

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN ENFOCADO EN LAS TECNOLOGÍAS DE LA
COMBUSTIÓN

JORGE SEBASTIAN MENDOZA MEDINA

JULIÁN ALBERTO ROMERO ROMERO

DIEGO ORLANDO FONSECA AYALA

BHRAYAN STIVENS BARON AVILA

EDGAR ANDRÉS POVEDA CASAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2020

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN ENFOCADO EN LAS TECNOLOGÍAS DE LA
COMBUSTIÓN

JORGE SEBASTIAN MENDOZA MEDINA

JULIAN ALBERTO ROMERO ROMERO

DIEGO ORLANDO FONSECA AYALA

BHRAYAN STIVENS BARON AVILA

EDGAR ANDRÉS POVEDA CASAS

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Mecánico

Director:

Jorge Luis Chacón Velasco

Ingeniero Mecánico, PhD

Codirector

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Ingeniero Mecánico, PhD

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2020

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. GENERALIDADES DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN ENFOCADO EN LAS TECNOLOGÍAS DE LA COMBUSTIÓN.....	13
1.1. JUSTIFICACIÓN	15
1.2. OBJETIVOS	16
1.2.1. Objetivo general.....	16
1.2.2. Objetivos específicos	16
1.3. EL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN Y SUS CARACTERÍSTICAS	18
1.3.1. Roles del seminario.....	19
1.3.2. Metodología	20
2. PLANIFICACIÓN.....	21
2.1. TEMAS Y SUBTEMAS SELECCIONADOS	21
2.2. DISTRIBUCIÓN DE LOS ROLES DENTRO DEL SEMINARIO	25
2.3. ORDEN DE REALIZACIÓN	26
2.4. RECURSOS NECESARIOS PARA LA INVESTIGACIÓN	27
3. EJECUCIÓN	30
3.1. SESIÓN 1	30
3.2. SESIÓN 2	32
3.3. SESIÓN 3	35
3.4. SESIÓN 4	36
3.5. SESIÓN 5	40
3.6. SESIÓN 6	42
3.7. SESIÓN 7	46

3.8. SESIÓN 8	47
3.9. SESIÓN 9	53
3.10. SESIÓN 10	56
3.11. SESIÓN 11	61
3.12. SESIÓN 12	64
4. RESULTADOS DEL SEMINARIO	68
4.1. DESARROLLO DE GUÍAS DE LABORATORIO	68
4.1.1. Laboratorio Estimación del poder calorífico de una biomasa	70
4.1.2. Laboratorio Medición de los gases de emisión en un motor de combustión interna accionado por gas o gasolina, presente en el laboratorio de máquinas térmicas alternativas	77
4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA TEMÁTICA DENTRO DE LA PLATAFORMA DE MOODLE	81
4.3. GENERACIÓN DE UNA PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TEMÁTICA ABORDADA COMO UNA ASIGNATURA ELECTIVA PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	83
5. CONCLUSIONES	93
6. RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Especificación de los temas y subtemas del seminario	21
Tabla 2 Distribución de los roles en cada sesión del seminario.....	25
Tabla 3 Estructura de las sesiones	26
Tabla 4 Variables para el estudio de la carbonilla.....	36
Tabla 5 Temperaturas de ignición de algunos combustibles sólidos.	45
Tabla 6 Clasificación del carbón	47
Tabla 7 Costos de los materiales para la implementación del laboratorio “poder calorífico de la biomasa”	75
Tabla 8. Costos de los materiales para la implementación del laboratorio “Medición de los gases de emisión en un motor de combustión interna accionado por gas o gasolina”	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Formato para la recopilación de información	28
Figura 2. Diapositivas usadas para las sesiones, en este caso de la sesión 13....	29
Figura 3. Residuos de la combustión.....	37
Figura 4. Proceso de fotosíntesis.....	43
Figura 5. Proceso de combustión del oil shale (esquisto bituminoso).....	51
Figura 6. Proceso de combustión en lecho fluidizado presurizado (PCFB)	55
Figura 7. Bomba calorimétrica	71
Figura 8. Balanza de alta precisión	72
Figura 9. Prensa manual para compactación de las muestras	72
Figura 10. Cilindro de oxígeno comprimido	73
Figura 11. Filamento para la ignición	74
Figura 12. Unidad controladora a punto de ser instalada en la caja de medidas...	77
Figura 13. Caja analizadora	78
Figura 14. Sonda de combustión para motores industriales para tests 340 y 350.	78
Figura 15. Banco de pruebas motor Renault.	79
Figura 16. Grupo electrógeno que funciona a partir de gas	79
Figura 17. Organización del curso en el aula virtual de aprendizaje UIS	82
Figura 18. Sistema de distribución de los documentos recopilados en el seminario	82

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Memorias del seminario de investigación enfocado en Tecnologías de la combustión.

Anexo B. Propuestas de laboratorios

Anexo C. Propuesta para la implementación de la temática abordada como una asignatura electiva para la escuela de ingeniería mecánica.

Anexo D. Recursos digitales usados por los relatores del seminario.

Anexo E. Cotización analizador portátil de gases TESTO 350 MN Technologies.

Nota: Los anexos pueden ser consultados en la Base de Datos de Biblioteca

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UN SEMINARIO INVESTIGATIVO ALEMÁN ENFOCADO EN LAS TECNOLOGÍAS DE LA COMBUSTIÓN¹.

AUTORES: JORGE SEBASTIÁN MENDOZA MEDINA
JULIÁN ALBERTO ROMERO ROMERO
DIEGO ORLANDO FONSECA AYALA
BHRAYAN STIVENS BARON AVILA
EDGAR ANDRÉS POVEDA CASAS²

PALABRAS CLAVE: TECNOLOGÍAS DE LA COMBUSTIÓN, SEMINARIO, INDUSTRIA.

DESCRIPCIÓN:

La combustión se define como un proceso exotérmico, en el cual una sustancia (combustible) junto a una atmósfera reductora y en conjunto de una chispa (energía agregada) liberan calor debido a la ruptura de enlaces moleculares. Las tecnologías de la combustión se definen como el conjunto de conocimientos relacionados con los dispositivos presentes en las máquinas que producen calor a partir del proceso de incineración de un combustible. Esta disciplina estudia principalmente la constante evolución de la industria energética centrada en dos bases primordiales, el aumento del rendimiento térmico de las unidades de combustión y generación de energía y la mejora en cuanto al tratamiento y disminución de emisiones contaminantes; teniendo en mente esta premisa, se considera importante que los estudiantes reconozcan los mecanismos con los que actualmente dispone la industria para la obtención de energía de acuerdo con el tipo de combustible y su respectiva configuración de quemado.

Este trabajo de grado en la modalidad de Seminario de investigación propone complementar el conocimiento de los estudiantes en cuanto al concepto de combustión, permitiéndoles identificar las posibles configuraciones de quemadores (definidas como tecnologías de la combustión) de acuerdo con el combustible que se pretenda usar (combustión sólida, líquida o gaseosa), teniendo en cuenta aspectos como los parámetros característicos tanto de dicho combustible, el comburente apropiado, los dispositivos de control de la combustión, la legislación disponible y los métodos de combustión que intervienen dentro del proceso. Todos estos conocimientos se recopilaron y se postularon como una asignatura electiva para la escuela de Ingeniería Mecánica, con la posibilidad de desarrollar un laboratorio destinado a la ratificación de la investigación.

¹ Proyecto de grado

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Jorge Luis Chacón Velasco PhD (Director). Yesid Javier Rueda Ordoñez (Codirector)

ABSTRACT

TITLE: DEVELOP OF A GERMAN RESEARCH SEMINAR FOCUSED ON COMBUSTIÓN TECNOLOGIES³.

AUTHOR: JORGE SEBASTIÁN MENDOZA MEDINA
JULIÁN ALBERTO ROMERO ROMERO
DIEGO ORLANDO FONSECA AYALA
BHRAYAN STIVENS BARON AVILA
EDGAR ANDRÉS POVEDA CASAS⁴

KEYWORDS: COMBUSTION TECNOLOGIES, SEMINARY, INDUSTRY.

DESCRIPTION:

Combustion is defined as an exothermic process, in which a substance (fuel) together with a reducing atmosphere and together with a spark (added energy) release heat due to the rupture of molecular bonds. Combustion technologies are defined as the set of knowledge related to the devices present in machines that produce heat from the process of incineration of a fuel. This discipline mainly studies the constant evolution of the energy industry centered on two main bases, the increase in the thermal performance of the combustion and energy generation units and the improvement in the treatment and reduction of polluting emissions; Bearing in mind this premise, it is considered important that students recognize the mechanisms that the industry currently has to obtain energy according to the type of fuel and its respective burning configuration.

This degree work in the Research Seminar modality proposes to complement the students' knowledge regarding the concept of combustion, allowing them to identify the possible burner configurations (defined as combustion technologies) according to the fuel to be used (solid, liquid or gaseous combustion), taking into account aspects such as the unique parameters of said fuel, the appropriate oxidizer, the combustion control devices, the available legislation and the combustion methods involved in the process. All this knowledge was collected and postulated as an elective subject for the School of Mechanical Engineering, with the possibility of developing a laboratory for the ratification of the research.

³ Degree Project

⁴ Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Jorge Luis Chacón Velasco PhD (Director). Yesid Javier Rueda Ordoñez (Codirector)

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de combustión se considera uno de los descubrimientos más antiguos en la historia de la humanidad. A partir de este hallazgo, la ingeniería emprendió una carrera por encontrar nuevas aplicaciones para aprovechar el poder calorífico entregado por la reacción de combustibles; los avances van desde la misma evolución del cuerpo humano cuando “la idea de cocinar los alimentos llevó a la reducción del tracto intestinal con el paso de las generaciones”⁵. También, gracias al fuego, se logró iluminar las noches aumentando la productividad de las personas. En el siglo XVIII, se desarrolló el llamado motor de la Revolución Industrial, una máquina de vapor cuyo principio de funcionamiento era la generación de movimiento a partir del cambio de fase del agua dentro de un sistema cilindro-pistón; posteriormente, con la creación de los motores de combustión interna, se produjo inicio a la edad moderna.

En la actualidad, la combustión sigue en auge y es motivo de importantes investigaciones a nivel mundial involucrando el desarrollo de la industria, la ciencia y las condiciones de vida. Es allí donde la ciencia química y la termodinámica, en cada una de las aplicaciones de la combustión, describen la reacción de combustibles mediante ecuaciones estequiométricas. En el siglo XVIII, se establecen los postulados de la primera y la segunda ley de la termodinámica aplicados a sistemas reactivos, consiguiendo definir la contabilidad energética del proceso de combustión; sin embargo, en ese momento no se tenía en cuenta la influencia directa de la mecánica de los fluidos en el proceso estudiado. Considerando dichas variables adicionales, modelos de combustión tales como “el modelo numérico de combustión de lecho fluidizado burbujeante”⁶ muestran la

⁵ GIBBONS, Ann. Food for thought: Did the first cooked meals help fuel the Dramatic Evolutionary Expansion of the human brain? En: Revista Science. Vol. 316, publicación 5831, p. 1558-1560

⁶ DIBA, M. F.; KARIM, M. R.; NASER, J. Numerical modelling of a bubbling fluidized bed combustion: A simplified approach. En Revista Fuel. 2020, Vol. 277, 118170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118170>.

utilización de métodos numéricos avanzados para la descripción del proceso de combustión teniendo en cuenta la especificidad del tipo del combustible (sólido, líquido o gaseoso), la condición de absorción calor resultante de la combustión (radiante o convectivo), la producción de emisiones contaminantes, etc. Partiendo de la premisa anterior, se colige que los estudiantes, ingenieros, científicos e investigadores enfocados en el análisis del proceso de combustión, deben conocer los tipos de tecnologías y los factores influyentes para el estudio de este importante tema inmerso en la industria.

En el caso del programa académico de Ingeniería Mecánica adscrito a la Universidad Industrial de Santander, se observa que, en el plan de estudios, el apartado concerniente a la combustión se presenta en la asignatura Termodinámica II; sin embargo, la temática solo se enfoca en los cálculos relacionados con las dos primeras leyes de la termodinámica. Por esta razón, se hace necesario una revisión más profunda de los conceptos técnicos que involucran el fenómeno de la combustión. Para poder llevar a cabo esta iniciativa, se selecciona el seminario de investigación como técnica principal para la recopilación de información acerca de los temas relacionados con los tipos de combustibles que se manejan en la industria actualmente, las características operacionales de las tecnologías asociadas a la combustión y las normativas nacionales e internacionales que la rigen.

La metodología asociada a esta modalidad de proyecto de grado propone que los estudiantes tomen el rol de investigadores, recaben la información necesaria y transmitan los conocimientos adquiridos mediante sesiones de encuentro con otros estudiantes y docentes que deseen profundizar en el área de estudio a través del debate, el aprendizaje mutuo y la cooperación genuina. Asimismo, en el área de ingeniería, la construcción de conocimiento nace con la investigación teórica, pero se ratifica con la experiencia que se puede obtener en laboratorios prácticos; estos se pueden establecer con base en las tecnologías dispuestas por las instituciones educativas, en el caso de la Universidad Industrial de Santander se cuenta con el

edificio de laboratorios de la escuela de Ingeniería Mecánica que dispone de excelentes instalaciones para el aprendizaje experimental.

Teniendo en mente cada uno de estos aspectos, surgió la idea de introducir una nueva materia electiva en el plan de estudios de la Escuela de Ingeniería Mecánica a partir de la ejecución del seminario investigativo denominado “Tecnologías de la combustión”; la información construida en cada una de las sesiones, se consolidó en el Aula Virtual de Aprendizaje UIS, herramienta tecnológica que facilitará la divulgación del conocimiento adquirido en este proyecto a ingenieros y estudiantes que deseen profundizar acerca del proceso de combustión para realizar investigaciones, diseños de prototipos y resolución de problemas a los que se enfrenta el ingeniero mecánico en el ámbito industrial.

1. GENERALIDADES DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN ENFOCADO EN LAS TECNOLOGÍAS DE LA COMBUSTIÓN

Esta sección tiene como finalidad abordar los diferentes temas en los que se enmarca el seminario de investigación enfocado en los fundamentos de la combustión, y dar respuesta a preguntas como: ¿a qué se hace referencia cuando se habla de seminario alemán? ¿Por qué enfocarlo en las tecnologías de la combustión? ¿Cuál es la motivación para llevar a cabo esta investigación? ¿Cómo puede aportar este tema en el desarrollo del aprendizaje de los futuros estudiantes de ingeniería mecánica?

El seminario investigativo alude su origen a una propuesta pedagógica de la universidad alemana en el siglo XVIII para renovar las estrategias de estudio y formación de los investigadores, con esta modalidad de aprendizaje se postula la superación de los sistemas de estudio basados en los procedimientos didácticos por lección, lo cual constituía una superioridad del maestro hacia el alumno suponiendo una implantación de ideas, sin motivar al estudiante a investigar más allá de lo que aprende en el aula de clase.

Lo planteado en el ensayo llamado “el seminario alemán una estrategia pedagógica para el estudiante” , mientras que las necesidades de la sociedad crecen en una proporción geométrica, los conocimientos solo lo hacen en proporción aritmética, por lo tanto para conseguir el conocimiento es preciso acudir a todos los medios posibles, y uno de ellos es la conversación productiva, lo cual se puede utilizar como arma para realizar con ella lo que no se hace mediante la investigación autodidacta, ya que los colombianos leemos muy poco según Rey (2007) planteó:

“pero lo más interesante es que cada vez la lectura entre los colombianos es menos, que en cifras conservadoras se lee 1,6 libros por año”.

En la universidad, el diálogo entre directivos, profesores y estudiantes debería ser una práctica obligatoria, esto se debe realizar en todos los lugares donde el fin sea

adquirir conocimientos en ciencia, es decir el diálogo como medio de aprendizaje e investigación, con esta premisa es preciso definir el seminario alemán como una práctica pedagógica, un medio de comunicación, una reunión de personas que se encuentran para hablar sobre un tema específico, donde se pueden compartir los logros, aciertos y desaciertos encontrados en el camino de la investigación.

La idea de realizar el seminario alemán surge a partir de la necesidad de motivar a los estudiantes a realizar investigación, y romper los paradigmas evaluativos y el aprendizaje por lección que se evidencian comúnmente, los cuales perjudican de gran manera la educación, ya que el estudiante nunca profundiza en los diferentes temas que inquiere a lo largo de su carrera universitaria, por lo cual se generan vacíos en los conocimientos adquiridos; la investigación en la vida de un ingeniero es fundamental debido a que cada día se generan nuevas tecnologías y nuevas formas de enfrentar los problemas ingenieriles, por lo tanto la capacidad de investigación debe ser uno de los aspectos fuertes de los egresados de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

Ahora bien, lo que se requiere es mejorar el desempeño de los ingenieros mecánicos en cuanto al desarrollo de procesos termodinámicos aplicados a la industria colombiana, para solucionar esta cuestión, el rumbo que se le da al seminario investigativo se centra en las tecnologías aplicadas a la combustión, ya que el estudiante de ingeniería mecánica adquiere conocimientos básicos en cuanto al estudio de las máquinas térmicas y calderas sin entender por completo el fenómeno de combustión, que puede ser un aspecto de gran relevancia a la hora de estudiar las mejoras que se pueden desarrollar respecto a la eficiencia de los motores e incluso estudiar nuevas formas de utilizar los combustibles que no afectan de gran manera el medio ambiente, desarrollando motores más eficientes y amigables en el aspecto ambiental.

Cada día los ingenieros y científicos en todo el mundo buscan nuevas maneras de generar la energía que se necesita para suplir las necesidades de consumo no solo en los hogares si no en la industria, la cual día por día requiere más energía para el

desarrollo de procesos, una de las maneras de generación de energía es la combustión de materia prima, ya sea sólida, líquida o gaseosa; por lo que los ingenieros deben empezar a interesarse en este sector y de esta manera realizar investigaciones en cuanto a temas relacionados con los diferentes tipos de combustibles y calderas que se utilizan para la generación de energía, con el fin de optimizar los procesos y disminuir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

Para lograr estos fines, el seminario se organiza en 22 sesiones de dos horas cada una, para poder abarcar todos los temas lo largo del semestre académico, a su vez cada sesión tratará un tema diferente. En el transcurso del seminario se tratan desde los temas básicos de termodinámica hasta profundizar en lo referente a los diferentes tipos de combustibles y todas las variables que afectan el fenómeno de combustión, todo esto siguiendo un hilo lógico y ordenado con el fin de llegar a una acertada conclusión y de esta manera poder llegar a ofrecer esta temática en un futuro como una materia electiva.

1.1. JUSTIFICACIÓN

La idea de realizar un seminario investigativo alemán surge a partir de la necesidad de complementar los temas que se relacionan con el estudio del comportamiento de los combustibles al momento en el que reaccionan para formar la combustión, este estudio ayuda a fundamentar los conocimientos que se adquieren en las asignaturas de termodinámica, transferencia de calor y mecánica de fluidos, encaminando a los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander a realizar estudios respecto al fenómeno de combustión.

El seminario alemán contribuye de gran manera al fomento de la investigación, lo cual es fundamental en el proceso de enseñanza y aprendizaje que se desarrolla en la escuela de Ingeniería Mecánica, ya que este método de estudio guía al

estudiante a indagar sobre los temas de estudio y no quedarse únicamente con los conocimientos teóricos que se adquieren a lo largo de la carrera universitaria.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general.

Generar un seminario investigativo en el área de tecnologías de la combustión usando las herramientas de investigación propuestas por la metodología del seminario alemán, que entregan conocimiento y amplían el campo de trabajo del ingeniero mecánico fomentando la misión de la escuela de Ingeniería Mecánica.

1.2.2. Objetivos específicos

a) Estructurar la temática del seminario denominado: tecnologías de la combustión, teniendo en cuenta los siguientes temas:

- Termocombustión:
 - Energías involucradas en el proceso de combustión.
 - Datos base para los procesos de combustión.
 - Proceso de combustión
 - Tipos de combustibles y sus propiedades.
 - Aplicaciones de la combustión.
 - Legislación de la contaminación del aire.

- Combustión sólida.
 - Propiedades físicas.
 - Propiedades químicas.
 - Tratamiento térmico.

- Gasificación y combustión.
- Identificación de combustibles sólidos.
- Biomasa.
- Carbón.
- Métodos de combustión del carbón.
- Combustibles sólidos relacionados con el petróleo.
- Combustión de desechos sólidos.
- Tecnologías asociadas a la combustión de sólidos.
- Tecnologías de lecho fluidizado.
- Chimeneas.
- Emisiones.

- Combustión líquida
 - Propiedades físicas de los fluidos.
 - Quemadores y sus tipos.
 - Diseño de quemadores.
 - Chequeo de quemadores.
 - Instalaciones y mantenimiento.
 - Operaciones del quemador-calentador.
 - Ductos quemadores.
 - Quemadores de caldera.
 - Control de la combustión.
 - Consideraciones operacionales extra.
 - Resolución de problemas.

- Combustión gaseosa.
 - Propiedades físicas de los gases.
 - Quemadores de gas.
 - Tipos de quemadores.
 - Ductos Quemadores.

- Equipo para la utilización de gas.
 - Controles del suministro de aire y gas.
 - Calderas pirotubulares para combustibles gaseosos.
 - Sistemas de seguridad de llama del quemador.
 - Sistemas de quemado multicomcombustible.
-
- Desarrollar guías de laboratorio con el fin de afianzar la teoría investigada mediante la observación de las tecnologías disponibles en la escuela de ingeniería mecánica.
 - Implementar la temática concluida por el seminario en la plataforma Moodle.
 - Generar una propuesta para la implementación de una asignatura electiva en el plan de estudios del programa de ingeniería mecánica con base en los documentos adquiridos del seminario anexando los modelos de evaluación requeridos en el curso.

1.3. EL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN Y SUS CARACTERÍSTICAS

El seminario de investigación se define como una técnica académica donde “un grupo de participantes se dedica a estudiar un tema, discutirlo a partir de diferentes fuentes y finalmente encaminar la reunión a generar conclusiones y nuevos interrogantes”⁷, se ha usado como método de investigación y como modalidad para proyecto de grado dentro de la Universidad industrial de Santander.

En este tipo de modalidad, los participantes son investigadores dedicados a la búsqueda de información, sin embargo, dado que el seminario posee características de “fortalecimiento del aprendizaje grupal, desarrollo de habilidades

⁷ UIS. Lineamientos para el seminario de investigación como modalidad para el desarrollo del trabajo de grado. 2007. p. 4.

interpersonales, mejoramiento de la búsqueda individual”⁸ se deben conocer los papeles que ocupan los estudiantes dentro del grupo de trabajo.

1.3.1. Roles del seminario.

- **Directores.** Son docentes que guían a los estudiantes hacia la búsqueda de las respuestas requeridas o dictaminadas para la sesión. Estos se encargan de solucionar inquietudes de profundidad o recomendar posibles fuentes de búsqueda que pueden ayudar a la ejecución del seminario.
- **Relatores.** Es una o unas personas que se encargan de exponer el tema a discusión propuesto para la sesión. Este o estos mostrarán la información desde dos puntos de vista, dado que puede exponer textualmente la información consultada o puede describir su conclusión a partir de los datos consultados. Su papel es de los más importantes dado que tendrá toda la atención del grupo.
- **Correlatores.** Son las personas encargadas de complementar la investigación realizada por el relator. Este complemento se hace aportando información (diferente a la expuesta), evaluando el contenido y su claridad cuando se es compartido. Con esto en mente, el Correlator dará su postura en el seminario y se encargará de motivar a los participantes a entrar en debate.
- **Participantes.** Refiérase a las personas que desean aprender, participar e investigar a cerca de los temas que se tocan en el seminario. Estos pueden cuestionar y participar dentro de las sesiones, siempre y cuando hallan preparado previamente una investigación de los temas.
- **Protocolante.** Encargado de generar un documento a partir de la investigación expuesta por el relator y el Correlator. Se encargará de sustraer las ideas más importantes tanto de la exposición como el debate que se genere.

⁸ Ibid. p. 5.

1.3.2. **Metodología.** Con el conocimiento de los roles a ocupar dentro del seminario y de acuerdo con la teoría consultada en los lineamientos presentados por la UIS se selecciona una serie de etapas para llevar a cabo el seminario:

- **Planificación:** En esta fase se establecen los lineamientos, alcance y resultados que se quieren obtener. Debe incluir la selección de los temas, con su debido estudio bibliográfico, los subtemas posibles y el planteamiento de las sesiones.
- **Ejecución:** Para esta fase, se requiere la documentación adecuada para los subtemas a estudiar en cada sesión, donde incluya bibliografía definida; esta debe ser facilitada a los participantes para que puedan aportar directamente. En el momento de reunión, se debe recopilar la información producto de la exposición y discusión.
- **Finalización:** Es el paso final en el cual, las memorias del seminario se convertirán en un informe final.

2. PLANIFICACIÓN

2.1. TEMAS Y SUBTEMAS SELECCIONADOS

Los temas y subtemas seleccionados buscan abarcar todo lo relacionado con el proceso de combustión y sus aplicaciones en la industria, el orden adoptado sigue un hilo lógico en el que cada tema tiene relación con el anterior, iniciando con el estudio de la termocombustión como complemento de los temas vistos en la asignatura termodinámica II, luego se habla de las tecnologías y factores influyentes en el proceso de combustión de sólidos, líquidos y gases respectivamente. Todo esto manteniendo un enfoque educativo, teniendo en cuenta la premisa de crear un curso para las futuras generaciones de estudiantes. En la tabla 1 se observan los temas de cada sesión.

Tabla 1 Especificación de los temas y subtemas del seminario

TEMA 1: TERMOCOMBUSTIÓN
Sesión 1 1. Energías involucradas en el proceso de combustión 2. Datos base para los procesos de combustión 3. Proceso de combustión (primera parte)
Sesión 2: 1. Proceso de combustión (segunda parte)
Sesión 3: 1. Proceso de combustión (tercera parte) 2. Tipos de combustibles y sus propiedades 3. Aplicaciones de la combustión (primera parte)
Sesión 4 1. Aplicaciones de la combustión (segunda parte)

2. Legislación de la contaminación de aire
TEMA 2: COMBUSTIÓN SÓLIDA
Sesión 5:
<ol style="list-style-type: none"> 1. Propiedades físicas de los combustibles sólidos 2. Propiedades químicas de los combustibles sólidos 3. Tipos de combustibles sólidos 4. Tratamiento térmico 5. Normativa nacional e internacional para el estudio de combustibles sólidos
Sesión 6
<ol style="list-style-type: none"> 1. Definición de la biomasa 2. Tipos de biomasa 3. Propiedades físicas de la biomasa 4. Propiedades termodinámicas de la biomasa 5. Temperaturas asociadas a la combustión de biomasa 6. Velocidades asociadas a la combustión de biomasa
Sesión 7
<ol style="list-style-type: none"> 1. Carbón 2. Propiedades fisicoquímicas del carbón 3. Propiedades termodinámicas del carbón 4. Métodos de combustión del carbón
Sesión 8
<ol style="list-style-type: none"> 1. Combustibles sólidos relacionados con el petróleo 2. Combustión de desechos sólidos
Sesión 9
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tecnologías de lecho fluidizado 2. Proceso de combustión en tecnologías de lecho fluidizado 3. Ventajas del lecho fluidizado

4. Aplicación del lecho fluidizado en ciclos de potencia
Sesión 10
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tecnologías asociadas a la combustión de sólidos 2. Quemadores de combustible pulverizado 3. Sistemas de combustión con bajas emisiones de NOx
Sesión 11
<ol style="list-style-type: none"> 1. Hogares y quemadores ciclón 2. Principios operativos de los quemadores ciclón
Sesión 12
<ol style="list-style-type: none"> 1. Chimeneas 2. Quemadores antorcha 3. Emisiones
TEMA 3: COMBUSTIÓN LÍQUIDA
Sesión 13
<ol style="list-style-type: none"> 1. Propiedades físicas de los fluidos 2. Propiedades químicas de los fluidos 3. Tipos de quemadores para combustión líquida
Sesión 14
<ol style="list-style-type: none"> 1. Diseño de quemadores 2. Selección de quemadores 3. Casos de estudio para el diseño de quemadores
Sesión 15
<ol style="list-style-type: none"> 1. Chequeo de quemadores 2. Instalación y mantenimiento de quemadores 3. Condiciones de operación para distintos quemadores
Sesión 16
<ol style="list-style-type: none"> 1. Operaciones del sistema quemador-calentador 2. Supervisión del calentador para mejorar el rendimiento 3. Inspección interna y externa del calentador

Sesión 17
<ol style="list-style-type: none"> 1. Quemadores de caldera 2. Control de la combustión
Sesión 18
<ol style="list-style-type: none"> 1. Condiciones operacionales extra 2. Solución de problemas en quemadores
TEMA 4: COMBUSTIÓN GASEOSA
Sesión 19
<ol style="list-style-type: none"> 1. Propiedades de los gases combustibles 2. Tipos de combustibles gaseosos 3. Quemadores para combustible gaseoso 4. Otros quemadores
Sesión 20
<ol style="list-style-type: none"> 1. Ductos quemadores 2. Aplicaciones para combustibles gaseosos 3. Normativa para el estudio de quemadores
Sesión 21
<ol style="list-style-type: none"> 1. Controles de suministro de aire y gas 2. Calderas pirotubulares
Sesión 22
<ol style="list-style-type: none"> 1. Sistemas de seguridad en calderas 2. Sistemas de seguridad de llama del quemador 3. Quemadores multicomcombustible

2.2. DISTRIBUCIÓN DE LOS ROLES DENTRO DEL SEMINARIO

Para la selección del papel que desarrollan los estudiantes en cada sesión del seminario, se consideró como mejor opción distribuir los roles a manera de rotación, de este modo todos los integrantes adquieren experiencia y aplican lo aprendido en el transcurso del seminario, por esta razón se realiza el reparto de papeles como se muestra en la tabla 2. Cabe resaltar que inicialmente se estimó un aproximado de 15 sesiones, pero se observó que algunos temas se extendían, por lo que al final el seminario contó con 22 sesiones para la temática abordada y una sesión 0 en la que se realizó la introducción.

Tabla 2 Distribución de los roles en cada sesión del seminario

SESIÓN	RELATOR	CORRELATOR	PROTOCOLANTE
0	JULIÁN ROMERO	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA
1	JORGE MENDOZA	JULIÁN ROMERO	BHRAYAN BARÓN
2	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA	JULIÁN ROMERO
3	BHRAYAN BARÓN	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA
4	JULIÁN ROMERO	BHRAYAN BARÓN	DIEGO FONSECA
5	JORGE MENDOZA	JULIÁN ROMERO	BHRAYAN BARÓN
6	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA	JULIÁN ROMERO
7	BHRAYAN BARÓN	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA
8	JULIÁN ROMERO	BHRAYAN BARÓN	DIEGO FONSECA
9	JORGE MENDOZA	JULIÁN ROMERO	BHRAYAN BARÓN
10	JORGE MENDOZA	JULIÁN ROMERO	DIEGO FONSECA
11	JORGE MENDOZA	BHRAYAN BARÓN	JULIÁN ROMERO
12	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA	BHRAYAN BARÓN
13	BHRAYAN BARÓN	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA
14	JULIÁN ROMERO	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA

15	JORGE MENDOZA	JULIÁN ROMERO	DIEGO FONSECA
16	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA	JULIÁN ROMERO
17	BHRAYAN BARÓN	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA
18	JULIÁN ROMERO	BHRAYAN BARÓN	DIEGO FONSECA
19	JORGE MENDOZA	JULIÁN ROMERO	BHRAYAN BARÓN
20	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA	JULIÁN ROMERO
21	BHRAYAN BARÓN	DIEGO FONSECA	JORGE MENDOZA
22	JULIÁN ROMERO	BHRAYAN BARÓN	DIEGO FONSECA

2.3. ORDEN DE REALIZACIÓN

Se considera necesario tener un orden en el desarrollo del seminario, por lo que cada sesión se estructura como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Estructura de las sesiones

Actividad	Descripción	Agente a cargo
Apertura	En este instante se hace una lectura del plan de trabajo y se verifica la asistencia y rol que se asignó a cada participante en la reunión previa. Finalmente se asignan los roles para la siguiente sesión.	Director
Lectura del protocolo	Situación en la cual se hace un repaso de la sesión anterior por medio de la lectura de la memoria. Este es el momento ideal para abrir la sesión con preguntas aclaratorias, estas serán consignadas en la memoria de dicho encuentro.	Protocolante
Relatoría	Momento en el cual la información que se ha indagado se presenta frente al grupo de trabajo en forma de exposición.	Relator

Correlatoría	Es una de las actividades que se puede realizar sobre la relatoría, dado que los datos pueden complementar la exposición, sin embargo, se espera que finalice la relatoría para poder intervenir para hacer las críticas respectivas y generar las preguntas requeridas para la discusión	Correlator
Discusión	Para esta actividad, las preguntas que se produjeron en la correlatoría pasan a ser validadas o refutadas.	Todos los participantes
Conclusiones	Sección final donde se evalúa la exposición y la información indagada. En este caso se debe leer protocolo del día para ser aprobado.	Director y protocolante

2.4. RECURSOS NECESARIOS PARA LA INVESTIGACIÓN

La sección de investigación no se limita netamente a libros físicos, sino que se usan los recursos electrónicos de búsqueda que la Universidad ofrece a los estudiantes. Se realiza la exploración de otras investigaciones realizadas por estudiantes, dado que se necesita conocer la existencia de bancos y elementos que pueden ser útiles a la hora de generar las propuestas de laboratorio. Otros recursos importantes son las plataformas CRC *press*, *Sciencedirect* para la obtención de libros y *handbooks*; para los papers Scielo, Google Académico.

En cuanto a la recopilación de información y posterior exposición en cada sesión, se usan los programas MS Word y Power Point. Para este seminario se maneja un formato de recopilación de archivos como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Formato para la recopilación de información

Formato para la recopilación de información			
Universidad Industrial de Santander			
Facultad	Fisicomecánicas	Escuela	Ing. Mecánica
Nombre del seminario	Seminario investigativo enfocado en las tecnologías de la combustión		
Nombre del estudiante	Jorge Sebastián Mendoza Medina		
Código del estudiante	2145605		
Tema	Combustion	fecha:	
Subtema	Biomasa		

BIOMASA

Características de la combustión de biomasa

Las propiedades de la biomasa determinan la configuración de su comportamiento. Consecuentemente, es importante considerar como los procesos generales de combustión aplican específicamente a los biocombustibles. Las partículas del combustible se secan y entonces se calientan. Cuando una región dada de partículas de combustible encuentra la temperatura de reacción se somete a pirolisis a volátiles y carbonos fijos condensables y no condensables. Existe un frente de reacción distinto cuando la pirolisis comienza, y una pequeña región de actividad de pirolisis es formada como la reacción procedente de la superficie de la partícula de combustible hasta el núcleo. La oxidación de los carbonos fijados, el proceso de combustión final de importancia, comienza después de que la partícula se piroliza por completa, y la liberación de volátiles está completada. Las reacciones de oxidación del carbón (Char¹) son influenciadas por las estructuras físicas y químicas del carbón (char) formado. Formación de emisiones en el aire, tales como óxidos de nitrógeno y hidrocarburos poliaromáticos (PAH's) resultados de la pirolisis y los productos volátiles específicos generados. La formación de productos de óxidos sulfúricos es función de la composición del combustible. El destino de las trazas

¹ a combustible residue remaining after the destructive distillation of coal

Figura 2. Diapositivas usadas para las sesiones, en este caso de la sesión 13



3. EJECUCIÓN

A continuación se pretende mostrar un resumen de las memorias correspondientes a cada sesión, cabe resaltar que puesto que este seminario tiene como objetivo implementar la temática investigada como una materia electiva, en la memoria se presentan todos los aspectos relevantes discutidos en cada una de las sesiones, para que cualquier estudiante o ingeniero haciendo uso de las diapositivas creadas, los documentos recopilados en el aula virtual de aprendizaje UIS y las memorias del seminario, pueda aprender lo necesario para desarrollar actividades e investigaciones concernientes al tema de combustión. Los temas 3 y 4 al ser muy extensos, se decide exponerlos en el anexo A Memorias del seminario alemán enfocado en las tecnologías de la combustión y se explica a detalle los temas 1 y 2 relacionados a la termocombustión y combustión sólida.

3.1. SESIÓN 1

Para dar comienzo al seminario alemán necesario recordar los conceptos de termocombustión; en esta primera sesión se discute acerca de las energías involucradas en el proceso de combustión y se habla de los datos base para su estudio.

En el estudio de la energía interna de un sistema se consideran relevantes las energías cinética y potencial, sin embargo, en el proceso de combustión se considera además la energía química, siendo esta el producto de la ruptura de los átomos en el momento de la reacción, es decir, un combustible en presencia de un oxidante sufre cambios en su estructura molecular liberando cierta cantidad de

energía. Para estudiar la energía interna de un sistema, se deben tener en cuenta los siguientes conceptos⁹:

- Entalpía a una presión y temperatura dada $H_{P,T}$.
- Trabajo de flujo PV .
- Entalpía de formación de la sustancia química H_f^0 .
- Entalpía a condiciones estándar $H_{PT,298}$.

La sesión continúa con la definición de combustión con el fin de introducir la temática al proceso de combustión, siendo este subtema el más importante de la termocombustión; la combustión es “el proceso mediante el cual una sustancia típicamente compuesta de hidrógeno o carbono (o ambos) reacciona con oxígeno en presencia de una fuente de calor, liberando energía al ambiente que le rodea”¹⁰; el proceso de combustión requiere de tres componentes: combustible, comburente y una fuente de calor. En las reacciones de combustión se tienen reactivos y productos, los cuales pueden ser analizados en base molar o en base másica.

Para finalizar se estudian los diferentes tipos de combustiones que se pueden presentar, el primer caso es la combustión estequiométrica, la cual se realiza con la cantidad de oxígeno estrictamente necesaria para la oxidación. Otro tipo de combustión es la incompleta, donde se tiene oxígeno insuficiente para la oxidación, generalmente en este tipo de combustiones se encuentra monóxido de carbono. Por otra parte, se tiene la combustión en exceso, es decir, se tiene más oxígeno del necesario para la oxidación.

⁹ EL-MAHALLAWY, F y EL-DIN HABIK. Fundamentals and technology of combustion. El servier. Páginas 22-26

¹⁰ CENGEL, Y, y BOLES, M. Termodinámica séptima edición. McGraw Hill interamericana editores.

3.2. SESIÓN 2

Para abrir la sesión del día, el correlator presentó algunos ejemplos en los que se aplica el tema de estequiometría en diferentes tipos de reacciones, y de esta manera se dio paso para que el relator continuara con algunas definiciones clave para el entendimiento de lo que es la primera ley de la termodinámica aplicada al proceso de combustión, esta ley fue expuesta por el relator y complementada por los participantes y los directores del seminario, los aportes se dieron a manera de ejemplos, y en algunos casos se realizaron aclaraciones en cuanto a definiciones concretas, por último, se concluyó con la temática de temperatura de llama adiabática, la cual fue presentada con un ejemplo y complementada por los participantes al seminario.

Se trabajó la temática de la siguiente manera:

Con la experiencia de los maestros se sabe que la mejor manera de dar a conocer un tema en ingeniería, además, que sea perfectamente asimilado por los participantes es con la realización de modelos donde se aplique la teoría presentada, por esta razón, primero se proporcionan ejemplos de la estequiometría de las reacciones, los cuales se realizan mediante un análisis molar, en el primer ejemplo se presenta la reacción del propano y cómo debe ser su ecuación estequiométrica para 15 moles de combustible¹¹; como se sabe, en una reacción puede haber oxígeno en exceso o en defecto, para entender esto, se presenta el caso de la reacción de una mol de octano con 13 moles de combustible diatómico, la cual es una combustión en exceso, la característica principal de este tipo de reacciones, es que en los productos hay oxígeno diatómico, finalmente para dar a conocer la combustión en defecto, se presenta el caso de la reacción de una mol de

¹¹ MARADEI, Juan. Termodinámica aplicada. Capítulo 4, "Combustión". Grupo editorial UIS. Bucaramanga 2002. ISBN-10: 9588187052

propano con 4.5 moles de O_2 , la cual arroja en los productos de combustión, una mol de monóxido de carbono.

A continuación, se discuten las definiciones de punto de inflamación, punto de ignición y punto de autoignición, estos conceptos no están muy claros, puesto que en la bibliografía se presentan de diferentes maneras, la discusión se centra en definir la diferencia entre cada término, la cual arroja como resultado que, el punto de ignición es “la temperatura mínima a la cual el combustible emite suficientes vapores que en presencia de aire u otro comburente reaccionan en contacto con una chispa, pero que al retirar esta fuente de ignición, la reacción no continúa”¹², la diferencia con el punto de inflamación radica en que la condiciones de la mezcla comburente-combustible, deben ser tales que al retirar la fuente de ignición, la combustión continúe mientras haya flujo de oxígeno y combustible, por otro lado la autoignición se encuentra cuando se presenta una reacción sin utilizar una chispa, es decir, las condiciones del ambiente son tales que la combustión se presenta espontáneamente sin una fuente de ignición; otros conceptos discutidos son los límites superior o inferior de inflamabilidad o explosividad (depende de la bibliografía consultada), estos plantean que, por debajo del límite inferior no se presenta combustión, puesto que el combustible es muy poco, y por encima del límite superior tampoco hay combustión, puesto que hay exceso de combustible, es decir, hay una zona de riesgo de explosión entre ambos límites, en la cual la mezcla aire-combustible es la adecuada para la combustión¹³.

También se habla acerca de la primera ley de la termodinámica, y su importancia para el estudio de los procesos de combustión en el campo de la ingeniería, esta ley plantea que el cambio de energía de los productos y reactivos de la combustión es igual al calor expulsado o absorbido durante la reacción menos el trabajo producido por esta, para lo cual se presentan dos casos, reacción a volumen

¹² ESPARZA, Félix. El fuego o combustión, pág. 15

¹³ SOLER & PALAU – definiciones. Tomado de la web: <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-ventilacion-en-ambientes-explosivos/> consultado el: 08/11/2019

constante y reacción a presión constante. Cuando se encuentra que una reacción es a volumen constante no hay trabajo en el sistema, por lo tanto el cambio en la energía interna de la reacción es igual al calor expulsado o absorbido por esta; cuando se presenta una reacción a presión constante se observa que existe un trabajo, lo cual implica que el calor es igual al cambio en la energía interna menos el trabajo¹⁴, como se conoce de discusiones anteriores, esta diferencia también representa el cambio en la entalpía de una reacción, por lo que se concluye, que para una reacción a presión constante, el calor absorbido o expulsado es igual al cambio en la entalpía

Se debe tener en cuenta que cuando los reactivos o productos no se encuentran a condiciones estándar, hay que hacer uso de la entalpía sensible, es decir, la entalpía será la suma de la entalpía de formación y la entalpía sensible a la temperatura en que se encuentre el compuesto.

Por último, es importante conocer la definición de temperatura de llama adiabática, es decir, la temperatura de los gases de combustión, en la cual no se expulsa ni se absorbe calor en la reacción¹⁵, esto se reduce simplemente a encontrar la temperatura de productos, donde no haya cambio de entalpía entre productos y reactivos, para el cálculo de dicha temperatura, se procede a realizar un proceso iterativo tomando valores de las tablas termodinámicas de entalpías de formación y entalpías sensibles para los productos, suponiendo diferentes valores de temperatura, hasta encontrar un valor en el cual la entalpía de los productos sea igual a la entalpía de los reactivos

¹⁴ FYGUEROA, Simón y Araque Jesús. El proceso de combustión en MCI. Universidad de los ANDES. Mérida, 2005

¹⁵ HIMMELBLAU, David. Principios básicos y cálculos en ingeniería química. Sexta edición.

3.3. SESIÓN 3

La sesión 3 inicia con la discusión acerca del análisis ORSAT realizado para determinar la composición de los gases producidos en una combustión, este estudio se desarrolla en base molar y su resultado se presenta en base seca, lo que implica que no se analiza la cantidad de agua generada por la oxidación del hidrógeno; el funcionamiento del equipo clásico para realizar un estudio ORSAT se basa en la ley de Amagat de los volúmenes parciales, la cual plantea que “en una mezcla de gases, cada gas ocupa su volumen como si los demás gases no estuvieran presentes”¹⁶. El equipo de medición se enfoca en la disminución del volumen de una muestra de gases que pasa a través de líquidos absorbentes a temperatura ambiente y presión constante. Este análisis volumétrico difiere del análisis molar puesto que en el segundo si se tiene en cuenta el agua presente en los gases de combustión; una manera de obtener la cantidad de moles de agua producidas es realizando el balance en base molar a partir del estudio realizado en base seca.

Continuando con la sesión se estudian algunas tecnologías utilizadas para el análisis de gases principalmente en chimeneas, tomadas del libro de memorias del X congreso internacional de materiales llevado a cabo en la Universidad industrial de Santander los días 23-25 de octubre del 2019.

Ahora es importante hablar acerca de la eficiencia de combustión, definiéndola como “el cambio de entalpia efectivo con respecto al cambio de entalpia máximo”¹⁷, este concepto involucra la entalpia liberada en la combustión real como numerador y la entalpía liberada en la combustión estequiométrica en el denominador. Es preciso estudiar la eficiencia en quemadores y la eficiencia en calderas como

¹⁶ MARADEI, Juan. Termodinámica aplicada. Capítulo 4, sección 4,7 “Análisis de los productos de combustión”. Grupo editorial UIS. Bucaramanga. 2002. ISBN-10: 9588187052

¹⁷ Definición tomada de la web: Electro Industria. En línea: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1135> Consultado: 15/11/2019

conceptos distintos ya que la eficiencia en quemadores se relaciona directamente con la liberación de calor en la combustión¹⁸.

Para finalizar la sesión se estudian las pérdidas debidas a los diferentes factores que influyen directa e indirectamente en el proceso de combustión¹⁹.

3.4. SESIÓN 4

En la sesión 3 surgieron algunas dudas por parte de los miembros del grupo de trabajo, por lo tanto en esta sesión se realizan las respectivas aclaraciones; en primer lugar se habla de lo referente a la carbonilla con un enfoque en el estudio de sus componentes antes y después de la combustión, cabe aclarar que lo plasmado en las diapositivas y en este texto respecto a este tema es netamente ideal y basado en la literatura del ingeniero Juan Francisco Maradey de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Sabiendo que el carbono presente después de la combustión se divide en el carbono de los productos secos y el carbono en la carbonilla (carbón que queda sin quemar) se hace necesario saber el contenido de carbono presente en la carbonilla para comprender realmente cual es el porcentaje de carbono que hizo combustión. Las variables que maneja la literatura del ingeniero Juan Maradey son las siguientes²⁰:

Tabla 4 Variables para el estudio de la carbonilla

CARBÓN	COMBUSTIÓN	CARBONILLA
$C' \rightarrow$ g carbono		$c \rightarrow$ g carbono
$CZ' \rightarrow$ g cenizas		$Cz \rightarrow$ g cenizas

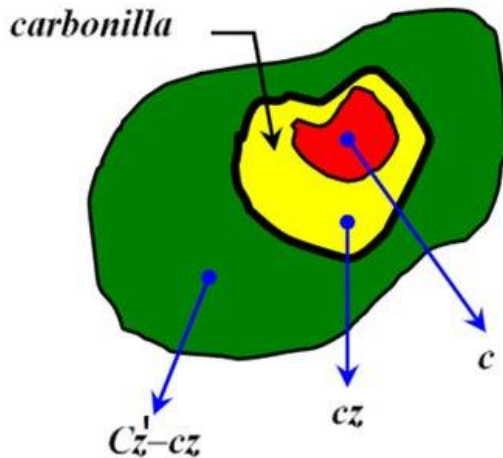
¹⁸ SERRANO, Juan Carlos. análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural

¹⁹ GÜISA, Ronald y RANGEL, Víctor. Metodología para determinar la eficiencia energética de calderas de baja potencia. Revista científica, jóvenes en la ciencia.

²⁰ MARADEI, Juan. Termodinámica aplicada. Capítulo 4, "Combustión". Grupo editorial UIS. Bucaramanga.2002. ISBN-10: 9588187052

Fuente: MARADEI, Juan. Termodinámica aplicada. Capítulo 4, "Combustión". Grupo editorial UIS. Bucaramanga 2002. ISBN-10: 9588187052

Figura 3. Residuos de la combustión



Editado de Figura E4-10, termodinámica aplicada J.F. Maradey. UIS Ing. Mecánica

Este diagrama describe los residuos de la combustión y se observa que la carbonilla es la suma del carbono y la ceniza presentes en ella, es importante tener en cuenta que la relación másica carbono/ceniza inicial del carbón se mantiene en la carbonilla, para esto es necesario suponer un carbón ideal y homogéneo, es decir las propiedades del carbón se mantienen iguales en todas las direcciones, lo cual es una suposición necesaria para facilitar el cálculo.

Continuando con la sesión, la discusión se centra en las aplicaciones que involucran la combustión, donde se estudian diferentes procesos de obtención de energía calorífica, mecánica y eléctrica, además se mencionan otros procesos como el tratamiento de residuos.

Para finalizar el primer tema del seminario relacionado con la termocombustión es necesario hablar acerca de la normativa que se enfoca en el estudio de todo lo relacionado a la combustión, desde el cálculo experimental del poder calorífico de un compuesto hasta el cálculo del contenido de azufre en un combustible, es preciso

aclarar que las normativas que se observan a continuación provienen de la norma europea, pero a lo largo del seminario se estudiarán las demás normas como la ASTM, norma internacional o la norma técnica colombiana NTC. Entre las diversas normas se tienen:

- UNE-EN 14582: Contenido de azufre Halógenos (flúor, cloro, bromo, iodo): Se realiza una espectrometría de emisión atómica, volumétrica o cromatografía iónica.
- UNE-EN 15195: Determinación del retardo de ignición y el número de cetano derivado (DCN) en destilados medios.
- La norma ASTM hace mención del número de cetano derivado para la combustión de DIESEL en una cámara de volumen constante con la siguiente ecuación²¹:
- UNE-EN 16715: Determinación del número de cetano derivado en destilados medios.
- UNE-EN ISO 1716: Determinación del calor bruto de combustión (valor calorífico).
- UNE-EN 32010: Contenido de azufre en los carbones, en lignitos y coque.
- UNE-EN 32112: Contenido de carbono e hidrógeno en carbón duro, carbón marrón, lignito y coque

Otro tipo de normativa se centra en la legislación de la contaminación del aire siendo de gran importancia para el tratamiento de los gases de combustión, puesto que existen unos límites permisibles de emisiones de compuestos carbonosos, sulfurosos y nitrosos. Lo primero es realizar una clasificación de los contaminantes donde se tienen do grandes grupos:

²¹ ASTM RR. D02-RR-1602, revision of the ASTM D6890 equation and DCN precision, 2006

1. Tipo de polución²²

- Primaria: material particulado, NO, CO, CO₂, SO₂, hidrocarburos no quemados
- Secundaria: SO₃, NO₂

2. Grado de peligrosidad

- Alta: CO, hidrocarburos no quemados
- Media: NO₂, SO₃
- Baja: NO, SO₂

En cuanto a la normativa nacional se estudia el decreto 948 de 1995 que plantea las actividades especialmente controladas relacionadas a la combustión (artículo 4°)²³

- Quemadas de bosque natural y vegetación protectora y demás quemadas abiertas prohibidas.
- La quema de combustibles fósiles utilizados por el parque automotor.
- Quema industrial o comercial de los combustibles fósiles.
- Las quemadas abiertas controladas en zonas rurales.
- Incineración o quema residual de desechos peligrosos.
- Actividades industriales que generen, usen o emitan sustancias sujetas a los controles del protocolo de Montreal, aprobado en la ley 29 de 1992.
- Canteras y plantas trituradoras de materiales de construcción.

Por otro lado, se mencionan las diferentes resoluciones propuestas por el Ministerio de Medio Ambiente de Colombia:

- Resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017 capítulo 1, artículo 2, presenta los niveles máximos de contaminantes permisibles en Colombia:

²² EL-MAHALLAWY, Fawzy y EL-DIN HABIK, Saad. Fundamentals and technology of combustion. "legislation of air pollution". Página [59-62]. El server science ltd. Kidlington, Oxford (UK). 2002. ISBN: 0-08-044106-8

²³ Ministerio del medio ambiente colombiano. Decreto 948 de 1995

- Resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017 capítulo 1, artículo 2, Niveles máximos de contaminantes tóxicos en el aire:
- Resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017 capítulo 1, artículo 2 Niveles máximos de contaminantes permisibles para el 2030.

3.5. SESIÓN 5

En esta sesión se da inicio al estudio de la combustión sólida, en primer lugar, se habla de las propiedades físicas y químicas de los combustibles sólidos, se mencionan algunos tipos de combustibles y la normativa nacional e internacional que regulan el estudio de estos, por último, se discute acerca del tratamiento térmico necesario para la combustión de sólidos.

Para dar desarrollo a la primera parte de la sesión se mencionan las propiedades físicas con las que se suele trabajar en el área de los procesos de combustión, entre ellas se tiene, distribución de tamaño, forma y porosidad. Luego de aclaradas las discusiones que surgieron en el subtema anterior, la sesión pasa a estudiar las propiedades químicas de los combustibles sólidos, teniendo en cuenta que la estructura y la composición molecular de los combustibles carbónicos pueden variar en gran medida, la más grande cantidad es orgánica y se colocan en cadenas de hidrocarburos donde, aparte del carbono, hidrógeno, oxígeno y boro, se pueden encontrar pequeñas cantidades de azufre, hierro, calcio, aluminio, zinc, entre otros. Hay análisis relativamente sencillos para determinar la fracción base y la composición atómica, que pueden ser aplicadas a casi todos los combustibles sólidos carbonosos, uno de ellos es el análisis próximo que incluye la humedad, volatilidad y carbono fijo.

Otra manera de caracterizar un combustible es el análisis último, siendo usualmente utilizado en los laboratorios de caracterización, está dado por fracciones másicas

de elementos en estado carbónico sólido, los elementos más encontrados son carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre; la ceniza, que es la mezcla más común de óxidos de hierro, zinc, potasio, sodio, cloro, aluminio, calcio, magnesio y silicio, los resultados de este tipo de análisis se expresan en base seca, este análisis puede variar dependiendo de la zona de extracción del combustible.

En la segunda parte de la sesión se estudian los combustibles sólidos naturales y artificiales, en los primeros se encuentra el carbón, las maderas y los residuos de origen vegetal, en el caso de los combustibles artificiales el principal combustible es el coque, además se utilizan los aglomerados, briquetas y carbón vegetal. La norma para los análisis de combustibles sólidos en Colombia es la NTC 6241, esta norma es una adopción idéntica de la norma ASTM D7582-15, estos métodos de ensayo instrumental incluyen la determinación de humedad, materia volátil y ceniza, el cálculo del carbono fijo en el análisis de muestras de carbón y de coque preparadas según la NTC 4898 y la NTC 3266.

Un aspecto importante para añadir a esta sesión en lo concerniente al estudio de los combustibles sólidos, son las normas que se deben utilizar para la caracterización de cada materia prima, cabe resaltar que es importante del uso de la Norma Técnica Colombiana, sin embargo, para ciertos materiales no se tiene una norma nacional definida por lo que es necesario hacer uso de la norma internacional ASTM.

La norma técnica colombiana que habla de las briquetas es la NTC 2060, que tiene por objeto establecer los requisitos que deben cumplir los ensayos a los cuales deben someterse las briquetas combustibles para uso doméstico.

En cuanto a la normativa internacional para el tratamiento del carbón vegetal se tiene la norma ASTM D3172-13, además, por parte del ministerio del medio ambiente y desarrollo sostenible se tiene la resolución número 0753 por la cual se establecen los lineamientos generales para la obtención y movilización de carbón vegetal con fines comerciales.

Para finalizar con la sesión se habla del tratamiento térmico, proceso mediante el cual se cambian las propiedades de algunos combustibles, esto ocurre en tres pasos²⁴, Secado, pirólisis o devolatilización y gasificación.

3.6. SESIÓN 6

Inicialmente el relator realizó una introducción a todo lo relacionado con la biomasa, siendo complementado por los demás participantes a la sesión para tener unas definiciones claras antes de iniciar con las propiedades y la termodinámica involucrada al proceso de combustión y tratamientos térmicos de la biomasa.

Se trabajó la temática de la siguiente manera:

Se definió la biomasa como “los materiales orgánicos no fosilizados y biodegradables procedentes de plantas, animales y microorganismos, en los cuales se incluyen subproductos y desechos de la agricultura, la silvicultura y la industria”²⁵, luego esta definición es llevada al contexto local donde se presentan diferentes ejemplos de biomasa por parte de los participantes, donde se destacó lo relacionado al proceso de fabricación de la panela y el bagazo de caña resultante, así como los desechos de la ganadería y la industria maderera; también se habló de la importancia de los residuos sólidos municipales para la obtención de abonos y combustibles gaseosos para la generación de energía.

A continuación, se expone acerca de la formación de la biomasa enfatizando en el proceso de fotosíntesis realizado por las plantas, definido como la conversión de

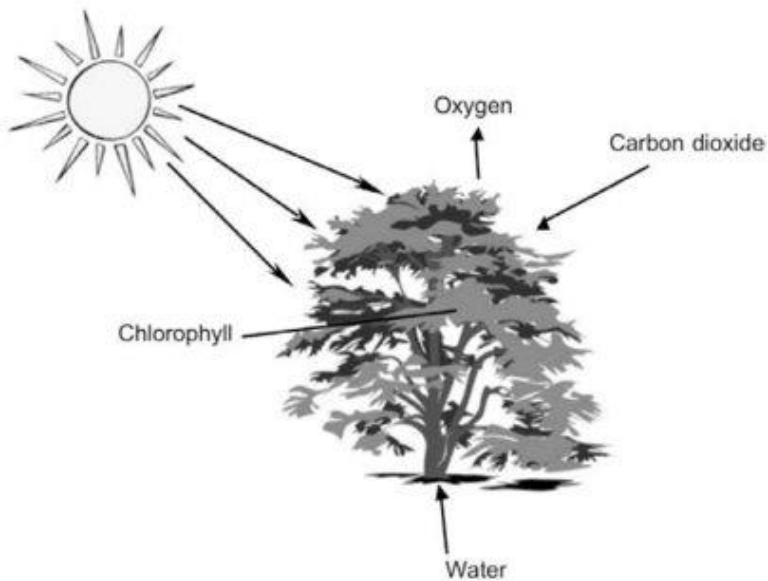
²⁴ DE SOUZA-SANTOS, Marcio. *Solid fuels combustion and gasification “modelling, simulation, and equipment operation”*. Páginas [24-35]. Editorial Marcel Dekker, Inc. 2005. ISBN 0-8247-0971-3.

²⁵ United Nations Framework Convention on Climate Change 2005.

CO₂ atmosférico en carbohidratos por la energía solar en presencia de clorofila y agua liberando oxígeno en el proceso²⁶.

Figura 6.

Figura 4. Proceso de fotosíntesis



Fuente: Gasificación y pirólisis de biomasa teoría y diseño práctico. Capítulo 2 “características de la biomasa”. Página 28.

En la siguiente parte de la sesión se complementó acerca de los tipos de biomasa que se pueden encontrar, haciendo énfasis en los más utilizados para la obtención de combustibles; en primera medida se habla de la biomasa lignocelulósica, la cual se refiere a la materia seca vegetal, siendo la más abundante y con mayor disponibilidad en la tierra y mayormente utilizada para la producción de bioetanol, un biocombustible conseguido a partir de la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas, este tipo de combustibles también pueden ser obtenidos de cultivos y hortalizas como la remolacha, la cual presenta un gran porcentaje de azúcares. Otros subtemas importantes a tratar en esta parte

²⁶ Gasificación y pirólisis de biomasa teoría y diseño práctico. Capítulo 2 “características de la biomasa”. Página 28.

son las propiedades físicas de la biomasa, ya que pueden modificar el comportamiento de este tipo de combustibles en los procesos de pirólisis y gasificación, la propiedad más importante a tener en cuenta es la densidad, puesto que cambia según la porosidad y el tamaño del material, puede ser dividida en: *Densidad verdadera o real*, que se define como el peso por unidad de volumen ocupado por el sólido de biomasa, la *densidad aparente* que incluye el volumen de los poros y cavidades que posee la muestra, la *densidad a granel* que se basa en el espacio total ocupado por un grupo de partículas de biomasa y la *densidad de crecimiento* que indica cuanta biomasa está disponible por unidad de área de tierra.

A continuación se procedió con el análisis de las propiedades termodinámicas, a sabiendas que la gasificación es un proceso de conversión termoquímica, por lo tanto, este tipo de propiedades tiene una fuerte influencia en el proceso, ya que se debe conocer acerca de la conductividad térmica, el calor específico y las diferentes temperaturas presentes en la combustión de la biomasa; se abordó el tema de la conductividad, la cual se define como “la capacidad de conducción de calor a lo largo y ancho de las partículas de biomasa”²⁷, esta propiedad varía según la densidad y la humedad del combustible. El calor específico fue definido como “la propiedad que indica la capacidad de calentamiento de una sustancia”²⁸.

Posteriormente se analizó la tabla 10 que contiene la temperatura de ignición de diferentes materiales, del análisis se concluyó que en las biomásas dicha temperatura es menor que la de los carbones pasando por la paja de trigo y la madera hasta la antracita mencionada en sesiones pasadas.

²⁷ BASU, Prabir. Gasificación y pirólisis de biomasa, teoría y diseño práctico

²⁸ Ibid.

Tabla 5 Temperaturas de ignición de algunos combustibles sólidos.

Combustible	temperatura de ignición	material volátil en combustible (seco libre de ceniza%)	Fuente
Paja de trigo	220	72	Grotkjær et al,2003
madera de álamo	235	75	Grotkjær et al., 2003
Eucalipto	285	64	Grotkjær et al., 2003
Etanol	425		
Carbón con altos volátiles	670	34,7	Mühlen and Sowa, 1995
Carbón con medios volátiles	795	20,7	Mühlen and Sowa, 1995
Antracita	930	7,3	Mühlen and Sowa, 1995

Fuente: Editado por autores de: Gasificación y pirólisis de biomasa teoría y diseño práctico. Capítulo 2 “características de la biomasa”.

Para finalizar la sesión se mencionaron las velocidades asociadas con la combustión de biocombustibles, donde su estudio se centra en el tiempo total para el agotamiento de la partícula t_{bo} , el tiempo para calentamiento y secado t_d , el tiempo para la pirólisis de partículas sólidas t_p y el tiempo para la oxidación del char t_{co} , presentes en el tratamiento térmico de una muestra de combustible²⁹.

²⁹ TILLMAN, D.A. 1978. Wood as an Energy Resource. Academic Press, New York

3.7. SESIÓN 7

Se mencionan algunos datos referentes a la industria carbonera, tomados del documento *EL Carbón Colombiano*, escrito por el ministerio de minas y energía de la república de Colombia, en primer lugar, se habla que el país colombiano es el que cuenta con más reservas de carbón en América Latina, con recursos potenciales de 16992 millones de toneladas, siendo el sexto exportador de carbón en el mundo, con una participación equivalente a 50 Mt anuales. Con la tasa de explotación actual, las reservas medidas de carbón en Colombia aseguran más de 120 años de producción, suficientes para participar a gran escala en el mercado internacional y abastecer la demanda interna³⁰.

El carbón se compone principalmente de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, aunque en general la bibliografía y la industria se refiere al carbón como un solo material, en realidad hay muchos tipos de carbones con características distintas entre sí, tanto como sus propiedades más básicas (poder calorífico, humedad, cenizas, volátiles) como por su reactividad (de menor a mayor, como regla general: antracita, hulla, lignito, etc.). Una de las clasificaciones más aceptadas para el carbón corresponde a la *American Society for Testing and Materials* (ASTMD 388-777), la cual se muestra en la tabla 11.

³⁰ Ministerio de minas y energía. El carbón colombiano. República de Colombia,

Tabla 6 Clasificación del carbón

Tipo	Carbono Fijo (%)	Material Volátil (%)	Contenido Humedad (%)	Poder Calorífico (Btu/lb)	Poder Calorífico (MJ/Kg)	Poder Calorífico Kcal/Kg
Antracita	86 - 98	1	< 15	> 14.000	> 32.6	> 7.780
Bituminoso	45 - 86	32	15 - 20	10.500-14.000	24.5 - 32.6	5.800-7.780
Subbituminoso	35 - 45	50	20 - 30	7.800 - 10.500	18.2 - 24.5	4.300- 7.780
Lignito y Turba	25 - 35	96	> 30	4.000 - 7.800	9.3 – 18.2	2.200 – 4.300

Fuente: American society for Testing and Materials (ASTMD 388-777)

Para finalizar la sesión, se menciona la calidad del carbón colombiano, de acuerdo con los estudios de caracterización adelantados en las zonas carboníferas del país (INGEOMINAS, 2004) en la cordillera oriental se encuentran los mejores carbones bituminosos para uso térmico y metalúrgico junto a carbones antracíticos, tanto para el consumo interno como para exportación; en la cordillera occidental se hallan carbones bituminosos y subbituminosos en Córdoba, norte de Antioquia, Valle del Cauca y Cauca; en la cordillera central existen carbones bituminosos en las zonas carboníferas de Antioquia, Caldas, Huila y Tolima³¹.

3.8. SESIÓN 8

Inicialmente el relator menciona por qué el carbón y los combustibles sólidos que tienen relación con el petróleo se estudian en diferente sesión, el contraste se halla en el mecanismo de formación, las propiedades fisicoquímicas y el comportamiento en todo el proceso de combustión; la importancia de estudiar este tipo de

³¹ Ministerio de minas y energía. República de Colombia, El carbón colombiano

combustibles radica en su gran utilización en muchos países principalmente del Medio Oriente cuando el precio del petróleo es relativamente alto.

Para continuar con la sesión se presentan los tipos de combustibles que se van a tratar, en primera medida se habla del esquisto bituminoso con una disponibilidad de 19400 billones de Btu (20000 EJ) aproximadamente a nivel mundial, donde sus mayores reservas se encuentran en estados unidos con 13460 EJ y Brasil, el cual cuenta con 4900 EJ aproximadamente; otro material a tratar son las arenas bituminosas compuestas por tierra de diatomeas empapadas en petróleo y aceites crudos superpesados, su disponibilidad a nivel mundial es aproximadamente 6400 EJ, las mayores reservas disponibles y que son explotadas en la actualidad se encuentran en Canadá con un aproximado de 3800 EJ³².

La utilización de los sólidos derivados del petróleo en sistemas de combustión es principalmente en la industria energética, algunos países que manejan el esquisto bituminoso para producir energía son Estonia, que actualmente produce alrededor de 5000 MW para uso propio y exportación a otros países del medio oriente, Israel y Jordania lo extraen en pequeñas cantidades; En América se extrae principalmente tierra de diatomeas en algunas minas de Canadá y california EE.UU., en el 2010 se dio inicio a proyectos extractivos de esquistos en Argentina para obtener alrededor de 1500000 toneladas /año³³. El manejo y la extracción de este tipo de combustibles no se popularizaron debido a las condiciones ambientales actuales, la extracción del esquisto bituminoso conlleva al uso desmedido de agua y gas, el cual es inyectado en las profundidades debajo de los pozos petroleros logrando la suficiente presión para que el combustible se separe de la roca y pueda ser extraído con mayor facilidad, por otro lado, la extracción de arenas bituminosas es aún más perjudicial para el medio ambiente, ya que son extraídas por la llamada minería a

³² TILLMAN, David A. *The combustion of solid fuels and wastes*. Editorial academic press, Inc. 1991. ISBN 0-12-691255-6.

³³ <http://proyectopragmalia.blogspot.com/2010/05/278-extraccion-de-equistos-bituminosos.html>

cielo abierto, gracias a estas condiciones de extracción las agencias ambientales cada día son más prohibitivas en cuanto al uso de esta clase de compuestos.

Para hablar acerca de las propiedades físicas y químicas de este tipo de compuestos es necesario entender la manera en que se forman, ya que en ello se encuentra la diferencia con otras clases de combustibles como el carbón; el esquisto bituminoso se produjo en lagos en climas subtropicales, las algas presentes en estos acuíferos fueron cubiertas por lodos y arenas compuestas de hierro hace miles de años; la formación de las arenas bituminosas se presenta en 2 teorías, la primera suposición dice que se formaron debido a que la presión superficial fue insuficiente para lograr el craqueo térmico, como consecuencia toda la fracción orgánica presente es de naturaleza densa y viscosa, la segunda teoría siendo la más utilizada afirma que este compuesto se originó gracias a la migración de petróleo hacia depósitos de arena, con el pasar del tiempo se evaporó la mayor parte del crudo liviano dejando la fracción más pesada y viscosa; por otra parte la tierra de diatomeas se compone de algas unicelulares enterradas bajo el lodo hace millones de años transformándose en aceite de diatomeas bituminosas.

La sesión continúa con el estudio de las propiedades físicas de los sólidos relacionados con el petróleo, en primer lugar, se estudia el esquisto bituminoso cuyas cualidades físicas las conforman la gravedad específica (SG), que se ve directamente afectada por el grado, el cual es de gran importancia para el estudio de este tipo de combustibles, ya que denota la cantidad de reactivo que puede ser aprovechado, siendo el poder calorífico directamente proporcional a este, con un rango de valores que va desde 10.5 gal/ton→840 Btu/lb hasta 75 gal/ton→6700 Btu/lb, la segunda propiedad es la porosidad que difiere en gran medida de los fósiles como el carbón y el lignito, puesto que en el esquisto bituminoso se presenta porosidad entre partículas (interporosidad) y no intraporosidad, dicha propiedad

aumenta cuando se aplica temperatura al combustible³⁴. El esquisto bituminoso se compone principalmente de materia inerte con valores entre 70-95 % en peso, cuyo material combustible principal es el querógeno, además contiene algunos elementos como piritas, dolomitas, calcitas y algunas trazas de hierro.

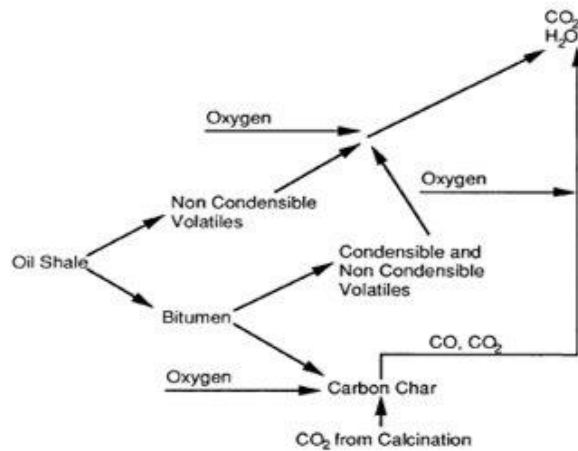
Después se habla de algunas características de la tierra de diatomeas, donde se menciona que además de las propiedades vistas anteriormente, es importante estudiar el contenido de humedad, betún y mineral, ya que sus porcentajes son relativamente altos, alrededor de 17% de betún y 83% de minerales, su densidad aparente es de 2 g/cm³ y presenta entre 35% y 40% de porosidad, la fracción orgánica se compone en gran parte de asfaltenos, resinas, aceites y carbono fijo, cabe resaltar que como combustibles son extremadamente altos en azufre con un bajo poder calorífico³⁵.

El proceso de incineración de los combustibles sólidos relacionados con el petróleo difiere de la combustión de biocombustibles y el carbón, puesto que más del 50 % en peso son cenizas y todo el material es volátil, la secuencia de la combustión inicia cuando el querógeno al calentarse se descompone en betún y productos gaseosos no condensables como el metano y el monóxido de carbono, posteriormente el betún forma una película delgada alrededor de las partículas inertes dentro del quemador y se obtienen residuos de carbono de los cuales el 20 % se convierte en carbón, los volátiles se oxidan en combustión homogénea en fase gaseosa y por último las partículas minerales se descomponen proporcionando el potencial para reacciones de gas-sólido secundarias.

³⁴ TILLMAN, David A. *The combustion of solid fuels and wastes*. Editorial academic press, Inc. 1991. ISBN 0-12-691255-6.

³⁵ TILLMAN, David A. *The combustion of solid fuels and wastes*. Editorial academic press, Inc. 1991. ISBN 0-12-691255-6.

Figura 5. Proceso de combustión del *oil shale* (esquisto bituminoso)



Fuente: TILLMAN, David A. The combustion of solid fuels and wastes. Editorial *academic press, Inc.* 1991. ISBN 0-12-691255-6.

Para culminar con el debate acerca del esquisto y las arenas bituminosas, el relator menciona un proyecto de ley del 2018 propuesto en el ministerio de medio ambiente, vivienda y desarrollo rural que habla acerca de la prohibición de explotar yacimientos no convencionales de hidrocarburos en todo el territorio colombiano.

En la segunda parte de la sesión se estudia la combustión de desechos sólidos municipales MMSW, los combustibles derivados de la basura RDF y los desechos médicos; los desechos contienen una amplia variedad de combustibles sólidos heterogéneos que se queman con características distintivas, los cuales se dividen en MMSW, desechos médicos y residuos peligrosos, los MMSW se componen de papel, cartón, plásticos, desechos de jardín, productos de madera, cuero, caucho, vidrio, metales y materias rocosas, los desechos médicos se producen en los hospitales donde comúnmente se hallan objetos punzantes como agujas o cuchillas, por último los residuos que representan peligro potencial son los que están cargados de bifenilo policlorado y dioxinas, las cuales son extremadamente cancerígenas, también se encuentran pesticidas, herbicidas y residuos en fábricas de pintura. El

problema principal que se encuentra al estudiar este tipo de elementos es la producción extremadamente rápida, ya que es alrededor de 5 libras por persona cada día, las tecnologías disponibles para la gestión de MMSW incluyen la minimización o reutilización de residuos, el reciclaje, los vertederos y la incineración, en cuanto a las tecnologías de incineración se incluye la quema en masa en instalaciones ensambladas en fábricas y hornos rotatorios, en algunos lugares los residuos derivados de la basura se combinan con combustibles fósiles y biomasa en calderas de carbón y tecnologías de lecho fluidizado.

A continuación, se estudian las propiedades físicas y químicas de los residuos sólidos municipales, aunque estas características varían dependiendo el lugar donde se realice la caracterización, aun así, los componentes orgánicos como residuos de comida integran la mayor parte, entre 40% y 80% dependiendo la zona a estudiar. Los principales elementos químicos que componen los RDF son el carbón, hidrógeno, oxígeno y una gran cantidad de humedad, siendo el plástico, el caucho y los residuos de la industria maderera y textil los más usados en las plantas de combustión gracias a su alto poder calorífico y la necesidad de realizar el tratamiento adecuado para eliminar todo tipo de sustancias peligrosas como las dioxinas presentes en el caucho; El proceso de combustión de los residuos sólidos inicia cuando ingresan al reactor y se da lugar al secado, luego se calienta a la temperatura requerida para el proceso dando comienzo a la pirólisis donde se producen volátiles y carbón, posteriormente se presenta la reacción gas-sólido común en este proceso y por último se da lugar a la oxidación del carbón, la cual depende de la difusión del oxígeno en la superficie de la partícula, además se ve influenciada por la presencia de compuestos inorgánicos como tintas para impresoras y colorantes artificiales, cabe aclarar que para una completa oxidación del carbono se requieren tiempos extendidos de calentamiento.

Para finalizar la sesión, el relator habla acerca de la normativa para la gestión de residuos sólidos municipales donde se da a conocer la resolución 058 de 2002 del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo rural por la cual se establecen normas

y límites máximos permisibles de emisiones para incineradores y hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos, además se habla del decreto número 1713 de 2002 que presenta una serie de leyes en relación con la prestación del servicio público de aseo y la gestión integral de residuos sólidos.

3.9. SESIÓN 9

El subtema principal de la sesión número 9 es la fluidización, los tipos de tecnologías que se basan en este sistema, ventajas, flexibilidad en cuanto a combustibles, fuerzas de interacción de las partículas y ciclos de potencia.

La fluidización se refiere al “proceso mediante el cual las partículas se mantienen suspendidas debido al paso de un fluido de abajo hacia arriba a través de la cámara de combustión, dicho flujo hace que las partículas tiendan a comportarse como un sólido”³⁶; el lecho fluidizado depende del tipo de fluidización que se esté realizando y la aplicación requerida, en general las partes de un sistema de combustión de lecho fluidizado son: columna de fluidización, sección uniformadora, distribuidor, sistema de suministro de fluido y algunos sistemas dedicados a la seguridad como medidores de presión y temperatura.

Otro subtema importante para tratar son los regímenes de fluidización, los cuales se ven afectados por la variación en algunos parámetros como las propiedades y la velocidad del fluido, además de las características de la partícula de combustible, todos estos cambios son los que crean diferentes regímenes de fluidización tales como; lecho fijo, fluidización homogénea, burbujeante y turbulenta ³⁷:

³⁶ VÁZQUEZ, Juan Carlos. Diseño de un reactor de lecho fluidizado para el estudio de conversión termoquímica de biomasa 2011, Tesis de grado. Escuela superior de ingenieros. Universidad de Sevilla.

³⁷ Ibid. c.3

El concepto de combustión en lechos fluidizados es originario de la patente Odell, el éxito real se produjo en la década de los 80s por ingenieros de calderas. Para lograr altas eficiencias usando carbón combustible y caliza, fue crucial tratar con finas partículas de *Char* y caliza; al principio se intentó quemar las partículas de *Char* a la entrada en otros lechos burbujeantes llamados células de combustión de carbono (CBC), pero su eficacia fue baja, después se encontró que la recirculación de ceniza fina sería más efectiva como se confirmó con una planta demostrativa³⁸.

La ventaja principal en este tipo de tecnologías es la reducción de gases contaminantes, los estudios de hoy en día conducen a mejorar las especificaciones de caldera, la flexibilidad en cuanto a los combustibles y la reducción de emisiones; en primer lugar, la operación en lecho fluidizado permite uno o dos calderines y pueden quemar madera húmeda y otros combustibles con poderes caloríficos entre 2800-3500 Btu/lb a presiones de vapor que rondan los 2400 PSI y temperaturas de operación entre 820-870 °C. En segundo lugar, se habla de la amplia variedad de combustibles convencionales y residuos combustibles con alta humedad como los lodos de reciclado en la fabricación de papel, combustibles derivados de llantas de neumáticos, petróleo, gas natural, carbón, biomasa y residuos agrícolas. Teniendo en cuenta la operación de las calderas de lecho fluidizado, es posible utilizar un absorbente (cal, dolomía) para eliminar el SO₂ presente en los gases de combustión en un 90%; la cantidad de NO_x también se ve fuertemente reducida con respecto a otros tipos de combustión, ya que la formación de esta molécula se da aproximadamente a 1482 °C y la temperatura en el caso del lecho fluidizado es inferior³⁹.

Existen otras ventajas donde se resalta la capacidad de quemar reactivos de bajo poder calorífico debido al rápido calentamiento de las partículas gracias a la gran masa de combustible caliente, además el tiempo de residencia del combustible en

³⁸ FERNÁNDEZ DÍEZ, P. 17. Calderas de Lecho Fluidificado. In Centrales térmicas; Cantabria, U. de, Ed.: Santander, España, 2010.

³⁹ Ibid. c.17

el lecho es extenso. Una gran cualidad de estas tecnologías es la facultad de evitar el punto de fusión de la ceniza, con ello se previenen corrosiones y desgastes en el sistema de quemado.

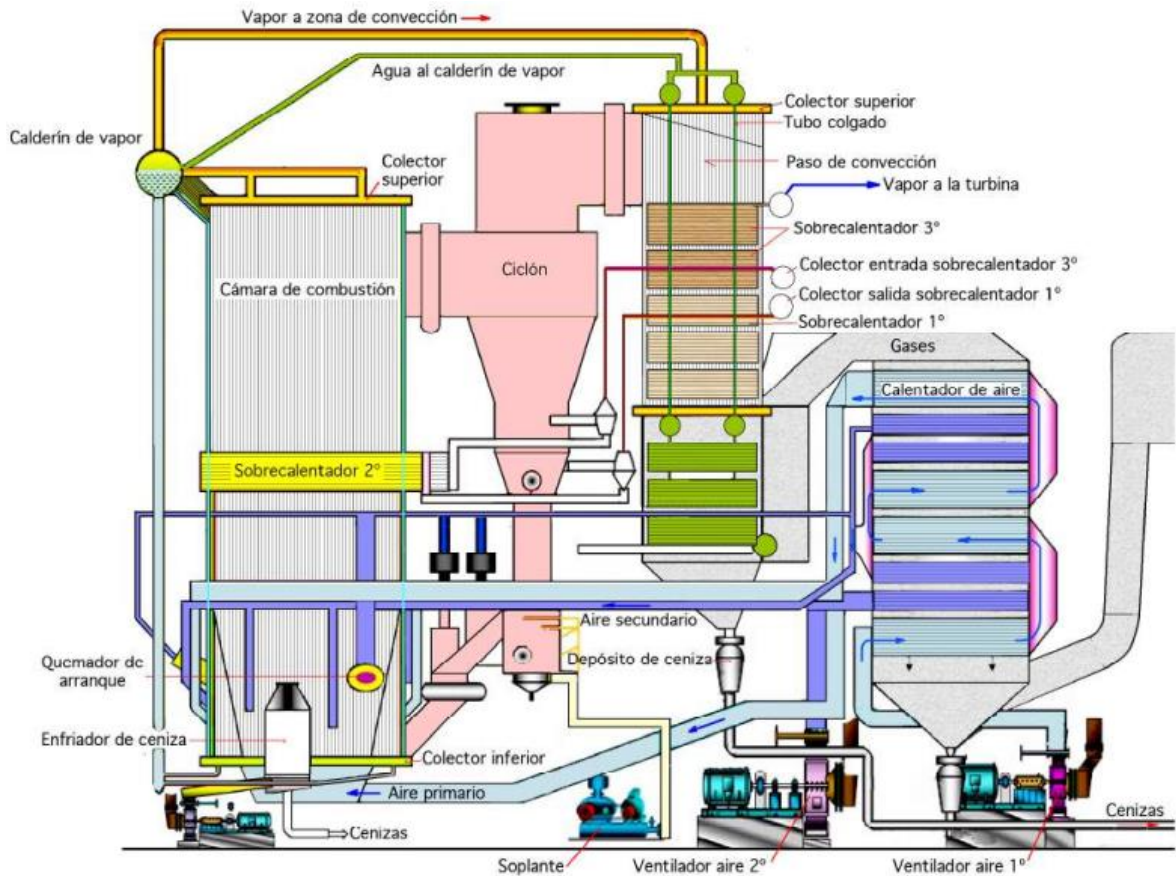
Existe gran variedad de quemadores para calderas de lecho fluidizado, pueden ser atmosféricos o presurizados, entre los primeros se tienen las calderas de lecho fluidizado burbujeante y las de lecho fluidizado circulante. El proceso de combustión en lecho fluidizado presurizado (PCFB) sucede de la misma manera que en el caso del lecho atmosférico, aplican los diseños de lecho de tipo burbujeante y circulante; debido a las elevadas presiones (174 PSI) y densidad de aire en este proceso de combustión, se pueden usar lechos más profundos y mayores velocidades. La profundidad del lecho presurizado es dos veces mayor a la versión atmosférica, en su introducción a los ciclos combinados, logró eficiencia de planta del 40 % con un consumo de 8500 Btu/KWh mejorando los 9600 Btu/KWh de los lechos atmosféricos⁴⁰.

Una aplicación importante de los lechos presurizados son los ciclos de potencia, donde se habla del ciclo turboalimentado y el ciclo combinado, el primero se desarrolló como paso intermedio al ciclo combinado, el lado de los humos se diseñó para mantener las condiciones del gas, donde el ciclo de vapor soporta toda la producción eléctrica con tecnologías convencionales. En el caso del ciclo combinado no existe una superficie intercambiadora convectiva para enfriar los humos calientes presurizados, estos van directo a la turbina de gas a presiones de 1.2-1.6 MPa con temperaturas de 843 °C; el reparto de potencia útil entre los ciclos de vapor y de gas es con el alternador conectado a la turbina donde el 80% de la producción eléctrica se hace en la turbina de vapor y el restante es producido por la turbina de gas⁴¹.

Figura 6. Proceso de combustión en lecho fluidizado presurizado (PCFB)

⁴⁰ FERNÁNDEZ DÍEZ, P. 17. Calderas de Lecho Fluidificado. In Centrales térmicas; Cantabria, U. de, Ed.: Santander, España, 2010.

⁴¹Ibid. c.30



Fuente: FERNÁNDEZ DÍEZ, P. 30. Combustión En Lecho Fluido Presurizado. In Centrales térmicas; Cantabria, U. de, Ed. Santander, España, 2000.

3.10. SESIÓN 10

En esta sesión se continúa hablando acerca de las tecnologías asociadas a la combustión de sólidos, se estudian otros tipos de quemadores para carbón pulverizado y algunos aspectos relevantes del proceso de combustión de carbón.

A lo largo de la historia se han adelantado estudios con el fin de quemar combustibles sólidos, biomasa y desechos municipales para cumplir con la normativa nacional e internacional de emisiones contaminantes, estas tecnologías

de incineración incluyen sistemas de quemado en lecho o parrillas donde el combustible se coloca en el reactor o en la cámara, estos equipos dominan la combustión de sólidos con tecnologías como incineradores modulares y quemadores masivos, esparcidos de combustibles derivados de los residuos y hornos rotatorios de desechos. Los combustibles sólidos pueden ser pulverizados en finas partículas y quemados en suspensión; los quemadores que utilizan el método de suspensión incluyen sistemas pulverizados convencionales operando a presión negativa, las unidades de quemado en suspensión avanzadas incluyen quemadores de escoria de carbón, también encuentran su uso común en la combustión de biomasa seca y pulverizada incluyendo residuos de lijado producto de la manufactura de muebles y de determinados residuos agrícolas.

Generalmente, todas las tecnologías de combustión comparten ciertas consideraciones técnicas significativas. Cuando el material está siendo quemado dentro de una caldera para generar vapor, el proceso común de diagrama de flujo involucra los siguientes elementos⁴²:

- Preparación del combustible.
- Sistemas de combustión y recuperación de calor.
- Sistema de postcombustión y control de emisiones aéreas.

Continuando con la sesión se habla de algunos equipos utilizados, en primer lugar, se estudia el quemador de parrillas, siendo el más antiguo método para la combustión de sólidos, su cualidad más importante es la poca preparación del combustible, ofreciendo la más amplia gama en la selección de combustibles y condiciones de combustión; los sistemas de combustión en parrillas son

⁴² TILLMAN, David A. *The combustion of solid fuels and wastes*. Editorial academic press, Inc. 1991. ISBN 0-12-691255-6

comúnmente usados en calderas industriales para la generación de vapor con o sin generación del ciclo Rankine⁴³.

Otras tecnologías importantes son los sistemas de quemado con combustible sólido pulverizado, este método es el más común para el quemado de carbón y son ampliamente usados alrededor del mundo en lo referente a la generación de potencia, específicamente en calderas de pared o tangenciales. En estos sistemas se tienen equipos complejos para el tratamiento de carbón debido al triturado del combustible a un menor tamaño de partícula que otros equipos convencionales. Las calderas del tipo carbón pulverizado pueden tener eficiencias térmicas mayores al 88% con emisiones de polvo menores a 30 mg/Nm², las emisiones de óxidos de azufre son menores a 100 mg/Nm² y las de óxidos de nitrógeno menores a 200 mg/Nm²⁴⁴.

En la actualidad, el estudio de nuevos sistemas de combustión es de gran importancia para garantizar el cumplimiento de normativas que regulan las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, en esta parte se estudian los sistemas de quemado ciclón y hornos rotatorios, los cuales han cobrado gran auge en el tratamiento de desechos municipales e industriales; los sistemas de combustión de ciclón se basan en el uso de la fuerza centrífuga para facilitar el quemado de partículas de combustible trituradas, puesto que el aire en espiral arrastra las partículas hacia el exterior lo que crea una acumulación en la pared exterior de la cámara, resultando en altas temperaturas en los muros.

Otra tecnología frecuentemente utilizada en la actualidad para el tratamiento de residuos municipales, industriales, médicos y peligrosos son los hornos rotatorios, los cuales surgen como una alternativa a los equipos de quemado por rejillas para

⁴³ CHUNGEN & ROSENDAHL, LASSE & KÆR, Søren. (2008). Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34. 10.1016/j.pecs.2008.05.002.

⁴⁴ Pulverized coal fired steam boilers. Romiter group. Add: No. 1503. High-Tech Zone, Zhonghua Road, Wenfeng District, Anyang City, Henan Province. En línea [<https://www.steam-generator.com/pulverized-coal-fired-steam-boilers/>] Consultado: 01/03/2020

el quemado en lecho de sólidos combustibles; para determinadas aplicaciones tienen distintos procesos y ventajas de quemado⁴⁵.

Después de estudiar algunas tecnologías para la combustión de desechos pulverizados, la sesión se adentra en el campo del carbón pulverizado, este método resulta adecuado para la mayoría de los tipos de carbones, la versatilidad de este sistema lo ha convertido en el método predominante de combustión de carbón a nivel mundial, en particular para la generación de vapor en plantas termoeléctricas. El tipo de quemador más común para carbón pulverizado es el quemador circular, el cual consiste en un tubo de alimentación de combustible en el centro y uno o varios registros de aire anular; el carbón pulverizado se introduce por el núcleo y el aire se introduce por los registros anulares, variando el grado de remolineo y la velocidad relativa se puede lograr una llama estable⁴⁶. Los quemadores constituyen elementos centrales de diseño de sistemas de combustión, entre los principios fundamentales se tiene la preparación del combustible, la distribución de la mezcla de aire-combustible, el diseño del hogar y el control de la combustión.

Inicialmente hasta 1970 el desarrollo de sistemas de combustión se dirigía a lograr diseños de calderas compactas y baratas, el objetivo principal de estos equipos era conseguir un máximo aporte de calor por unidad de volumen, lo que implicaba pequeños volúmenes de hogar con quemadores de mezcla rápida y temperatura de llama muy alta, lo que implicaba una alta emisión de NOx⁴⁷. Entre los tipos de quemadores más comunes se pueden encontrar: el quemador convencional circular, alveolar y quemador tipo S.

⁴⁵ TILLMAN, David A. *The combustion of solid fuels and wastes*. Editorial academic press, Inc. 1991. ISBN 0-12-691255-6

⁴⁶ Capítulo 16 Combustion. *Mechanical Engineers' Handbook Energy and Power*, Third Edit.; Kutz, M., Ed.; Jonh Wiley & sons Inc: Hooboken, New Jersey, 2006

⁴⁷ Fernández Díez, P. 14. Quemadores de carbón Pulverizado. In *Centrales térmicas*; Cantabria, U. de, Ed.; <http://es.pfernandezdiez.es/?pageID=11>: Santander, España, 2000.

Para finalizar la sesión, se observan algunos quemadores creados a partir de la necesidad de reducir las emisiones de NO_x, inicialmente las emisiones de óxidos nitrosos en sistemas convencionales se resumen en un margen de 0.8-1.6 lb/10⁶ Btu; los sistemas que se utilizan en la actualidad para la combustión de carbón pulverizado son capaces de reducir el margen anterior hasta los 0.2-0.7 lb/10⁶ Btu. El proceso más efectivo para reducir las emisiones de NO_x consiste en disminuir la disponibilidad de oxígeno (aire) durante la etapa de desprendimiento de materia volátil, posteriormente se añade aire para completar las reacciones sobre el subcoque y mantener una alta eficiencia de combustión en la unidad. Existen tres métodos para el suministro de aire con el fin de reducir la emisión de NO_x⁴⁸, el primero consiste en desviar una porción del aire comburente que va al quemador e introducirlo en otro lugar del hogar del generador de vapor, este método se denomina escalonamiento de aire; los sistemas de combustión de carbón pulverizado operan con aire en exceso de 15-20 % a plena carga; el segundo método consiste en reducir la disponibilidad de oxígeno durante el desprendimiento de volátiles y se centra en el diseño del quemador para recibir todo el aire comburente limitando la velocidad de introducción de la llama; el último método consiste en realizar una recombustión o escalonamiento de combustible (introducción de combustible en varias etapas); con esta técnica de control se destruyen los NO_x formados previamente.

En 1972 se desarrolló el quemador cortatiros dual para carbón pulverizado (DRB) que facilita dos zonas de aire, cada una de ellas controlada por un cortatiros independiente y concéntricas con la tobera del quemador de carbón, con este sistema se logró una reducción del 50 % de emisión de NO_x respecto a los quemadores circulares. El quemador de cortatiros dual ha presentado variaciones a lo largo de los años, dos de ellas son el quemador DRB-XLC y el DBR-4Z.

⁴⁸ FERNÁNDEZ DÍEZ, P. 14. Quemadores de carbón Pulverizado. In Centrales térmicas; Cantabria, U. de, Ed. Santander, España, 2000.

El último quemador que se estudia en esta sesión es el AIRJET, el cual fue desarrollado específicamente para su uso con aire secundario, conformando un sistema integrado para reducción global de NOx más eficaz, el encendido se lleva a cabo de adentro hacia afuera y de afuera hacia adentro y la combustión se intensifica suministrando oxidante directamente al núcleo de la llama en lugar de esperar a que el aire exterior se mezcle con la corriente de combustible.

Mecánicamente el quemador AIRJET es similar a la configuración del quemador DRB-4Z, con una excelente reputación por su durabilidad; la boquilla de carbón y los dispositivos de aire centrales se revisten con materiales cerámicos para resistir el desgaste.

3.11. SESIÓN 11

Inicialmente el relator realizó una introducción, aclarando la diferencia entre el hogar (zona de trabajo) y el quemador (lugar en el cual se da la combustión), donde se resalta la importancia de las tecnologías tipo ciclón puesto que nacen con la necesidad de reducir los costos en la preparación del carbón, ya que el combustible ingresa al quemador con un tamaño de partícula aproximado de 5 mm (triturado) a diferencia de otros equipos los cuales requieren que el carbón esté pulverizado para el correcto funcionamiento.

Para entrar en materia, se habla del porqué los fabricantes decidieron crear los quemadores tipo ciclón, la premisa principal es la disminución de los costos de inversión en lo que se refiere a la preparación del combustible, también se logra una reducción en el tamaño del equipo puesto que la partícula de carbón se transporta en el quemador por medio de un vórtice creado a partir de la introducción de aire secundario lo cual permite una recirculación del flujo gaseoso formando el ciclón característico de este sistema, otra ventaja es que hay menor cantidad de cenizas arrastradas por los gases hacia el hogar evitando el ensuciamiento de los

componentes del equipo, esto se debe a que el intenso calor radiante funde la ceniza creando una escoria viscosa que se mantiene fluyendo constantemente a través de una piquera hacia un tanque para el tratamiento de la misma.

Continuando con la sesión, se habla de la disposición del quemador ciclón mencionando algunas de sus características geométricas como el diámetro (6-10 ft); el equipo se encuentra adosado por su parte posterior a una de las paredes del hogar de la caldera y es refrigerado por agua que circula por un conjunto de tubos en su superficie. Luego de discutir y aclarar las preguntas que surgieron acerca de las características principales de este tipo de tecnologías, la sesión se centra en el campo de la termodinámica para hablar sobre los regímenes de calor manejados por este tipo de quemadores, los cuales son del orden de los $450 - 800 * 10^3 \frac{BTU}{ft^3-h}$ llegando a tener temperaturas de 1650 °C, por otra parte, la absorción de calor presente en las paredes refrigeradas son relativamente bajas, entre $40000 - 80000 \frac{BTU}{ft^2-h}$; Para alcanzar las condiciones óptimas de combustión, el aire en exceso se debe mantener en 2.5 % aproximadamente, con lo cual se llega a capturar alrededor de un 70 % de cenizas para ser drenadas hasta un tanque de escoria⁴⁹.

Prosiguiendo con la temática abordada es necesario hablar de los tipos de combustibles idóneos para el trabajo con quemadores ciclón, primero se mencionan los fuelóleos y gases inflamables que pueden ser utilizados como combustible de contingencia y para la puesta en marcha del equipo, sin embargo, su uso a largo plazo puede destruir el revestimiento de escoria o el refractario provocando la erosión en la tubería, lo que conlleva a fallos en los accesorios a presión en la unidad generadora de vapor; otro combustible es el carbón, siendo el más utilizado en este tipo de tecnologías, para asegurar una combustión estable el contenido de volátiles debe ser superior al 15 % en base seca y el contenido de cenizas debe ser mayor al 6.25 % y 4 % en base seca para los carbones bituminosos y subbituminosos

⁴⁹ FERNÁNDEZ DÍEZ, P. 15. Hogares Ciclón. In *Centrales térmicas*; Cantabria, U. de, Ed. Santander, España, 2000;

respectivamente, con esto se asegura que haya una generación constante de escoria fundida fluyendo hacia la piquera para prevenir el paso de cenizas hacia el hogar de trabajo que pueda corroer las partes y así alargar la vida útil de los elementos que componen el sistema; cuando se trabaja con carbones bajos en ceniza se puede forzar a la generación del río de escoria mediante el incremento de aire en exceso logrando la viscosidad necesaria, pero disminuyendo la temperatura de combustión en el ciclón; otra característica importante es la humedad del carbón, la cual no debe exceder el 20 %, esto debido a que al trabajar con combustibles muy húmedos disminuye la eficiencia del equipo como consecuencia de la cantidad de energía que se necesita para la evaporación de dicha humedad, es decir, cuanto más agua contenga el carbón menos energía podrá ser aprovechada en el proceso. Otras propiedades importantes relativas al carbón son la viscosidad y la tendencia de la ceniza a formar compuestos ferrosos, en primer lugar, se habla del factor de viscosidad T250, el cual denota la temperatura a la que la escoria del carbón fluye con normalidad sobre una superficie horizontal, es decir, una viscosidad de 250 CentiPoise, la cual se logra a la temperatura de 2300 °F (1260 °C) para el carbón bituminoso y 2450 °F (1343 °C) para el carbón subbituminoso⁵⁰; por último, se mencionan los compuestos ferrosos, puesto que provocan un ataque corrosivo al refractario y al cuerpo del ciclón, lo que se debe evitar para alargar la vida útil del quemador.

Para el sistema de entrega de carbón de los quemadores tipo ciclón se tienen 3 configuraciones las cuales se emplean dependiendo de las características del carbón, en primer lugar se habla del sistema de combustión indirecta siendo el más común por ser económico y relativamente sencillo, el carbón que se usa tiene una humedad baja y se maneja un tamaño de partícula relativamente grande por lo que no existen riesgos de incendio asociados al almacenaje y la manipulación del combustible pulverizado, en segunda medida se tiene el sistema de combustión

⁵⁰ FERNÁNDEZ DÍEZ, P. 15. Hogares Ciclón. En: Centrales térmicas; Cantabria, U. de, Ed. Santander, España, 2000;

directa, el cual cuenta con un segundo triturador más pequeño en la zona de alimentación y un sistema de barrido con aire caliente para eliminar la humedad del combustible, en algunos equipos se cuenta con un clasificador de triturado y separadores de humedad mecánicos. Por último, se estudia el sistema de combustión directa con presecado, diseñado para trabajar con lignitos con humedad superior al 36% y carbones de baja calidad, este sistema utiliza separadores de partículas y humedad.

Para finalizar la sesión se hace énfasis en la reducción de agentes contaminantes producidos en la combustión; para la reducción de emisiones que contengan óxidos de azufre se utilizan carbones con bajo contenido de azufre teniendo especial cuidado en las calderas y hogares, ya que son sensibles a la cantidad de cenizas producidas, la humedad y el poder calorífico del combustible, cuando se sustituyen combustibles de baja humedad por material con alto grado de humedad se debe adecuar la instalación precisando de un sistema de presecado; en el caso de la reducción de óxidos nitrosos se utilizan sistemas de dos etapas logrando reducir el nivel de NOx al 50 % como ocurre en las instalaciones que queman carbón pulverizado, el problema principal es la alta probabilidad de corrosión debido a la inyección de aire secundario que golpea con fuerza las paredes del hogar.

3.12. SESIÓN 12

En esta sesión se finaliza el estudio de los subtemas concernientes a la combustión de sólidos, es necesario hablar de las chimeneas, la normativa en cuanto a estas y su importancia en las emisiones de gases contaminantes; existen dos tipos de chimeneas clasificadas según su operación, pueden ser de tiro natural o de tiro forzado.











El tiro natural o tiro negativo se debe a una depresión en la parte baja de la chimenea producida cuando el quemador está operando en un ambiente en el que la presión

del aire es menor que la exterior; una chimenea adecuadamente aislada pierde poco calor y los humos que salen de la misma no se enfrían excesivamente. La Reglamentación indica que cuando son exteriores, las pérdidas de calor en la superficie interna no deben ser superiores a $1,45 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para combustibles sólidos y líquidos y $2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para combustibles gaseosos. Para que el lector se haga una idea comparativa de estos valores, un aislamiento de 10 mm de espesor de fibra de vidrio tiene unas pérdidas del orden de $1.31 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ⁵¹.

El tiro forzado es frecuentemente utilizado en la industria, puesto que con esta tecnología no se presenta revoco de humos, además se tiene una gran velocidad de evacuación de estos con un bajo porcentaje de olores en comparación con las chimeneas abiertas, para provocar el tiro se utilizan extractores, los cuales hacen uso del aire exterior que ingresa a través del hogar para extraer los humos hacia equipos de tratamiento de gases o hacia la atmósfera directamente siempre y cuando se cumpla con la normativa de emisiones.

⁵¹ SANTALLA BLANCO, Luis Manuel. *Hogares y chimeneas con tiro natural*. Director de teoriadeconstruccion.net

Tabla 13. Normativa nacional para el tratamiento de gases producto de la combustión

Numero	Título	Fecha	Estado		
NTC 6136:2015	MÉTODO PARA MEDICIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN FUENTES FIJAS. DETERMINACIÓN DEL PUNTO Y LA VELOCIDAD DE MUESTREO EN DUCTOS O CHIMENEAS PEQUEÑAS. (DIÁMETRO ENTRE 100 MM Y 300 MM)	09/12/2015	Vigente		
NTC 5360:2010	ESPECIFICACIONES PARA LA INSTALACIÓN DE ARTEFACTOS A GAS DE USO DOMÉSTICO PARA CALEFACCIÓN DE RECINTOS INTERIORES. CALEFACTORES DE AMBIENTE Y CHIMENEAS.	28/07/2010	Vigente		
NTC 6143:2016	MÉTODO DE MEDICIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN FUENTES FIJAS. DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE ÓXIDO DE NITRÓGENO	13/04/2016	Vigente		
NTC 4617:1999	GESTION AMBIENTAL. CALIDAD DE AIRE. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD PROMEDIO DE UNA CORRIENTE DE GAS MEDIANTE ANEMOMETRO TERMICO.	16/06/1999	Vigente		
NTC-ISO 9096:1995	GESTION AMBIENTAL. AIRE. EMISION DE FUENTES FIJAS. DETERMINACION DE LA CONCENTRACION Y TASA DE FLUJO MASICO DE MATERIAL PARTICULADO DENTRO DE DUCTOS DE CONDUCCION DE GAS. METODO GRAVIMETRICO MANUAL.	21/06/1995	Vigente		

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC

Existen otros equipos para el tratamiento de gases, los sistemas de llamaradas o bengalas (antorchas) son de gran importancia, puesto que son utilizados para deshacerse de gases residuales en plantas industriales, refinerías y pozos petrolíferos, estos gases son productos liberados por dispositivos de alivio de presión, es decir, protegen los equipos de sobrepresiones. El diseño de los sistemas de antorcha (bengala) debe tener ciertas características para una operación adecuada, ya que los gases manipulados por una erupción suele variar en una gama amplia, las bengalas deben funcionar con una relación de rangos muy grande (flujo máximo de emergencia hasta el caudal de purga), además deben operar por largos periodos de tiempo sin necesidad de mantenimiento y con exceso de aire elevado en comparación con otros quemadores; muchos de estos equipos tienen un caudal de emergencia que produce una llama de cientos de pies de largo con una liberación de calor de miles de millones de Btu por hora⁵².

⁵² JHON ZINK, P. 4. *COMBUSTION HANDBOOK*; Tulsa, Oklahoma, U. de, Ed.; new york, 2001; Pág. 591,

Los quemadores antorcha pueden clasificarse en sistemas de punto único, multipunto y cerrado, su diseño se ve directamente influenciado por el caudal de trabajo, la temperatura del gas y la presión disponible; en el momento de realizar el diseño del equipo se debe tener en cuenta que lo que se requiere es una combustión fiable (no debe apagarse la llama sin haber cerrado el registro de combustible), se han de garantizar unas condiciones hidráulicas adecuadas para la operación, se deben eliminar los líquidos que puedan llegar a la punta del quemador y evitar la infiltración de aire en la antorcha.

4. RESULTADOS DEL SEMINARIO

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir del desarrollo del seminario de investigación enfocado en Tecnologías de la Combustión destacando el primer objetivo específico (véase la sección 1., “Objetivos”), ya que a partir de la estructuración se desplegaron las siguientes actividades que contribuyeron al cumplimiento de los objetivos propuestos en este proyecto de grado.

4.1. DESARROLLO DE GUÍAS DE LABORATORIO

El desarrollo del seminario deja ver que la investigación teórica no es suficiente para la aprehensión completa de algunos temas del ámbito ingenieril, por ello se hace una selección de los subtemas con potencial para ser estudiados en profundidad en los laboratorios de la escuela de Ingeniería mecánica, dichos subtemas se enuncian a continuación:

- La emisión de gases contaminantes debe ser analizados, dado que generan problemas tanto ambientales (aumento del efecto de invernadero), como problemas de salud a operarios además de daño a los ductos de escape, por ello se considera pertinente conocer el uso de un analizador de gases usando los bancos presentes en el laboratorio de máquinas térmicas alternativas.
- Poder calorífico de biomasa sólida: Este tema es de vital importancia debido al auge de la eficiencia energética, dado que, los residuos de la producción de papel, panela, café, maíz, entre otros, se están usando como combustible para subprocesos dentro de las mismas plantas de procesamiento; por esta razón

se considera pertinente que el estudiante conozca un procedimiento con el cual se pueda obtener el poder calorífico de productos no convencionales.

- Tipos de llamas: De acuerdo con la teoría recopilada, existen dos tipos de llamas, una de premezcla y una de difusión. Estas llamas poseen ciertas características en cuanto a forma, color, longitud etc. A causa de esto, es indispensable que los estudiantes observen en la práctica cada una de las configuraciones de llama que se pueden obtener.
- Tipos de quemadores: En la industria se utiliza el calor producido por las reacciones de combustión para diferentes procesos, en el caso de las calderas se usa para la producción de alimentos, generación de electricidad, humidificación etc.; para cada caso en particular hay un determinado combustible o un sistema de suministro de aire, por este motivo se requiere que el estudiante conozca los diferentes tipos de quemadores para combustibles en estado sólido, líquido y gaseoso.
- Inferencia que tiene el remolineo del aire dentro de la combustión: Este es un caso particular que se puede presentar en los quemadores de combustible sólido, dado que en modelos de tipo industrial se usa un dispositivo tipo baffle para que la velocidad del aire adquiera componente radial y genere un remolineo. Dada esa condición, se considera importante que el estudiante observe y asimile los factores influyentes (obtención de calor, calidad de los humos), las ventajas y desventajas de este sistema y su significado en aspectos monetarios.
- Etapas de fluidización de un sólido pulverizado o triturado: Para la combustión en lecho fluidizado se observa que la operación adecuada va en función de la

velocidad del aire, el tamaño de la partícula, la sección transversal de la cámara de fluidización y la densidad del material. Por ello, se debe conocer las formas que puede tomar el material particulado de acuerdo con la velocidad del aire, y las implicaciones que puede tener cada etapa del proceso de combustión.

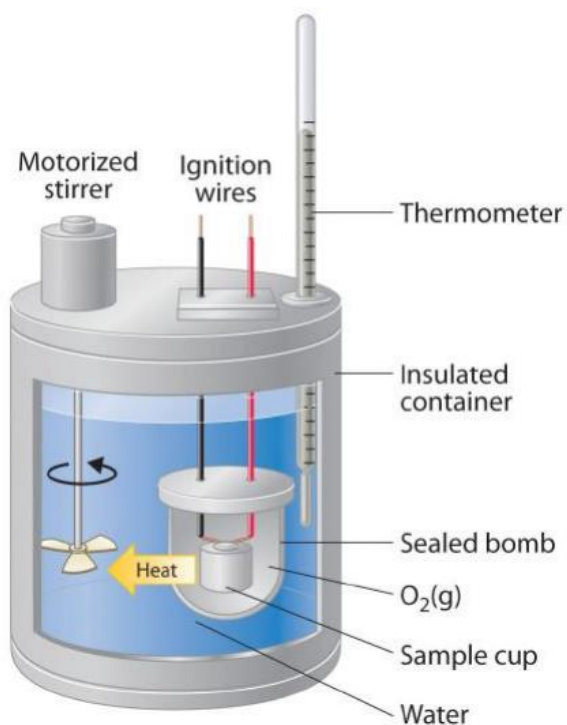
- Pulverización de un fluido líquido: La mecánica de fluidos ha demostrado que la reducción de sección transversal dentro de un flujo confinado y una drástica caída de presión hace que el fluido salga en forma de gotas a altas velocidades, al aplicar esta teoría y los conceptos de combustión, el estudiante podrá entender la relación entre el cambio de la sección transversal, el tamaño de la gota y la velocidad de salida, todo esto aplicado a la geometría que debe tener el hogar de combustión.
- Influencia de la cantidad de aire dentro del retroceso y desprendimiento de la llama en sistemas atmosféricos: Este tipo de fenómenos se presentan en algunos quemadores debido a que la velocidad de quemado es menor que la velocidad de la mezcla. Realizando variaciones en la sección transversal del sistema de suministro de mezcla y cambios en la velocidad del aire, el estudiante comprenderá los efectos que dicho fenómeno puede tener en el sistema de combustión.

4.1.1. Laboratorio Estimación del poder calorífico de una biomasa. Teniendo en cuenta el análisis realizado para cada uno de los temas, se decide postular el laboratorio de identificación de biomásas siguiendo jerárquicamente el orden en el que se propuso el seminario (ver sección 2. planificación). Se usará como base la norma ASTM E711, pero se debe dejar en claro que la muestra a analizar debe tener las características que se solicitan en la norma ASTM E829. Para la revisión de su contenido remítase al anexo B.

4.1.1.1 Materiales y equipo requerido

- **Bomba calorimétrica:** Es un elemento que usa la combustión como medio de calentamiento de cierta cantidad de agua. Este se compone de un vaso calorimétrico, un tubo u hogar de combustión, un par de electrodos, un termopar y una fuente de voltaje. Un ejemplo se observa a continuación:

Figura 7. Bomba calorimétrica



Fuente: *LibreText, Chemistry*. 6.4: Calorímetro a volumen constante. Medida del cambio de energía para reacciones químicas. [en línea]. Disponible en: https://chem.libretexts.org/Courses/Sacramento_City_College/SCC%3A_Chem_400_General_Chemistry_I/Text/06%3A_Thermochemistry/6.04%3A_Measuring_%3A_Constant-Volume_Calorimetry

- **Bascula de alta precisión:** Elemento con el cual se miden las masas de ácido benzoico, alambre de ignición y masa del combustible sólido. Este debe tener una precisión de milésima de gramo.

Figura 8. Bascula de alta precisión



Fuente: Grupo Horeca, Basculas y medición exacta. [en línea]. Disponible en: <https://www.grupohoreca.es/basculas-medicion-exacta/bascula-balanza-de-sobremesa-alta-precision.html>

- **Prensa:** Elemento encargado de compactar las muestras en forma de pastillas.

Figura 9. Prensa manual para compactación de las muestras



Fuente: *KIAI tools*, Equipos de llenado, envasado sellado y etiqueta. [en línea].
Disponible en: https://www.kiaitools.com/PRENSA-PARA-PASTILLAS-USO-CASERO-6MM,1231_1479227788

- **Bala de oxígeno:** Comburente requerido para el desarrollo de la combustión dentro de la cámara. Cabe recordar que la presión que se debe manejar es de 20-30 Atmósferas.

Figura 10. Cilindro de oxígeno comprimido



Fuente: *KIAI tools*, Equipos de llenado, envasado sellado y etiqueta. [en línea].
Disponible en: https://www.kiaitools.com/PRENSA-PARA-PASTILLAS-USO-CASERO-6MM,1231_1479227788

Nota: Este equipo debe contener las mangueras, manómetros y adaptadores para poder ser acoplado con la cámara de combustión manteniendo la presión recomendada por la ASTM E711.

- **Filamento:** Es aquel que se encarga de unir los electrodos y producir la chispa para el encendido de la muestra. De acuerdo con la ASTM E711 “sección 6.8”⁵³ el alambre debe tener una longitud de 100 mm y su material es aleación níquel-cromo número 34 AWG (“con un diámetro de 2.588mm”⁵⁴)

Figura 11. Filamento para la ignición



Fuente: *Boway*, lista de productos. [en línea]. Disponible en: http://www.copper-alloy.com/upload/3209/o/20_3_copper_nickel_zinc_alloy_1.jpg

- **Agua destilada:** Es la sustancia que se va a calentar dentro del vaso calorimétrico. Con este calentamiento se puede calcular el poder calorífico del combustible en prueba.
- **Acido Benzoico:** Sustancia que se usa como calibrador del calorímetro.
- **Jeringa:** elemento para la medida de agua destilada.

⁵³ *American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter.* En: Libro anual de los estándares ASTM. **2004.** p. 2. [https://doi.org/10.1520/E0711-87R04.2.](https://doi.org/10.1520/E0711-87R04.2)

⁵⁴ *TR Fastenings. Wire Number (gauge) Conversión tables.* [En línea]. (Recuperado en 29 de Julio del 2020). Disponible en: <https://www.trfastenings.com/Products/knowledgebase/Tables-Standards-Terminology/Wire-Number-Gauge-Conversion-Tables>

4.1.1.2 Costos de adquisición del laboratorio

Tabla 7 Costos de los materiales para la implementación del laboratorio “poder calorífico de la biomasa”

Empresa	Dirección para compra	Elemento o máquina	Nombre del producto	precio [USD]	Precio [COP 29/07/20]
Shanghai Glomro Industrial Co., Ltd (Alibaba)	https://cut.t.ly/Ks3FOpq	Bomba calorimétrica	Calorímetro automático de bomba de oxígeno precio de fábrica	2180	8105567
Mercadolibre (Colombia)	https://cut.t.ly/2s3JbE7	Bascula de alta precisión (0.001 g-100 g)	Pesa Digital profesional 100 g * 0.001 g Alta precisión		250000
Droguería Cruz Verde	https://cut.t.ly/is3LvIT	Agua destilada por 500 mL (1.5 L)	Agua destilada estéril por 500 ML marca Quibi (3250 COP c/und.)		9750
Medicusa (Mercado libre)	https://cut.t.ly/Ls3BRZn	Cilindro para oxígeno medicinal	Cilindro de aluminio Kramer Blanco de 682 L		340000
Global tools and Lighting Store	https://cut.t.ly/ws82KAw	Regulador de presión para oxígeno	reductor de presión de cobre, válvula reductora	17.47+ 10.36= 27.83	103365

			de presión de oxígeno		
OLOEY (Aliexpress)	https://cutt.ly/Ks8IJTI	Filamento de níquel-cobre	Rollo de alambre níquel-cromo con diámetro de 0.25mm y longitud de 10 m	4.69+4.23=8.92	33166
Shanghai ZZ New Material Texh. Co., Ltd. (Alibaba)	https://cutt.ly/Rs8Ak3W	Acido Benzoico C_6H_5COOH	Acido benzoico CAS 65-85-0 por 1 Kg certificado por la ISO	5+15=20	74363
Compratelo SAS (mercado libre)	https://cutt.ly/4s8qKr1	Vaso de precipitado	Vaso de precipitados de baja forma de vidrio 100 ml Royal Lifesence		70990
Jinxinyan g oficial store (aliexpress)	https://cutt.ly/8s8ZeEc	Prensa de compactado para pastillas	Industrial hand press machine manual presses	35.2+8.1.99=117.19	435730
Total					9422931 COP

4.1.2. Laboratorio Medición de los gases de emisión en un motor de combustión interna accionado por gas o gasolina, presente en el laboratorio de máquinas térmicas alternativas. Este laboratorio se ha propuesto teniendo en cuenta la problemáticas generadas por los proceso de combustión, teniendo en cuenta que parámetros tales como el tiempo de mezclado, el tamaño de la partícula de combustible, la geometría del quemador, la combustión ideal no se produce; Por ello, teniendo en cuenta que el laboratorio de máquinas térmicas alternativas posee bancos de motores, se considera oportuno plantear un laboratorio que se enfoque en las medidas de emisiones contaminantes con un analizador portátil.

4.1.2.1 Materiales y equipo requerido

- **Analizador testo 350:** Equipo dedicado al análisis de emisiones profesionalmente, y está compuesto por tres elementos los cuales son:
 - **Unidad de control:** Elemento que controla y muestra los datos de la medida. Esta se puede conectar con la caja de medidas mediante vía cable bus de datos o bluetooth.

Figura 12. Unidad controladora a punto de ser instalada en la caja de medidas



Tomado de : Analizador de combustión testo 350. [En línea]. Recuperado en 2020/08/29.
Disponible en: [https://www.testo.com/es-ES/analizador-de-combustion-testo-350/p/0632-](https://www.testo.com/es-ES/analizador-de-combustion-testo-350/p/0632-3510)

3510

- **Caja analizadora:** elemento que contiene los sensores de medida. Esta se puede manejar mediante unidad de control o por medio de pc (USB, Bluetooth).

Figura 13. Caja analizadora



Tomado de : Analizador de combustión testo 350. [En línea]. Recuperado en 2020/08/29.
Disponible en: <https://www.testo.com/es-ES/analizador-de-combustion-testo-350/p/0632-3510>

- **Sonda de combustión:** elemento encargado de recopilar gases de combustión para ser analizados en la caja analizadora.

Figura 14. Sonda de combustión para motores industriales para testo 340 y 350.



Tomado de : Analizador de combustión testo 350. [En línea]. Recuperado en 2020/08/29.
Disponible en: <https://www.testo.com/es-ES/sonda-de-combustion-para-motores-industriales/p/0600-7555>

- **Motores de combustión interna:** máquinas térmicas encargadas obtener potencia mecánica a partir de la conversión de energía química que en el centro

de potencia (cilindro pistón). Para esta ocasión se requiere el uso de dos motores, uno accionado por gasolina y el otro accionado por gas.

Figura 15. Banco de pruebas motor Renault.



Tomado de: Corzo Y. y Gómez H. Montaje y puesta en marcha de los bancos de laboratorio de máquinas térmicas alternativas (MTA) para el desarrollo de prácticas de laboratorio y ensayos de investigación en el nuevo edificio de la escuela de ingeniería mecánica. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico. UIS. 2019. p. 66.

Figura 16. Grupo electrógeno que funciona a partir de gas



- **Batería 12 V:** requerida para la ignición de los motores.
- **Combustible:** Requerido para el funcionamiento de los motores, gasolina para el banco del Renault 4, y gas para el grupo electrógeno.

4.1.2.2 Costos de adquisición del laboratorio

Tabla 8. Costos de los materiales para la implementación del laboratorio “Medición de los gases de emisión en un motor de combustión interna accionado por gas o gasolina”

Empresa	Dirección para compra	Elemento o máquina	Nombre del producto	precio [USD]	Precio [COP 29/08/20]
Testo Mntecno logies	www.mnt.com.co	Analizador testo 350 con sus complementos	Analizador portátil testo 350		49239506
Energítea	https://cut.ly/5fhG6qW	Batería 24 V	Batería MAC Silver NS40670MC		366700
Mercado libre Colombia	https://cut.ly/qfhKuSm	Cargador batería	Lcd 12v / 24v Inteligente Automático Batería Cargador Pure C		213057
Terpel, Petrobras, Texaco	Estación de servicio	Gasolina	1 galón de gasolina (US)		7998
Mercado libre Colombia	https://cut.ly/cfhHZfa	Pimpina 20L - 0433-	Pimpina 20 L - Referencia: 0433 - Marca: Nacional - Código: 0433		11250+7500 =18250
			Total		49846011

4.1.2.3 Precauciones para el manejo de combustibles. Teniendo en cuenta que una de las practicas tiene por obligación el uso de combustibles, se han tomado una serie de recomendaciones que propone la NFPA 30 del 2015.

- El almacenamiento de recipientes con combustible debe tener un corredor o pasillo que no tenga obstrucciones.
- El cableado eléctrico que tenga el lugar de almacenamiento no debe estar expuesto, dado que puede generar ignición; por ello se recomienda usar cableado NFPA 70.

4.1.2.4 Indumentaria para el laboratorio. En este caso, el manejo de combustibles y el funcionamiento de los motores se considera la siguiente indumentaria obligatoria para la realización de la práctica:

- Calzado cerrado.
- Uso de camisa o batas cerradas
- Pantalón tipo Jean u overol.
- Protección auditiva, tal como tapa oídos

4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA TEMÁTICA DENTRO DE LA PLATAFORMA DE MOODLE

De acuerdo con la planificación y la ejecución, se han creado las diapositivas con los respectivos temas y subtemas del seminario, teniendo en cuenta que lo que se quiere con este proyecto es generar una propuesta de materia electiva para ser introducida en el plan de estudios del programa académico de Ingeniería Mecánica, se considera recopilar toda la información dentro de una plataforma en la cual los docentes y estudiantes puedan acceder fácilmente a las diapositivas, las memorias de cada sesión y la bibliografía utilizada. El aula virtual de aprendizaje de la UIS resulta ser la opción indicada para llevar a cabo este objetivo. La figura 17 muestra una captura de pantalla donde se puede observar la organización de los documentos recopilados.

Figura 17. Organización del curso en el aula virtual de aprendizaje UIS



Figura 18. Sistema de distribución de los documentos recopilados en el seminario



4.3. GENERACIÓN DE UNA PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TEMÁTICA ABORDADA COMO UNA ASIGNATURA ELECTIVA PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Una asignatura electiva “es una materia que tiene como objetivo la profundización en una línea específica dentro de su área de formación, complementación de formación profesional o que genere conocimiento en disciplinas un poco más distantes de la carrera elegida”⁵⁵. Teniendo en cuenta esta definición y los objetivos específicos (ver sección 1.3. Objetivos), se genera un formato donde se justifica la implementación de una materia electiva enfocada en las tecnologías de la combustión, además se agrega la cantidad de temas a estudiar, una propuesta de evaluación y la respectiva bibliografía necesaria para la ejecución del curso.

FORMATO PARA EL CONTENIDO DE LAS ASIGNATURAS DE LOS PROGRAMAS ACADÉMICOS PRESENCIALES			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS			
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
TECNOLOGÍAS DE LA COMBUSTIÓN			
Código:			Número de créditos:
Intensidad horaria semanal o intensidad horaria por periodo			Requisitos:
TAD		TI:	
Teóricas:	Prácticas:		
Justificación:			

⁵⁵ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Guía para la creación de asignaturas electivas. [En línea]. (Recuperado en 29 de Julio del 2020). Disponible en: <https://www.uis.edu.co/intranet/calidad/documentos/formacion/guias/GFO.04.pdf>

Como parte del perfil del ingeniero mecánico, es fundamental que el estudiante y futuro egresado esté en capacidad de comprender el funcionamiento de los mecanismos utilizados para la combustión de diferentes materiales y compuestos químicos. Por ejemplo, en los procesos industriales es necesario realizar la correcta manipulación de los diferentes desechos obtenidos; una práctica utilizada frecuentemente es la quema controlada de residuos (de acuerdo con la normativa nacional de emisiones) mediante el uso de hornos rotatorios capaces de eliminar dioxinas y otros agentes contaminantes presentes en los gases de la combustión del caucho y de los desechos hospitalarios. Por lo tanto, el curso brindará al estudiante la facultad de resolver problemas presentes en calderas, hornos y quemadores de todo tipo, al igual que la selección de las tecnologías adecuadas para cada tipo de combustible.

En los últimos años el interés en cuanto a los gases contaminantes y de efecto invernadero ha cobrado gran importancia, puesto que según el informe entregado por la ONU a finales del 2019 revela que el dióxido de carbono (CO_2) aumentó un 147%, el metano (CH_4) un 259%, y el óxido nitroso (N_2O) un 123%, estos incrementos hacen que el cambio climático sea más agudo, que las temperaturas suban y que los fenómenos meteorológicos extremos se multipliquen; por esta razón el estudio de la normativa nacional e internacional referente a las emisiones de gases de combustión es de gran importancia en el proceso de formación de los ingenieros mecánicos, por lo que este curso está dedicado al conocimiento de los diferentes agentes contaminantes producidos a partir de la combustión del carbón, la biomasa y los derivados del petróleo, al igual que la manera de tratarlos para cumplir con normativas como la Norma Europea, la ASTM, la Norma Técnica Colombiana y los decretos del Ministerio del Medio Ambiente de Colombia.

La asignatura electiva tecnologías de la combustión aplica conocimientos y habilidades adquiridos en las asignaturas de termodinámica I y II, sistemas

térmicos y mecánica de fluidos, además brinda una base para el desarrollo de proyectos de investigación enfocados en el diseño de quemadores y equipos relacionados con el aprovechamiento de la energía producida a partir de diferentes combustibles y biocombustibles, como es el caso de los secadores de café con tecnología de quemadores ciclón que utilizan la cascarilla resultante de los granos de café como combustible para calentar el aire para el proceso de secado.

Propósito de la asignatura:

- Complementar los fundamentos termodinámicos del proceso de combustión y resaltar la importancia del cumplimiento de la normativa referente a las emisiones de gases contaminantes.
- Conocer los tipos de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, al igual que sus propiedades y su comportamiento en una reacción de combustión.
- Aprender acerca del funcionamiento y las condiciones de operación de las tecnologías que se utilizan en la industria para la combustión de sólidos, líquidos y gases.
- Brindar bases para el desarrollo de las labores de mantenimiento de equipos industriales como calderas y hornos, al igual que la observación de los elementos de seguridad que se pueden encontrar en cada dispositivo.

CONTENIDO:

1. TERMOCOMBUSTIÓN

- 1.1. Energías involucradas en el proceso de combustión
- 1.2. Datos base para los procesos de combustión
- 1.3. Proceso de combustión
- 1.4. Tipos de combustibles y sus propiedades
- 1.5. Aplicaciones de la combustión
- 1.6. Legislación de la contaminación del aire

2. COMBUSTIÓN SÓLIDA

- 2.1. Propiedades físicas de los combustibles sólidos
- 2.2. Propiedades químicas de los combustibles sólidos
- 2.3. Tratamiento térmico
- 2.4. Gasificación y combustión
- 2.5. Identificación de combustibles sólidos
- 2.6. Biomasa
- 2.7. Carbón
- 2.8. Métodos de combustión del carbón
- 2.9. Combustibles sólidos relacionados con el petróleo
- 2.10. Combustión de desechos sólidos
- 2.11. Tecnologías asociadas a la combustión de sólidos
- 2.12. Tecnologías de lecho fluidizado
- 2.13. Chimeneas
- 2.14. Emisiones

3. COMBUSTIÓN LÍQUIDA

- 3.1. Propiedades físicas de los fluidos
- 3.2. Tipos de quemadores
- 3.3. Diseño y selección de quemadores

- 3.4. Chequeo de quemadores
- 3.5. Instalaciones y mantenimiento
- 3.6. Operaciones del quemador-calentador
- 3.7.
- 3.8. Quemadores de caldera
- 3.9. Control de la combustión
- 3.10. Consideraciones operacionales extra
- 3.11. Resolución de problemas

4. COMBUSTIÓN GASEOSA

- 4.1. Propiedades físicas de los gases
- 4.2. Quemadores de gas
- 4.3. Tipos de quemadores para combustible gaseoso
- 4.4. Ductos quemadores
- 4.5. Equipo para la utilización de gas
- 4.6. Controles del suministro de aire y gas
- 4.7. Calderas pirotubulares para combustibles gaseosos
- 4.8. Sistemas de seguridad de llama del quemador
- 4.9. Sistemas de quemado multicomcombustible

ESTRATEGIAS DE ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE

Modelo pedagógico: Educacional-constructivista, en este modelo la triada profesor-alumno-contenido es vista como un conjunto de elementos que interactúan de manera bidireccional los unos con los otros, se busca que el alumno pueda construir de manera progresiva una serie de significados

compartidos por el profesor, con base en los contenidos y la orientación del docente.

Un elemento fundamental es que el aprendiz pueda atribuir sentido al material aprendido y también al propio proceso de aprendizaje, donde el docente actúa como un guía proporcionando una ayuda ajustada a las necesidades del estudiante. La clase debe desarrollarse en una discusión permanente de los temas expuestos por el profesor o por el estudiante y al ser una asignatura teórica enfocada en el estudio de las tecnologías que se tienen hoy en día en la industria, es necesario fomentar al autoaprendizaje como una estrategia pedagógica, la cual debe estar presente en el proceso de formación del ingeniero mecánico de cara a la resolución de problemas en la vida profesional.

Se realizarán trabajos aplicativos para estudiar la estequiometría de las reacciones, la liberación de calor de los diferentes combustibles, la eficiencia de los equipos usados en la industria y el porqué de la utilización de cada dispositivo según el material de proceso. Asimismo, se desarrollarán laboratorios con el propósito de contrastar los conceptos teóricos adquiridos en clase con la experimentación, para que el estudiante ponga en práctica las normativas aprendidas y a partir de ello, observar e interpretar la manera en que se obtienen algunas propiedades como el poder calorífico y la humedad de los combustibles, siendo estas de gran importancia para el diseño de equipos de combustión. Además, de ser posible, se programarán visitas técnicas a empresas donde se puedan reconocer las tecnologías involucradas en los procesos de combustión.

Algunas estrategias pedagógicas son:

- La exposición: Presentación de contenidos por parte de los miembros del curso (estudiantes y profesores)

- Lectura de libros y estudio de catálogos proporcionados por empresas que se especializan en el área de combustión.
- Debates y discusiones en clase, para comprender plenamente el funcionamiento de las tecnologías de combustión.
- Proyectos realizados en el transcurso del semestre con relación a los temas estudiados.

Sistema de evaluación:

Indicadores de logros

- La capacidad argumentativa, el nivel de escucha y comunicación que evidencien los estudiantes en los debates que se promuevan en el salón de clase.
- Pertinencia en las preguntas propuestas por los estudiantes en los desarrollos teóricos de la asignatura.
- Estrategias y argumentaciones utilizadas para resolver los problemas planteados en la sección de termocombustión.

Estrategias de evaluación

- Examen parcial de termocombustión.
- Trabajos acerca de la teoría de la combustión sólida, líquida y gaseosa.
- Realización de proyectos (prototipos) para aplicar el conocimiento teórico.

Equivalencia cuantitativa

- Las fechas de entrega de proyectos y evaluación estarán determinadas por el calendario académico oficial y acordadas con los estudiantes.
- Las ponderaciones para cada una de las evaluaciones serán asignadas por el profesor en común acuerdo con los estudiantes.

Bibliografía

- MORAN Michael y SHAPIRO Howard. El proceso de combustión. Editorial Reverté S.A. Barcelona, España. ISBN 84-291-313-0. 2004. Impreso en España.
- CENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima edición. McGraw-Hill/interamericana editores S.A. de CV. 2012.
- HOWELL, John y BUKIUS, Richard, Principios de termodinámica para ingenieros. McGraw Hill interamericana de México S.A. de C.V. 1990. Impreso en la litografía Maico (México D.F.). ISBN 988-422-571-7
- BAEHR, Hans. Tratado moderno de termodinámica. Primera edición. Imprenta Clarasò. Barcelona, España. 1965.
- MARTÍNEZ, Isidoro. Termodinámica básica y aplicada. Editorial DOSSAT S.A., plaza de Santa Ana, Madrid. España. Impreso en España. 1992. ISBN 84-237-0810-1.
- EL-Mahallawy, Fawzy y EL-DIN HABIK, Saad. *Fundamentals and technology of combustion. "legislation of air pollution*. El server science ltd. Kidlington, Oxford (UK). 2002. ISBN: 0-08-044106-8
- DE SOUZA-SANTOS, Marcio. *Solid fuels combustion and gasification "modelling, simulation, and equipment operation"*. Editorial Marcel Dekker, inc. 2005. ISBN 0-8247-0971-3.
- TILLMAN, David A. *The combustion of solid fuels and wastes*. Editorial academic press, Inc. 1991. ISBN 0-12-691255-6.

- KOHAN, Anthony. Manual de calderas, principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. Volumen II. McGraw-Hill interamericana de España S. A. ISBN 0-07-036574-1. 2000.
- BAUKAL, Charles y SCHWARTS, Robert. *The John Zink combustion handbook." Burner desing".* Editorial CRC press LLC. Impreso en Estados Unidos de América. 2001. ISBN 0-8493-2337-1.
- SUBRAMANIAN, K. A. *Biofueled reciprocating internal combustion engines.* 2018. CRC Press, Taylor and Francis group, LLC. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742. ISBN 978-138-03318-4
- FRANCIS, Wilfrid y Peters Martin. Fuels and fuel Technology. Segunda edición. Pergamon press ltd Headington Hill Hall, Oxford OX3 OBW, Inglaterra. ISBN 0-08-025249-4.
- LOUNDERVILLE, Stephen y BAUKAL, Charles Jr. The Coen & Hamworthy combustion handbook. CRC press. Taylor & Francis Group. Vol. II. ISBN 13-978-4398-7334-2.
- British gas school of fuel management, Combustion Engineering and gas utilisation. 3rd Edition Published by British Gas pic Rivermill House, 152 Grosvenor Road, London SW1V 3JL. Routledge is an imprint of the Taylor & Francis Group. ISBN 0-419-17670-5.

Webgrafía

- ESPARZA, Félix. Combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Cuerpo de bomberos de Navarra. España. [Consultado el 21/01/2019]. Disponible en: http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/combustibles.pdf

- Carbon trust, EDF y IETA, *Colombia: An Emissions trading case study*. Consultado [22 de enero del 2019]. Disponible en: https://www.ieta.org/resources/Resources/Case_Studies_Worlds_Carbon_Markets/2018/Colombia-Case-Study-2018.pdf
- Universidad de Burgos, Escuela Politécnica superior. Manual de calderas industriales. Obtenido en línea: [<https://temariosformativosprofesionales.files.wordpress.com/2013/10/calderas-univ-burgos.pdf>]
- Universidad de Burgos, Escuela Politécnica superior. Manual de calderas industriales. Obtenido en línea: [<https://temariosformativosprofesionales.files.wordpress.com/2013/10/calderas-univ-burgos.pdf>]

5. CONCLUSIONES

- Se estructuró un seminario de investigación dividido en los temas de termocombustión, combustión sólida, combustión líquida y combustión gaseosa como se observó en las memorias anexas a este libro.
- Se desarrollaron dos propuestas de laboratorio aplicadas a la recopilación hecha durante el seminario de investigación, las cuales se aplican a un combustible sólido (caracterización de una biomasa por medio de bomba calorimétrica), líquido y gaseoso (Medición de los gases de emisión en un motor de combustión interna accionado por gas o gasolina), los cuales tienen un costo de adquisición de 59'268.942,00 pesos moneda corriente.
- Se implementó la recopilación de información analizada en el seminario de investigación (libros digitales, material de exposición) en la plataforma de Moodle.
- Se generó una propuesta para la conversión de la temática analizada durante el seminario como una materia electiva llamada Tecnologías de la Combustión dentro de las asignaturas del plan de estudios de la carrera Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.
- En la industria colombiana, se han venido desarrollando diferentes proyectos energéticos a partir del tratamiento de los residuos municipales e industriales y la biomasa, por lo que es de suma importancia generar en los estudiantes de ingeniería Mecánica el sentido de la investigación en todo lo relacionado con el tema de la pirólisis, gasificación y combustión en pro del crecimiento del uso de energías no convencionales.

- El aprendizaje en la ingeniería debe reforzarse con el desarrollo de laboratorios para que los estudiantes puedan observar el comportamiento de los diferentes procesos y estudiar las normas que rigen cada temática, en este caso, las tecnologías de la combustión y el análisis de los diferentes combustibles deben convertirse en una nueva línea de investigación en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS, ya que se cuenta con excelentes instalaciones para la exploración autodidacta de sus estudiantes.
- La modalidad de seminario alemán como estrategia pedagógica para el estudio de cátedras universitarias es una gran herramienta que debería ser implementada en los programas académicos de ingeniería, puesto que la investigación, el debate y el trabajo en equipo, preparan a los estudiantes para enfrentarse a los más grandes retos ingenieriles.
- La base de datos de la Universidad Industrial de Santander contribuye en gran medida a la investigación gracias al aporte bibliográfico; sin embargo, se observa una deficiencia en cuanto a normativas necesarias para el estudio de biocombustibles.
- El diseño de tecnologías para la combustión y gasificación no es un fuerte en Colombia, por lo que universidades como la UIS que cuenta con una sede de investigación referente a nivel nacional, debe implementar cursos relacionados con la simulación mediante dinámica de fluidos computacional CFD, para el diseño de equipos como motores y quemadores.

- Las emisiones de gases nocivos para el ambiente producto de una combustión son reducidas en gran medida por los catalizadores y filtros absorbentes (en el caso del quemado de basura) sin embargo, el uso de la combustión estratificada se convierte en una herramienta para la reducción de NO_x y combustibles no quemados que no agrega elementos en la chimenea.
- Los quemadores radiantes pueden ser una opción útil dentro de los campos de la cocina industrial y el calentamiento de recintos, dado que su modo de transferencia de calor no involucra medios, por lo tanto, va a ser uniforme y no se perderá calor con las corrientes de viento.
- Se observa que el aumento de la velocidad del comburente hace que el hogar de combustión tenga un mayor diámetro o ancho (construcción circular o rectangular respectivamente), pero con la utilización de baffles (quemador coaxial) o con un ingreso tangencial de aire (quemador ciclón) reduce el tamaño del quemador como del hogar de combustión.

6. RECOMENDACIONES

De acuerdo con lo planteado desde la ejecución del seminario hasta la realización de formatos para la implementación de los recursos obtenidos como una propuesta para la conformación de una asignatura, se observa que se deben complementar algunas temáticas y laboratorios, por ello a continuación describirán las recomendaciones que el equipo de trabajo propone, de acuerdo con lo observado en el desarrollo del proyecto:

- Búsqueda de bibliografía donde se desarrolle con detalle el diseño de quemadores de tipo ciclón y de tipo axial para combustibles sólidos, enfatizando la búsqueda de menor consumo de potencia (por parte de los sopladores y ventiladores) y un tamaño de maquinaria reducido.
- Se debe considerar la implementación de las tecnologías para la combustión de sólidos (hornos rotatorios) analizada en el seminario como una línea de investigación que pueda atacar la problemática que genera la producción de residuos sólidos producidos en los hogares y en la industria
- Gestión de los activos (quemadores y bancos de laboratorios de combustión) con los que cuente la universidad, para ser adecuados mediante proyectos de curso y asignados a los laboratorios de combustión y máquinas térmicas.
- En el campo de la fluidización, se considera adecuado tener un banco que explique las diferentes fases que existen en la fluidización de sólidos particulados y que muestre los inconvenientes de pistoneo (*slugging*) presentes en los hogares de combustión con secciones transversales no adecuadas

- Planteamiento de visitas técnicas con empresas que utilicen sistemas de combustión en algún proceso y permitan observar la tecnología de quemado que usan.
- Como se menciona en la sección de laboratorio (véase sección 4.1) se ha hecho una serie de propuestas con temática que se puede convertir en laboratorios para la materia Tecnologías de la Combustión, por ello se recomienda que dichas temáticas se desarrollen a partir de proyectos de grado con el fin de aumentar la cantidad de laboratorios para la asignatura electiva.
- Cuando la Universidad requiera equipos para laboratorios de combustibles líquidos donde la pulverización demanda bombas de alta presión, una forma de obtenerlas económicamente consiste en ir a lugares donde los vehículos son reciclados y recuperarlos.
- En la sección de simulación, se debe considerar la búsqueda de un modelo que pueda describir los tipos de llama, para poder contrastar la teoría del CFD con el fenómeno real.
- Fomentar la creación de proyectos relacionados con el uso de biomasa (cascarilla de café u otros productos similares) para la obtención de energía con el fin de calentar el aire para procesos de secado del producto base.
- La teoría recopilada en este seminario, puede ser el punto de partida para proyectos de maestría relacionados con el estudio de motores para que operen con combustibles no convencionales como biodiesel o biogás.
- Considerar el análisis de nuevos materiales aislantes y refractarios que puedan contribuir a la formación de la llama en los sistemas de combustión.

- Teniendo en cuenta el impacto ambiental que produce la combustión, se considera que el desarrollo de un banco de laboratorio donde se puedan observar los métodos de combustión estratificada y sus gases producto es pertinente para el aprendizaje analítico de los estudiantes y docentes de la universidad.
- Dentro de la caracterización de la partícula (combustibles sólidos), se observa que de acuerdo con la naturaleza del sólido se obtiene un tipo de partícula; para el tratamiento de estos combustibles es conveniente poseer un molino de triturado adecuado para los materiales lignocelulósicos y uno para materiales duros (Carbón).
- Hacer una búsqueda o modelado para quemadores de combustible que usen el efecto Coanda para la reducción de los óxidos de nitrógeno producidos por la combustión y compararla contra otros métodos como la estratificación del comburente o el combustible.

BIBLIOGRAFÍA

American Petroleum Institute. Burners for Fired Heaters in General Refinery Services. *API Recom. Pract.* 535, Tercera edición. Washington D.C. USA. 2012, pp 1-90.

AMELL ARREITA, A. A. Estimación de las propiedades de combustibles gaseosos. Especialización en combustibles gaseosos: convenio Universidad de Antioquia-Ecopetrol 2002. (Recuperado 15 enero 2020). Disponible en: <https://es.scribd.com/document/420880156/1-Estimacion-de-Las-Propiedades-de-Combustion-de-Combustibles-Gaseosos-Falta-Numeracion>

American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products and Liquid Fuels (Constant Cooling Rate Method), ASTM D5773-20, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

_____. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. ASTM E711-87. *Annu. B. ASTM Stand.* 2004, 87 (Withdrawn 2004). ASTM International, West Conshohocken, PA, 1987.

_____. Standard Test Method for Vapor Pressure of Petroleum Products and Liquid Fuels (Mini Method), ASTM D5191-19. En *ASTM International*; 2019. West Conshohocken, PA, 2020.

BABCOK & WILCOX. The DRB-XCL® Burner: Key Component for Low NOx Emissions Compliance. (Recuperado 18 de enero 2018). Disponible en: <https://www.babcock.com/en/products/-/media/ff056be3d7a24c6d8dbf7e2daabe4d2c.ashx>

BAUKAL JR, C. The John Zink combustion handbook, Tulsa, Oklahoma. CRC Press LLC; 2001. 801 p. (Industrial combustion series). ISBN 0-8493-2337-1.

_____, C. The John Zink Hamworthy Combustion Handbook, Desing and

operation, Segunda edición; 6000 Broken Sound Parkway NW; CRC press. 2013; Vol. II. ISBN 13-978-1-4398-3965-2

BOATENG, A. A. 10 - Rotary Kiln Minerals Process Applications En: Rotary Kilns, segunda edición. Butterworth-Heinemann, Kidlington, Oxford UK, 2016, pp 231–264. ISBN 978-0-12-803780-5

BORROTO NORDELO, A.; RUBIO GONZÁLEZ, A. *Combustión y Generación de Vapor*. Universidad de Cienfuegos, 2007. (Recuperado 29 septiembre 2019-10-29) Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/333903191_Combustion_y_Generacion_de_Vapor

ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones.*, Primera edición.; MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V: Mexico D.F., 2006, 931 p; Vol. 1. ISBN 970-10-5612-4.

ÇENGEL, Y.; BOLES M. *Termodinámica*. Séptima edición.; MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V: Mexico D.F., 2009, 999 p . ISBN 978-607-15-0743-3.

DIBA, M. F.; KARIM, M. R.; NASER, J. *Numerical modelling of a bubbling fluidized bed combustion: A simplified approach*. En: Revista Fuel, Vol 277, 2020. ISSN: 0016-2361

Edibon. Bomba Calorimétrica. Edibon Internacional: Madrid, España. 2018. Recuperado (09 julio 2020). Disponible en: <https://www.edibon.com/es/bomba-calorimetrica/catalog>

EL-NAGAR, R. A.; GHANEM, A. A.. *2.Syngas Production, Properties, and Its Importance*. En: GHENAI C., y INAYAT A, Sustainable Alternative Syngas Fuel. IntechOpen, 2019; pp 1-8. ISBN 987-1-78984-581-5.

EL-MAHALLAWY, F Y EL-DIN HABIK, S. *Fundamentals and technology of combustion*. Elsevier science ltd, Kidlington, Oxford UK, 2002, p 835. ISBN: 0-08-

044106-8.

FERNÁNDEZ, Pedro. 13. Pulverizadores carbón. En: Centrales termicas; Universidad de Cantabria. Santander, España. (Recuperado 20 enero 2020). Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=15>. pp 481-511.

_____. 14. Quemadores carbón pulverizado. En: *Centrales térmicas*; Universidad de Cantabria. Santander, España (Recuperado 20 enero 2020). Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=15>. pp 513-552.

_____. 15. Hogares ciclón. En *Centrales térmicas*. Universidad de Cantabria. Santander, España. (Recuperado 20 enero 2020). Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=15> pp 555-580

_____. 16. Hogares mecánicos. En: Centrales termicas; Universidad de Cantabria. Santander, España. (Recuperado 20 enero 2020). Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=15>. pp 581-606.

_____. 17. Calderas de lecho fluidificado. En: Centrales termicas; Universidad de Cantabria. Santander, España. (Recuperado 20 enero 2020). Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=15>. pp 607–656.

_____. 30. Combustión en lecho fluido presurizado. En: Centrales termicas; Universidad de Cantabria. Santander, España. (Recuperado 20 enero 2020). Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=15>. pp 1149–1188.

FRANCIS, W. Y PETERS, M. Fuels and fuel technology, a summarized manual. Pergamon press Ltd. Headintong Hill Hall, Oxford, UK, 1980, p 716, Segunda edición. ISBN 0-08-025249-4.

GARZÓN, Manuel. El seminario investigativo o alemán. Universidad de la Costa (CUC). (Recuperado 04 octubre 2018). Disponible en: http://eduvirtual.cuc.edu.co/moodle/pluginfile.php/364760/mod_resource/content/1/EI%20seminario%20investigativoo%20seminario%20Aleman%20MGarzon.pdf

GAS POINT S.R.L (100.0%). Quemador de premezcla de gas. Inventores: C. ZATTI, R. RASTELLI, N. LOVASCIO. Int. Cl.: F23N 5/24 1/04. Fecha de solicitud 29-04-2009. España. Patente de investigación. ES 2 435 536 T3. Fecha de publicación 20-12-2013.

GRUPO VANTI. Composición del gas natural. (Recuperado 29 abril 2020) Disponible en: <https://www.grupovanti.com/co/inicio/hogar/elgasnatural/1297102453941/quees.html>

MÁRQUEZ, M. Combustión y quemadores. Colección: NovaProductiva. Num 1 Editorial Marcombo, España, 2005, 208 p. ISBN 84-267-1364-5

MARX, P.; MORIN, J. *Conventional Firing Systems*. En: MILLER, B. y TILLMAN D. *Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems*. El sevier, impreso por Academic Press, 2008; pp 241–274. ISBN:978-0-12-373611-6

MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES ESPAÑA: Deflagraciones producidas por gases , vapores y polvos combustibles : sistemas de protección. NTP 396. (Recuperado 11 abril 2020). Disponible en: https://www.insst.es/documents/94886/326827/ntp_396.pdf/6674509a-1be3-498d-b948-f6808323b251

MORAN, J. *et. al* . *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & sons Inc, impreso en Estados Unidos de America , octava edición, p 1036. ISBN 978-1-118-41293-0.

MULERO, A. Tema 3 COMBUSTIBLES Y ENERGÍAS RENOVABLES. Escuela de ingenierías agrarias UEX España. (Recuperado 12 septiembre 2019). Disponible en: <https://web.archive.org/web/20100401004746/http://onsager.unex.es/termo/wp-content/uploads/2009/03/tema3-09.pdf>

MOLINA, Adolfo. Los semilleros de investigación y los seminarios. *Revista Unipluri/versidad*. Universidad de Antioquia. Vol. 2, nro 3. 2002. ISSN 1657-4249.

ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS. Realidad, Impacto y Oportunidades de los Biocombustibles en Guatemala (Sector Productivo). (Recuperado 29 abril 2020). Disponible en: <http://www.oas.org/dsd/Energy/Documents/SimposioG/3>

ORTIZ, J. M. Fundamentos de la Intercambiabilidad del Gas Natural. *Revista MET&FLU*, nro. 9, 2014. pp 6-15. ISSN: 2145-5716.

PÉREZ PUENTES, J. R. El seminario alemán como una estrategia pedagógica para el estudiante. *Revista Cultura, Educación y sociedad*. nro 1 2010. pp. 107-112. ISSN: 2145-9258.

SCALA, F. Fluidized bed technologies for near-zero emission combustion and gasification; 80 High street, Sawston, Cambridge CB22 3HJ, UK, Woodhead Publishing Limited, 2013. 1056 p. (Series in Energy). ISBN 978-0-85709-541-1

SCHLUMBERGER. Gravedad API - Schlumberger Oilfield Glossary. (Recuperado 30 enero 2020). https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/a/api_gravity.aspx

SOUZA-SANTOS, M. L de. Solid Fuels Combustion and Gasification, Segunda edición. 6000 Broken Sound Parkway NW Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2010, p 488. ISBN 978-1-4200-4749-3.

SPLIETHOFF, H. Power Generation from Solid Fuels. Heidelberg. Arcisstrasse 21 80333 Munchen, Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, p 699. ISBN 978-3-642-02855-7.

SUBRAMANIAN, K. A. *Biofueled Reciprocating Internal Combustion Engines*; Taylor & Francis grouo LLC: 6000 Broken Sound Parkway NW Boca Raton, p 255, 2018. ISBN 978-1-138-03318-4.

TILLMAN, D. The combustion of solid fuels and wastes. Academic press Inc, San Diego, California, 1991, p 378. ISBN: 0-12-691255-6.

URNS, S. An introduction to combustion, concepts and aplications. McGraw Hill Companies Inc, New York, 2012, p 715. ISBN 978-0-07-38019.

UNIVERSIDAD DE BURGOS. Manual de calderas industriales [En línea]. Recuperado en 2019-10-30. Disponible en: <https://temariosformativosprofesionales.files.wordpress.com/2013/10/calderas-univ-burgos.pdf>

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Lineamientos para el seminario de investigación como modalidad para el desarrollo del trabajo de grado. Vicerrectoría Académica, p 16. 2007. [En línea]. Recuperado en 2018-09-04. Disponible en: https://www.uis.edu.co/webUIS/es/trabajosdegrado/documentos/Jul2_trabajos_grado_doc3.pdf

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Combustibles y Combustión. Llamas premezcladas. Escuela técnica superior de ingenieros industriales. (Recuperado 29 diciembre 2019). Disponible en: http://fluidos.etsii.upm.es/faculty/Jaime_Carpio/Docencia/llamas_premezcla.pdf

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. El seminario como práctica para la formación integral. (Recuperado 04 de octubre 2018). Disponible en: https://www.uv.es/eees/archivos/sem_inves

VAKKILAINEN, E. K. Direct and Grate Firing of Biomass. En: Steam Generation from Biomass; The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, United Kingdom. Butterworth-Heinemann, Elsevier 2017. pp 203–210. ISBN 978-0-12-804389-9.

XU, Q.; XU, Y. Quenching study of two-dimensional fractional reaction–diffusion equation from combustion process. *Revista Computers and Mathematics with Applications*. Vol. 78, Publicación 5. pp 1490-1506. ISSN: 0898-1221. 2019