASTM 249

León, 23 de diciembre de 2009


 Fabra, Andrés de Kinaje
 Director del Laboratorio

Avda. de los Reyes Leoneses, 9-11 24008 LEÓN - Tfno: 987 804080 - Fax: 987 804099

Análisis del aceite de girasol refinado

DATOS ADMINISTRATIVOS

CODIGO LABORATORIO..... L-399.09
 TIPO DE MUESTRA..... Líquida
 REFERENCIA SOLICITANTE..... M 7
 FECHA DE ENTRADA..... 4-diciembre-09
 SOLICITANTE..... Univ. de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales
 Dpto de Ingeniería Energética y Fluidomecánica

RESULTADOS

Densidad a 15° (calc.).....	923	Kg/m ³	UNE 31116
Densidad a 35°	910	Kg/m ³	UNE 31116
Densidad a 60°	893,5	Kg/m ³	UNE 31116
Viscosidad cinemática a 40°C.....	33,07	mm ² /s	UNE 31108
Viscosidad cinemática a 100°C.....	7,98	mm ² /s	UNE 31108
Carbono.....	78,0	%m/m	ASTM 5291
Hidrógeno.....	11,5	%m/m	ASTM 5291
Nitrógeno.....	<0,05	%m/m	ASTM 5291
Azufre.....	<0,02	%m/m	ASTM 1552
Cenizas.....	0,041	%m/m	EN 6245
Agua.....	375	mg/Kg	ASTM 1744
Oxígeno (cont. por dtc)	10,4	%m/m	-
Poder calorífico superior.....	9417	Kcal/Kg	ASTM 240
Poder calorífico inferior.....	8834	Kcal/Kg	ASTM 240

León, 29 de enero de 2010.

Fdo.: J. Alonso Linea
 Director del Laboratorio



A2. CALIBRACIÓN DEL ANALIZADOR



SERVICIO DE CALIBRACIÓN EN ESPAÑA

Laboratorio de calibración de la filial en España de Testo AG de Lenzkirch

Medidor de Combustión

Número de Certificado	09G16381
Número de páginas	2
- Fecha	24 de febrero de 2009
- Cliente	ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
- Dirección	
- Ciudad	
- C.P.	
- s/Ref.	
- n/Ref.	20702246
Referido a:	Testo 342-3
Modelo	Número de Serie
0632 3446	608 1592 0331GB
0600 9522	608

Este Certificado de Calibración se ha emitido en base a una garantía aprobada para el Laboratorio de Calibración de Instrumentos Testo por el Laboratorio de Calibración de testo AG en Lenzkirch.

Este documento garantiza:

La trazabilidad de los instrumentos utilizados en el laboratorio para las Calibraciones, con los Estándares nacionales e internacionales del Sistema Internacional de unidades (SI)

La precisión metodológica de los procedimientos de la medición adoptada por el Laboratorio.

Todos los gases utilizados, detallados en la siguiente página, se han controlado, ensayado y, dentro de lo ya establecido, son conforme en todos los puntos con las principales especificaciones de Testo. AENOR certifica a nuestro proveedor habitual de gas de la firma Air Liquide España, S.A. con el número ER-05172/98. Asimismo COFRAC acredita a AIR LIQUIDE (Francia) con el número 2.1288 para la elaboración de botellas patrón con certificado COFRAC.

Para el cálculo de la incertidumbre en gases se ha tenido en cuenta: la incertidumbre del gas patrón, la resolución del instrumento a calibrar, un grupo de experiencias teórico de 10 medidas y una desviación estándar máxima aplicada en un sentido; teniendo en cuenta los criterios de aceptación del laboratorio para el análisis de gases, temperatura y tiro con un nivel de confianza del 95% (K=2).

Los certificados de temperatura se han realizado en un horno con baño de sílice y/o en un horno seco según corresponda al tipo de sonda, tomando como patrón un termómetro TESTO 700 de precisión $\pm 0.2^\circ\text{C}$ hasta 199.9 y $\pm 0.2\%$ hasta 800°C .

Los certificados de presión se han realizado con un generador de presión y depresión tomando como patrón un manómetro MENSOR DPT-4020 con un sensor de rango de -25mbar a 25mbar y linealidad del 0.010% del valor fin.

Los instrumentos Testo 342-1 o Testo 342-3 tienen un rango de medición de O_2 de 0 a 4000 ppm con una exactitud de ± 20 ppm hasta 400 ppm, $\pm 5\%$ del valor medido hasta 2000 ppm y $\pm 10\%$ del valor medido hasta 4000 ppm.

El rango de medición en O_2 de todos los instrumentos mencionados anteriormente es de 0 a 21 vol % con una exactitud de: ± 0.2 vol.%, absoluta.

Los instrumentos Testo 342-3 tienen un rango de medición de NO de 0 a 3000 ppm con una exactitud de ± 15 ppm hasta 100 ppm, $\pm 5\%$ del valor medido hasta 2000 ppm y $\pm 10\%$ del valor medido hasta 3000 ppm.

La reproducción de este certificado en su totalidad sólo está permitida previa autorización del emisor. Cualquier reproducción parcial o valoración de los resultados de medición sólo la puede autorizar el Laboratorio de Calibración de Instrumentos Testo.

Por la presente confirmamos que el sistema de medición descrito cumple con los procedimientos del sistema de gestión de la calidad basado en la norma UNE EN ISO 9001:2000.

Instrumentos testo S.A.
 Zona Industrial, c/ B nº 2 - Apartado de Correos 5 - 08348 Cabrils (Barcelona)
 Telf. Laboratorio 937 539 522 - Fax 937 539 526 - Telf. 937 539 520 - e-mail: info@testo.es - http: www.testo.es

Delegaciones:
 c/ Carretilla,7 - Pol. Ind. Santa Ana, - 28522 Rivas Vaciamadrid (Madrid) - Telf. 914 990 910 - Fax 916 663 899 - e-mail: info@madrid.testo.es
 Av. de la Plata, 21 Bajo - 46013 Valencia (Valencia) - Telf. 963 163 371 - Fax 963 163 719 - e-mail: info@valencia.testo.es



CERTIFICADO DE CALIBRACION

CONDICIONES AMBIENTALES			
Parámetro	Unidad Medicion	Valores limites	Valores al inicio de la
Temperatura	°C	18...26	21.7
Humedad relativa	%	<70	28.4
Presión	hPa	860...1080	946

Certificado n°

09G16381

Fabricante: Testo AG

Descripción	Modelo	Número de Serie
Testo 342-3	0632 3446	608 1592 0331GB
Sonda gases combustión 500°C	0600 9522	608

TABLA DE VALORES DE LA CALIBRACION

Parámetro	Unidad medición	Valor nominal	Valor medido	Limite mínimo	Limite máximo	Incidumbre en la medición	n° Certificado del patron	Laboratorio que ha emitido el certificado
CO	ppm	994	989	945	1043	19	1603/08A COFRAC	AIR LIQUIDE
O2	%	1.4394	1.3	1,2	1,6	0,1	1603/08A COFRAC	AIR LIQUIDE
NO	ppm	78.5	79	74	84	2	5484 SCS	CARBAGAS
Temp. Gas	°C	100,12	100,1	98,5	101,7	0,7	T17314 DKD-K-11201 2008-02	TESTO AG
Tiro	mbar	-0,9098	0,908	-0,9396	-0,8796	0,01	D2819 DKD-K-05301 07-08	TESTO AG

Limite máx. y mín. calculado según especificaciones del producto Testo

Comentarios:

- Los valores positivos del tiro indican que no hay revoco.
- Calibración realizada según el procedimiento PR-15.

24 de febrero de 2009
Técnico de Calibración

Marco Campillejo