ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA
DE MINAS Y ENERGÍA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DEL CARBÓN Y SU HOMOGENEIZACIÓN MEDIANTE ANALISIS DE SENSIBILIDAD PARA MENOR AFECCIÓN EN LA CENTRAL TÉRMICA

Para acceder al Título de

GRADUADA EN INGENIERIA DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

Autora: Yuliya Voloshyna

Tutor : Antonio Galván Diez

Coordinador: Raúl Husillos Rodríguez

Diciembre - 2015

Quisiera expresar mi agradecimiento tanto a Raúl Husillos Rodríguez como a Antonio Galván Diez por el esfuerzo, tiempo dedicado y la disposición mostrada para que el presente trabajo haya podido ser llevado a cabo en tiempo y forma.

A mi familia, mis amigos y mis compañeros Cristian, Pablo, José Luis y Lara por constante apoyo.

INDICE

Capítulo 1: Introducción 8
Capítulo 2: Objetivos 12
Capítulo 3: Estado de Arte 14
3.1. Descripción general del carbón 15
3.1.1. Carbón y su origen 15
3.1.2. Importancia de carbón en el pasado y actualidad 24
3.1.3. Producción y Mercado global del carbón 28
3.1.3.1. Reservas mundiales y producción de carbón 28
3.1.3.1.1. Métodos de extracción de carbón 31
3.1.3.1.1.1. Minería subterránea 31
3.1.3.1.1.2. Minería a cielo abierto 33
3.1.3.2. Mercado global del carbón 35
3.1.3.2.1. Mercado mundial 35
3.1.3.2.2. Mercado Español 40
3.1.3.2.2.1. Distribución geográfica de producción 42
3.1.4. Combustión y productos producidos 45
3.1.5. Debate ambiental de la minería de carbón 49
3.1.5.1. Contaminantes 49
3.1.5.2. Problemática subterránea 50
3.1.5.3. Metano 52
3.2. Parámetros más representativos 53
3.2.1. Ensayos normalizados de carbón 54
3.2.1.1. Análisis inmediato 54
3.2.1.2. Análisis Elemental 56
3.2.1.3. Análisis petrográficos 59
3.2.2. Cenizas y análisis químico 60
3.2.3. Propiedades del carbón y las cenizas 62
3.2.3.1. Propiedades físicas 62
3.2.3.2. Propiedades mecánicas 62

3.3. Efectos generales de los parámetros más representativos 65
3.3.1. Producidos en el comportamiento del carbón 65
3.3.1.1. Fusibilidad de las cenizas 65
3.3.1.2. Factores “slagging” y “Fouling” 66
3.3.1.3. Resistividad y conductividad del carbón y las cenizas 69
3.3.2. Efectos producidos en los elementos de la central térmica 71
3.3.2.1. Definición de la central térmica 71
3.3.2.2. Descripción de los circuitos y elementos principales de la instalación 73
3.3.2.2.1. Los elementos principales de la instalación 73
3.3.2.2.2. Los circuitos de la instalación 81
3.3.2.3. Elementos afectados más señalados de la central 84
3.3.2.3.1. Generador de Vapor 84
3.3.2.3.2. Efecto en Electrofiltro 91
3.4. Estado de la investigación científica. 94
Capítulo 4: Descripción de los datos del estudio 101
4.1. Carbón a estudiar 102
4.2. Reservas de carbón 105
4.2.1. Características de la cuenca Pechora 106
4.2.2. Características de la cuenca minera de Kuznetsk (Kuzbass) 107
4.3. Situación de los carbones analizados 109
4.3.1. Localización geográfica punto de partida 109
4.3.2. Clima 110
4.3.2.1. Clima global 110
4.3.2.2. Clima en zona de Múrmansk 111
4.3.3. Localización geográfica en destino y transporte 113
Capítulo 5: Metodología 116
5.1. Introducción 117
5.2. Metodología a seguir 117
5.2.1. Parte I 117
5.2.2. Parte II 118

5.2.2.1. Explicación Teórica del Análisis de Sensibilidad 118

5.2.2.2. Explicación Práctica 119

Capítulo 6: Resultados 122

Capítulo 7: Conclusiones 138

Capítulo 8: Bibliografía 140

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Tipos de turberas Fuente: http://es.slideshare.net/takikmad/ddd-1692229 17
Ilustración 2: Formación de Carbón. 18
Ilustración 3: Evolución metamórfica del carbon 21
Ilustración 4: Imagen de la Revolución Industrial. Fuente: www.google.es/imagenes . 24
Ilustración 5: Reservas mundiales de carbon en 2010. Fuente: http://ustednoselocree.com/2010/11/19/nature-pico-energetico-carbon/ 29
Ilustración 6: Minador continúo. Fuente: www.cat.com 32
Ilustración 7: Maquinaría pesada, pala. Fuente: www.cat.com 33
Ilustración 8: Principales productores mundiales de carbón. 35
Ilustración 9: Principales flujos comerciales inter-regionales de carbon en los años 2002-2030 (Unidad Mt). Fuente: Instituto mundial de carbón. Una vision general de carbón 38
Ilustración 10: Valor de produccion minera por comunidades autónomas. Fuente: Ministerio de Industria, Energia y Turismo. 42
Ilustración 11: Resumen Produccion de Carbón 2013 43
Ilustración 12: Produccion de carbón en España, años 2005 -2013(miles de toneladas). Fuente: Ministerio de Industria, Energia y Turismo. 43
Ilustración 13: Diagrama de Combustión de combustible fósil o biomasa. 45
Ilustración 14: Problematica de incendios. Incendios subterraneos de la mina, localidad Jharia (India) provocado desde 1916. Fuente: www.google.es/imagenes/India/incendios_mina 51
Ilustración 15: Ciclo abierto de Rankine. Basico de cualquier central térmica Fuente: www.catedu.es 71
Ilustración 16: Campo magnético de un generador. Fuente: www.google.com/imagenes 77
Ilustración 17: Componentes de un generador. Fuente: www.google.com/imagenes .. 78
Ilustración 18: Procedimiento de Electrofiltro. Fuente: mecaingenieriaunet.blogspot.com 79
Ilustración 19: Definición de zonas en una caldera basica. Fuente: www.empresaeficiente.com 85
Ilustración 20: Efecto Slagging. Fuente: www.c4combustion.com 85
Ilustración 21: Efectos Fouling en la caldera. Fuente: technoindustria.wordpress.com 86
Ilustración 22: Corrosión tipica de tubo 18Cr-8Ni del 2º sobrecalentador de una caldera industrial. 88
Ilustración 23: Buena recolección de partículas. Fuente: www.newprocess.cl 92
Ilustración 24: Busqueda general en Scopus 95
Ilustración 25: Busqueda acotada a los años recientes 96

Ilustración 26: Localización de Pechora. Fuente: www.google.com **106**
Ilustración 27: Localización de Kuznetsk (Kusbass). Fuente: www.google.com **107**
Ilustración 28: Situación geográfica. Fuente: www.google.com **109**
Ilustración 29: Transporte de carbone. Fuente: www.google.com/imagenes **113**
Ilustración 30: Destino de los carbones traídos del puerto de Múrmansk. Fuente: www.google.maps.com **114**

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Formación de los macérales de los carbones en función de medio y las sustancias vegetales de procedencia **21**
Tabla 2: ANEXO I Valores límites y los umbrales de alerta de Dióxido de azufre (SO_2) .. **47**
Tabla 3: ANEXO II Valores límites y los umbrales de alerta de Dióxido (NO_2) de Nitrogeno y Óxidos de Nitrogeno (NO_x) **48**
Tabla 4: Resumen de las relaciones empiricas para Slagging y Fouling **67**
Tabla 5: Limites de Resistividad en un Electrofiltro **70**
Tabla 6: Criterio de selección: "coal, sensitivity analysis, parameters of coal" **97**
Tabla 7: Criterio de selección "Coal, Coal Effects, Properties, Optimization Process, Fly Ash" **99**
Tabla 8: Datos de los carbones C1 – C14 ..... **103**
Tabla 9: Datos de los carbones C7- C14 ..... **104**
Tabla 10: Promedio de temperaturas anuales en Múrmansk. Fuente: pogoda.ru.net **112**
Tabla 11: Variables notables de carbones C1 - C7. ..... **123**
Tabla 12: Variables notables de carbones C8 - C14. ..... **124**
Tabla 13: Escala de ponderación elegida. **124**
Tabla 14: Restricciones y valores máximos /mínimos de las variables. **124**
Tabla 15: Análisis de sensibilidad del Contenido en Cenizas. **125**
Tabla 16: Análisis de sensibilidad de Azufre. **126**
Tabla 17: Análisis de sensibilidad de la Humedad. **127**
Tabla 18: Análisis de sensibilidad de Materia Volátil. **128**
Tabla 19: Análisis de sensibilidad del Poder Calorífico. **129**
Tabla 20: Análisis de sensibilidad Índice Slagging. **130**
Tabla 21: Análisis de sensibilidad Fouling. **131**
Tabla 22: Análisis de sensibilidad de Fe2O3 y CaO. **132**
Tabla 23: Análisis de sensibilidad de Na2O. **133**
Tabla 24: Análisis de sensibilidad de Resistividad. **134**
Tabla 25: Matriz de Trazabilidad. **135**
Tabla 16: Matriz de Trazabilidad simplificada. **136**
Tabla 17: Resultado de comprobación con ecuación general y variación puntual de ecuación general. **137**

Capítulo 1: Introducción

Históricamente todo está relacionado con la energía, desde la Revolución Industrial, a partir de la cual se dio mucho valor a la extracción y utilización de carbón. La introducción de la máquina de vapor de James Watt fue uno de los pases definitivos del éxito de la Revolución industrial, de esta manera aumentando la capacidad de producción. Con el tiempo surgieron nuevos avances tecnológicos de la época, como barcos y ferrocarriles a vapor, invención del motor de combustión interna y la energía eléctrica. El carbón siempre ha sido uno de los principales combustibles convencionales a utilizar en todo momento, aunque con el tiempo empezaron a llegar sus sustitutos de energía convencional como petróleo y gas natural. Con la llegada de energías renovables, energía que se obtiene a partir de fuentes naturales y por lo general es más limpia, autóctona y sin residuos, las energías convencionales han decaído aún más.

La Estrategia de Unión Europea tampoco ayudó mucho al consumo de las energías convencionales, ya que sus objetivos 20-20-20 consisten en reducir el consumo reducción del 20% de consumo para el año 2020 junto con un 20% de emisiones de gases que provocan el efecto invernadero, de otra manera alcanzar un 20% de fuentes renovables en el consumo para incrementar la eficiencia energética con el fin de ahorrar un 20% de consumo energético de la Unión Europea. Esto se debe en gran parte a las previsiones un tanto catastróficas que aparecen en la prensa sobre la evolución del clima a lo largo del tiempo, incluidas conferencias y ponencias científicas. Está claro que la actividad industrial y las variaciones de la actividad solar se encuentran entre los principales factores al cambio, por lo que es necesario seguir el Plan Estratégico Europeo para remediar de mejor manera los gases que producen el efecto invernadero. Estos gases están reunidos en el protocolo de Kioto y son los siguientes: Dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido nitroso (N_2O), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC), Hexafluoruro de azufre (SF_6).

La respuesta a las directrices fijadas por Europa, la política española se ha consolidado, entre otras, a través de diversos planes:

Plan de Acción 2005- 2007, Plan de Acción 2008-2011 y 2011-2020 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España, Plan de Energías Renovables 2005-2010, Plan de Energías Renovables 2011-2020, Plan de Activación 2008-2011, o la "Planificación energética indicativa 2012-2020". Pero los avances en el logro de los objetivos de la Estrategia Europea 2020 han sido desiguales hasta las fechas de hoy y han estado marcados por la "crisis económica europea" principalmente. Esta crisis ha tenido un claro impacto sobre el empleo y los avances hacia la consecución de los demás objetivos, con la excepción de su efecto en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Se han observado tendencias estructurales positivas en el uso de una combinación de energías sostenibles y la reducción de la intensidad de combustibles fósiles con el objetivo d producir la misma cantidad de PIB. La Agencia Europea del Medio Ambiente cree "muy improbable" que España consiga que un 20% de su energía proceda de fuentes limpias, ya que en estos momentos se está en una clara ralentización del objetivo cuando en el año 2012 se ha superado el objetivo del 11% impuesto.

Por estos motivos el carbón sigue siendo una de las principales fuentes de energía eléctrica. Pero hoy en día las centrales térmicas siguen la normativa y se preocupan por el futuro del planeta desarrollando, en los últimos años, nuevas centrales que tratan de aumentar el rendimiento y reducir las emisiones contaminantes, mediante la combustión de carbón en lecho fluido que podría permitir un rendimiento de hasta el 50% disminuyendo a su vez a emisión de anhídrido sulfuroso. El lecho fluido está formado por el combustible en pedazos, pulverizado con 2-5% del peso total del lecho y el lecho propiamente dicho de cenizas, piedra caliza, material adicional. El lecho fluido sustenta el combustible sólido mientras se bombea aire hacia arriba durante la combustión con el resultado de obtener la formación de remolinos, que favorecen la mezcla del gas y del combustible.

También otra de las tecnologías que están en auge es la de los ciclos combinados que utilizan como combustible gas de síntesis obtenidos mediante la gasificación de carbón.

Y por último respecto a las emisiones a la atmosfera, en muchos casos es útil añadir unos precipitaderos electrostáticos, o también llamado electrofiltros. Su función es reducir la contaminación atmosférica producida por humos y otros desechos industriales gaseosos. Son muy efectivos y pueden eliminar fácilmente finas partículas como polvo y humo de la corriente de aire.

Está claro que no basta seguir la normativa, desarrollar nuevas tecnologías y tener en condiciones la instalación, ya que en muchas ocasiones la responsabilidad se asienta en la materia prima, el combustible. Todo empresario tiene un deseo, conseguir un combustible "barato, bonito y bueno" para su instalación. Pero en mayoría de las ocasiones es inviable, no existe un combustible acorde con estos tres términos, no se puede conseguir una turba pero con color y propiedades de antracita. En otras ocasiones se solventa el problema realizando mezclas de carbones, en la mayoría de los casos si se tiene una hulla de altas características y propiedades y otra hulla de bajas propiedades, lo que se hace es añadir cantidades proporcionales de cada una de ellas para ceñirse a la normativa y de esta manera ahorrar presupuesto. Pero esto funciona en el caso de dos, como mucho tres combustibles y *¿si se tiene más de cinco y de diez? ¿Y si todos tiene diferentes propiedades? ¿Qué se puede hacer con tantos?*

Para encontrar las respuestas a estas preguntas se fórmula el presente estudio, basándose en el estudio de carbón junto con sus propiedades, pudiendo realizar una homogeneización de mezcla de carbones acordes a exigencias empresariales, mediante el análisis de sensibilidad.

Capítulo 2: Objetivos

El presente estudio trata de analizar unos datos de carbones utilizados en la central térmica de manera que sus efectos negativos sean los menores posibles en las instalaciones.

Para ello, en un principio se realizará una descripción de los datos a estudiar:

- Definir las variables a utilizar
- Relacionar dichas variables con los análisis que existen para el estudio de los carbones
- Describir brevemente los conceptos técnicos y características específicas de cada análisis
- Acotar los parámetros que han de cumplir los datos

También trata de utilizar las ecuaciones de los parámetros significativos para deducir y/o predecir el comportamiento de cada carbón en un elemento específico de la instalación.

Además se realizara una investigación científica, basándose en la lectura de algunos artículos científicos que puedan tener relación con el presente estudio.

Lo último y más importante, relacionar todas las variables y los datos de los carbones en común, aplicando un criterio establecido basándose en la investigación realizada para poder obtener una mezcla homogénea de todos los carbones que posibiliten su uso en una central y por otra parte estén cumpliendo con las restricciones legales.

Capítulo 3: Estado de Arte

3.1. Descripción general del carbón

3.1.1. Carbón y su origen

El carbón se considera como una roca sedimentaria de color oscuro, muy rica en carbono y contiene cantidades variables de otros elementos como hidrogeno, azufre, oxígeno y nitrógeno. Es principalmente utilizada como combustible fósil.

El carbón se origina por la descomposición parcial de vegetales que se acumulan en las zonas pantanosas, lagunares o marinas a poca profundidad. Estos restos al depositarse quedan cubiertos de agua, por lo cual están protegidos del aire que los degrada. Mediante una acción anaeróbica y unos cambios biológicos iniciales y posteriores efectos mecánicos de presión y temperatura en el seno de los sedimentos los depósitos se convierten en carbón.

El carbón se caracteriza por ser el combustible fósil del que existe mayor cantidad de recursos, aproximadamente un 75% del total de las reservas del planeta.

Antes de que se forme el carbón se necesita una turbera y unas condiciones favorables, que son las siguientes:

- ***Clima***: el clima controla la producción de materia vegetal, que es el constituyente principal del carbón, por lo que en zonas aptas para el desarrollo de abundante flora, que son las áreas climáticas tropicales o subtropicales, habrá mayores posibilidades de formación de carbón.

- ***Ambiente tectono-sedimentario***: controla la subsidencia, los aportes de detríticos y la velocidad de enterramiento:
    - Subsidencia: para que se pueda acumular el carbón, hay que tener un equilibrio entre la producción de materia orgánica y la subsidencia, puesto que si ésta es muy grande, se diluirá la materia orgánica, mientras que si es escasa o nula subsidencia, la materia orgánica estará expuesta durante mayor tiempo a las inclemencias bioclimáticas.

- Aporte de detríticos: si se tiene un gran aporte de materiales detríticos, se encontrara con una importante dilución de la materia orgánica y además, será un carbón que tras ser sometido a combustión producirá muchas cenizas y será de mala calidad. De esta manera es mejor no tener aportes de detríticos.

- Velocidad de enterramiento: un enterramiento rápido minimizará los efectos de la degradación bioquímica y favorecerá por tanto la preservación de la materia orgánica.

- ***Ambiente físico-químico:*** controla la humedad, la acidez y el potencial de óxido-reducción:

  - Humedad: es controlado por la altura desde la superficie al nivel freático. Para la formación de carbón, la altura optima es en la que se tiene un nivel freático sobre la superficie o muy próxima a ella.

  - Acidez: la acidez controla la actividad bacteriana, disponible de nutrientes y descomposición química, por lo que no conviene que sean condiciones favorables para el desarrollo de vida, ni muy desfavorables como para degradar el sedimento orgánico.

  - Potencial de óxido-reducción: bajo condiciones oxidantes existe fuerte degradación de la materia orgánica y por ello son favorables para la formación del carbón las condiciones reductoras, que propician la conservación de la materia orgánica.

Los tipos de turberas que podemos encontrar se clasifican según siguientes parámetros:

1. Altura del nivel freático:
    a. Bajas - reotróficas: el nivel freático esta sobre la superficie de la turbera
    b. De transición – flotantes: la turbera está formada por vegetación flotante unida a la orilla del lago o charca.
    c. Elevadas – ombotróficas: el nivel freático esta sobre la superficie de la turbera.

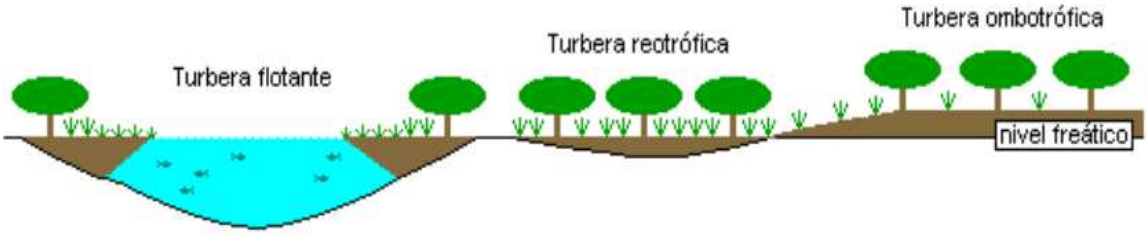


Ilustración 1: Tipos de turberas Fuente: http://es.slideshare.net/takikmad/ddd-1692229

2. Vegetación dominante:
    a. Arbóreas – en pantanos
    b. Herbáceas

3. Localización geográfica:
    a. Parlálica: en zonas costeras, litorales.
    b. Limnica: en zonas lacustres.
    c. Telmática: en zonas terrestres.

4. Aporte de nutrientes
    a. Eutróficas: con abundantes nutrientes.
    b. Mesotróficas: con nutrientes escasos.
    c. Oligotróficas: con nutrientes muy escasos.

La formación del carbón se produce en la **etapa de carbogenesis**, con dos fases diferenciadas como bioquímica, en la que se determina el tipo del carbón y geoquímica o metamórfica que condiciona el rango del carbón.

Entonces la carbogenesis es el proceso de transformación por el cual se forma el carbón a partir de las sustancias vegetales. En general son plantas superiores como madera, y en menor grado, organismos inferiores como algas, esporas. Las sustancias vegetales se acumulan en las zonas pantanosas, lagunares o marinas a poca profundidad.

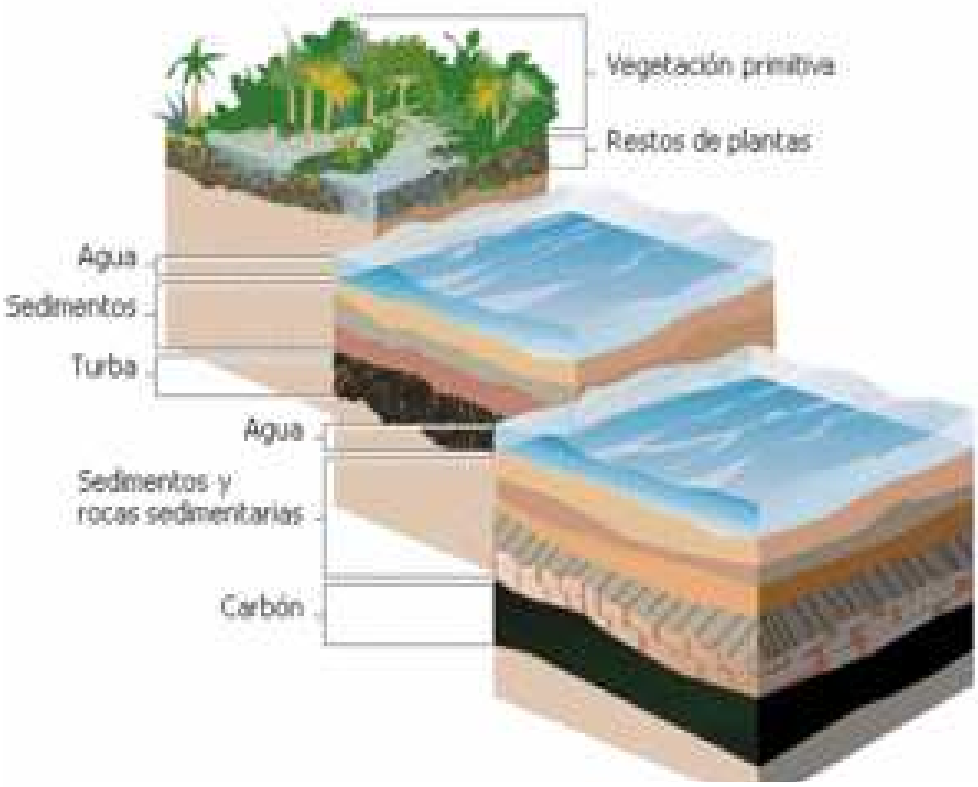


Ilustración 2: Formación de Carbón.

*Fuente: **http**://docentes.educacion.navarra.es/metayosa/CTMA/Recursos5.html*

- ***Fase bioquímica***

Para que se produzca la formación de un carbón las sustancias vegetales de las que procede deben haber sido protegidas de las destrucciones oxidativa y microbiana. Por este motivo la génesis del carbón ha debido de haber tenido lugar en zonas pantanosas donde el agua cubrió o saturo los depósitos vegetales, limitando el acceso de oxigeno e inhibiendo la acción de los microorganismos que producen la putrefacción. Esta agua tuvo que estar estancada, de lo contrario no se produciría una acción anaeróbica y los depósitos tomarían el contacto con el oxígeno.

Generalmente, el proceso de descomposición de estas sustancias vegetales depende del medio en que se desarrolla, principalmente a los siguientes tres factores: contenido en nutrientes para bacterias y hongos, oxígeno y pH. Estas condiciones determinan, el modo de descomposición y la clase de sustancias vegetales sobre las que se produce. Las sustancias que son destruidas completamente no originan carbón.

La función de estos parámetros se explica por varias teorías mediante la formación de los macérales. Estos son unos agregados orgánicos con propiedades físicas y químicas distintivas, en los que se distribuye la fracción orgánica del carbón. La presencia de maceras puede determinar por su composición diferentes tipos del carbón. Por tanto, los macérales son los constituyentes del carbón, en su fracción orgánica, en el mismo sentido en el que los minerales son constituyentes de las rocas inorgánicas.

Los tamaños de los maceras pueden ser desde 2 micras a varios centímetros, y a diferencia de los minerales, no están caracterizados por composición químicas bien definidas y uniformidad en el grado de cristalización.

Existen tres grupos de macérales del carbón en función de su origen:

1. **Vitrinita**: es producida a partir de madera, refiriéndose a las partes estructurales de las plantas como tallos, troncos, raíces y hojas vasculares. Esta es derivada de los constituyentes químicos principales como celulosa y lignina. El proceso de descomposición de la madera se produce por la acción de bacterias aerobias cerca de la superficie del depósito y bacterias anaerobias a una mayor profundidad, mezclando estas dos acciones se origina turba. La vitrinita es el maceral con contenido en los carbones existentes, llegando a ser mayores de 80%, este es responsable de las propiedades de coquizado.

2. **Inertita:** es una procedencia bastante similar a la de la vitrinita, pero con diferente formación, ya que los compuestos ligno-celulosicos originales han sufrido previamente proceso de deshidrogenación motivado por los incendios o la acción bioquímica. El proceso de descomposición posterior es un proceso completamente aeróbico por la acción de distintos hongos y bacterias. Este material se encuentra habitualmente muy dividido y mezclado con vitrinita.

3. **Exinita o Liptinita:** tiene origen en las sustancias vegetales más resistentes a la degradación, como las resinas, cutículas, esporas, pólenes y algas cuyo contenido en hidrogeno es alto. En esta ocasión el proceso de formación es anaerobio, también llamado putrefacción.

Tabla 1: Formación de los macérales de los carbones en función de medio y las sustancias vegetales de procedencia

MACERAL	SUSTANCIAS VEGETALES DE PROCEDENCIA	CARACTERISTICAS DEL MEDIO
Vitrinita	Madera: troncos, raíces y hojas	Anaerobio/Aerobio
Inertita	Madera, coquizada o degradada bioquímicamente, restos de hongos	Aerobio
Liptinita	Resinas, cutículas, esporas, pólenes, algas	Anaerobio

- ***Fase geoquímica***

Esta fase se termina cuando los depósitos se encuentran a una profundidad superior a 10 metros. La fase determina el rango o evolución metamórfica del carbón. Hoy en día se considera que la temperatura ha desempeñado un papel importante en la evolución geoquímica del carbón, se ha observado que la temperatura aumente conforme la profundidad de la capa de 3 a 5ºC cada 100 m. Es posible que altas temperaturas hayan sido suficientes para que reacciones químicas extremadamente lentas hayan transformado la materia fósil en carbón.

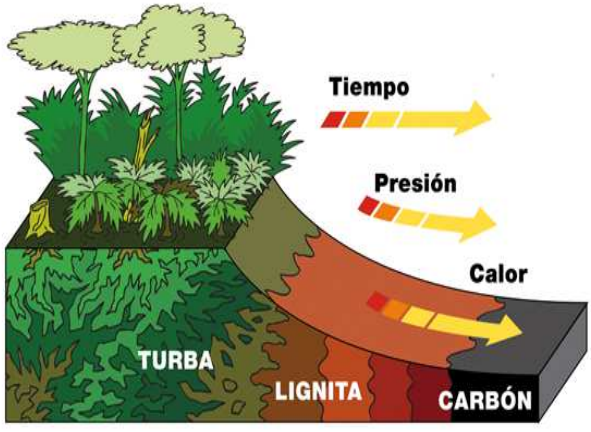


Ilustración 3: Evolución metamórfica del carbon

Fuente: http://tratamientodecarbonrogelioamaya.blogspot.com

El resultado de este proceso es el aumento en el poder calorífico y concentración de, así como la perdida de O, H, H_2O y materiales volátiles, aumento de la compactación,

dureza, densidad y reflectancia. Aumenta el rango del carbón de lignito, hulla, antracita, matancita y grafito.

Cuando el rango del carbón aumenta se producen los siguientes efectos que son utilizados para determinar la clase del carbón:

- Aumento del contenido en carbono
- Aumento de las estructuras aromáticas
- Aumento del poder calorífico
- Disminución del contenido en volátiles
- Disminución del contenido en oxigeno

Tabla 2: Clases y rangos del carbón

		Humedad %	% Materia Volatil	Potencial Calorifico	% de Carbon	Reflectancia de la Vitrinita
Turba		> 75	75-55	5000-3000	60-26	0,2
Lignito pardo		30-60	55	6000-4000	70	0,4
Lignito negro		5	40	7000-6000	80	0,6
Hulla	**AV**	3	30	>7000	85	1
	MV	1	20		90	1,5
	BV	1	15		91	2
Antracita		2	2	8600	98	4

Turbas: resultado de depósitos no consolidados de restos de plantas semicarbonizadas, en un ambiente saturado de agua y con un contenido elevado de humedad, por lo menos un 75 %. Se considera que constituyen una etapa inicial en el desarrollo de carbón. Sus proporciones en carbón y oxigeno son, 60% y 30 % respectivamente. Una vez secas las turbas arden espontáneamente.

Lignitos: constituyen el siguiente estado en el proceso de carbonización. Suelen tener color pardo o negro, y un elevado porcentaje en productos volátiles. Su contenido en humedad puede llegar al 60%.

Hullas: constituyen el tipo de carbón que se utiliza en gran medida en producción de energía como en la industria metalúrgica. Las hullas son de color negro – brillante y presentan un amplio rango en el valor de las materias volátiles.

Antracitas: es el carbón de más elevado grado metamórfico y en el que el contenido de carbono fijo oscila entre el 92% y 98%. Es duro, negro, con un lustre semimetálico y de fractura semiconcoidea. La antracita se inflama con dificultad y arde con una llama azul corta y sin humo.

3.1.2. Importancia de carbón en el pasado y actualidad

Se conoce bastante el papel importante que desempeño el carbón en la 1ª Revolución Industrial. **Desde el siglo XVII** las necesidades de metales para los instrumentos agrícolas y la demanda de maquinaria, provocaron el desarrollo de la industria metalúrgica y siderúrgica. Por lo cual se pudo encontrar en carbón el sustituto de la madera para realización de primeras fundiciones, y más tarde se sustituyó el carbón vegetal por el carbón de piedra. El carbón de piedra y el coque se convirtieron en la base energética de la industria siderúrgica y de la maquinaria de vapor fue el gran invento tecnológico que supuso una de las mayores contribuciones al progreso y transformación de la sociedad. Las grandes industrias empezaron a situarse cerca de los yacimientos o minas de carbón para abarcar los puntos estratégicos para la producción. Más tarde aparecieron las primeras locomotoras y los ferrocarriles, luego se sustituyeron las velas de los barcos por las instalaciones de vapor que funcionaban con el combustible como carbón. Esto también se conoce como la Revolución de los transporte.

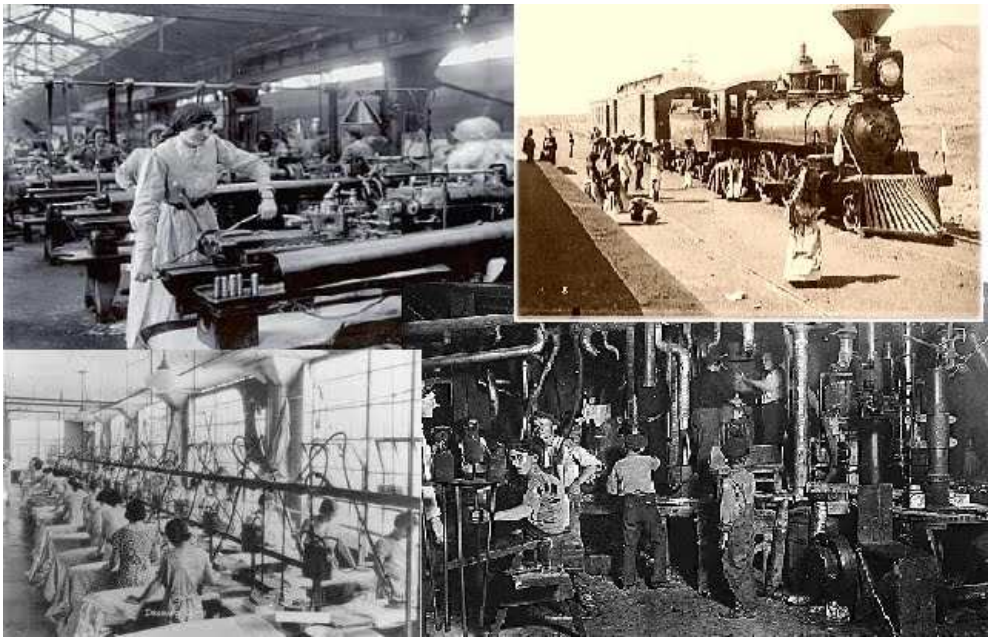


Ilustración 4: Imagen de la Revolución Industrial. Fuente: www.google.es/imagenes

Se trató de mejorar y construir carreteras, canales pensados para el transporte de mercancías pesadas. Debido a fácil acceso el precio del transporte ha disminuido.

La idea de construir caminos para ferrocarriles, caminos de hierro o railes de hierro por donde circulen los vagones, era antigua. En este caso como Revolución se define el cambio en la maquinaria, como las máquinas de vapor, que eran capaces de arrastrar a sí misma y a los vagones con carga. Las primeras máquinas de vapor fueron inventados por Eduard Somerset en 1663. A partir del modelo de Somerset se llevó a cabo la construcción de un modelo denominado Vauxhall en 1665 en Londres, como Somerset no pudo recaudar capitales suficientes para vender y construir su máquina, su invención fue atribuida a Thomas Savery en 1668.

Con paso de los años los niveles de producción han subido notablemente, como por ejemplo los bienes textiles alcanzaron sus máximos niveles en la sociedad, y los transportes se realizaron con una velocidad y una fiabilidad como no se había conocido hasta entonces. Sin el uso generalizado y cada vez más eficiente del carbón mineral, el despliegue de esa Revolución Industrial no habría sido posible.

Actualmente se consume más de 4.050 Mt del carbón al año debido a que hay una dependencia con la industria en la **generación de electricidad**. El acceso a la energía, y en especial a electricidad, es una fuerza impulsora de desarrollo económico y social. Un acceso asequible y fiable a la electricidad es esencial para mejorar la salud pública, proporcionar servicios de información y educación.

El carbón suministra en la actualidad el 39% de la electricidad de todo el mundo. En muchos países, este papel es mucho más relevante. La posibilidad de un suministro de bajo coste de carbón en los países desarrollados y en los que están en vías de desarrollo ha sido vital para lograr unos niveles altos de electrificación. Por ejemplo en China unos 700 millones de personas se han conectado a la red eléctrica durando últimos 15 años. El país está ahora electrificado en 99% siendo el 77% de esta electricidad producida en centrales eléctricas de combustión de carbón.

Por otra el carbón es esencial para la **producción de hierro y acero**. Cerca de 65% de la producción de acero en todo el mundo proviene de hierro fundido en altos hornos que utilizan carbón. Podemos encontrar el acero en la vida: coches, trenes, edificios, barcos, puentes, neveras, equipos médicos.

En varios países el carbón se convierte en un combustible líquido, este proceso se denomina **licuefacción del carbón**. El combustible líquido se refina para producir combustible para transporte y otros productos derivados del petróleo, como plásticos y disolventes. Esencialmente existen dos métodos de licuefacción:

- Licuefacción directa: en la que el carbón se convierte en combustible líquido en un proceso
- Licuefacción indirecta de carbón: en la que el carbón primero se gasifica y después se convierte en líquido.

Mediante este proceso el carbón puede actuar como sustituto de petróleo. Y la rentabilidad de la licuefacción depende del precio del petróleo, al ser una economía de mercado abierta debe competir. Si el precio del petróleo es alto la licuación pasa a ser competitiva.

Otro de los usos habituales es en la construcción, el **cemento**. Este se logra mediante una mezcla de carbonato cálcico, silicio, oxido férrico y alúmina. El carbón se utiliza como la fuente de energía para la producción de cemento. En ocasiones también se utilizan las cenizas de carbón como unos de los componentes para la mezcla de cementos.

Ya no solo es importante el uso del carbón en las centrales térmicas sino en las **refinerías de alúmina**, los fabricantes de papel y muchas de las industrias químicas y farmacéuticas. También la masa de carbón refinada se utiliza en la **fabricación de productos químicos**, como la creosota, la naftalina, el fenol y el benceno. El gas de amoniaco recuperado de los hornos de coque se utiliza para fabricar sales de amoniaco, ácido nítrico y fertilizantes agrícolas. Miles de productos diferentes tienen al carbón o alguno de sus principales subproductos como componentes: jabón, aspirina, disolventes, tintes, plásticos y fibras, como el rayón y nailon.

El carbón forma una parte esencial de producción de **productos especializados** como:

- Carbono activo: utilizado en filtros de agua y aire, así como en maquinaria de diálisis.

- Fibra de carbono: un material de refuerzo extremadamente resistente y ligero utilizado en construcción, bicicletas de montaña y raquetas de tenis.
- Metal de silicio: utilizado para fabricar silicios y silanos, que a su vez se utilizan para la fabricación de lubricantes, repelentes de agua, resinas, cosméticos, champú y pasta de dientes

En definitiva, tanto la generación de los siglos anteriores como la generación del siglo XXI son dependientes del carbón. Ya sea en forma de electricidad, combustible o los productos que se producen a partir de él. Siendo el carbón una de las energías no renovables, ninguna otra podrá sustituirlo con un potencial superior.

3.1.3. Producción y Mercado global del carbón

3.1.3.1. Reservas mundiales y producción de carbón

Los recursos de carbón de la Tierra son abundantes, pero están distribuidos de forma irregular. Se calcula que unas reservas de más de un billón (10^{12}) de toneladas recuperadas, de los que más de dos tercios se encuentran en Estados Unidos, los países de la antigua Unión Soviética y China.

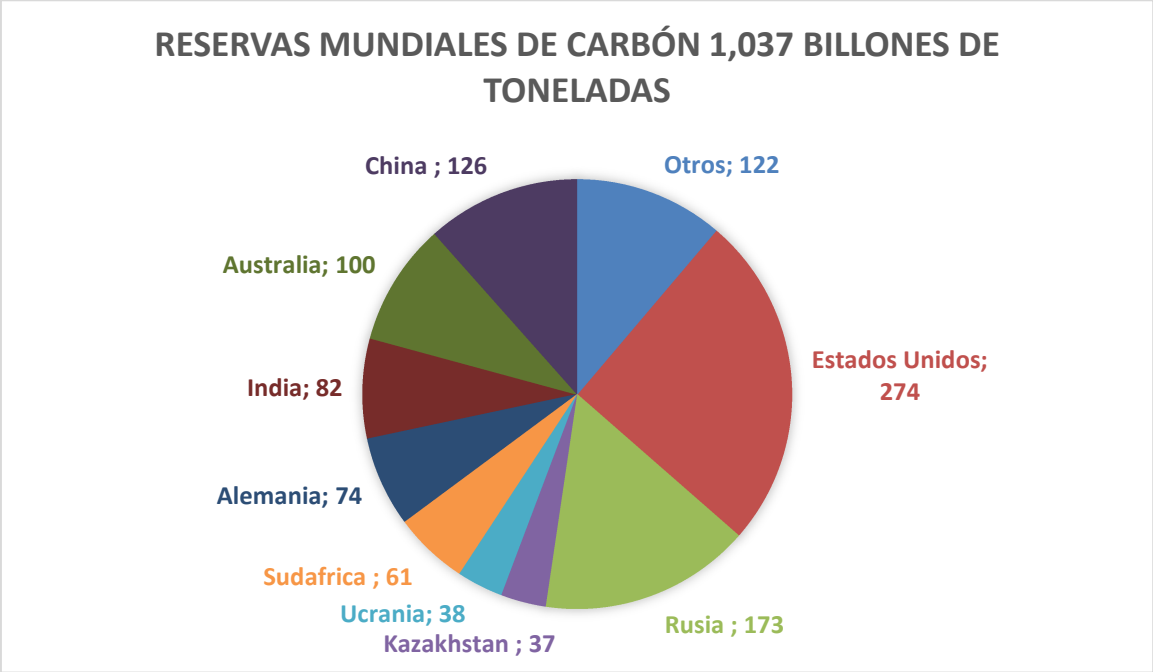


Figura 1: Reservas recuperables de carbón, por países, en miles de millones de toneladas, a finales del siglo XX.

Otros países que tienen reservas importantes son Alemania, Polonia, Australia y Sudáfrica. Las reservas carboníferas en el subcontinente sudamericano presentan Colombia, Chile y Brasil respectivamente. La producción de carbón es, de alguna forma, correlativa con las reservas, ya que Estados Unidos, la antigua Unión Soviética y China agrupan aproximadamente el 55% del total mundial.

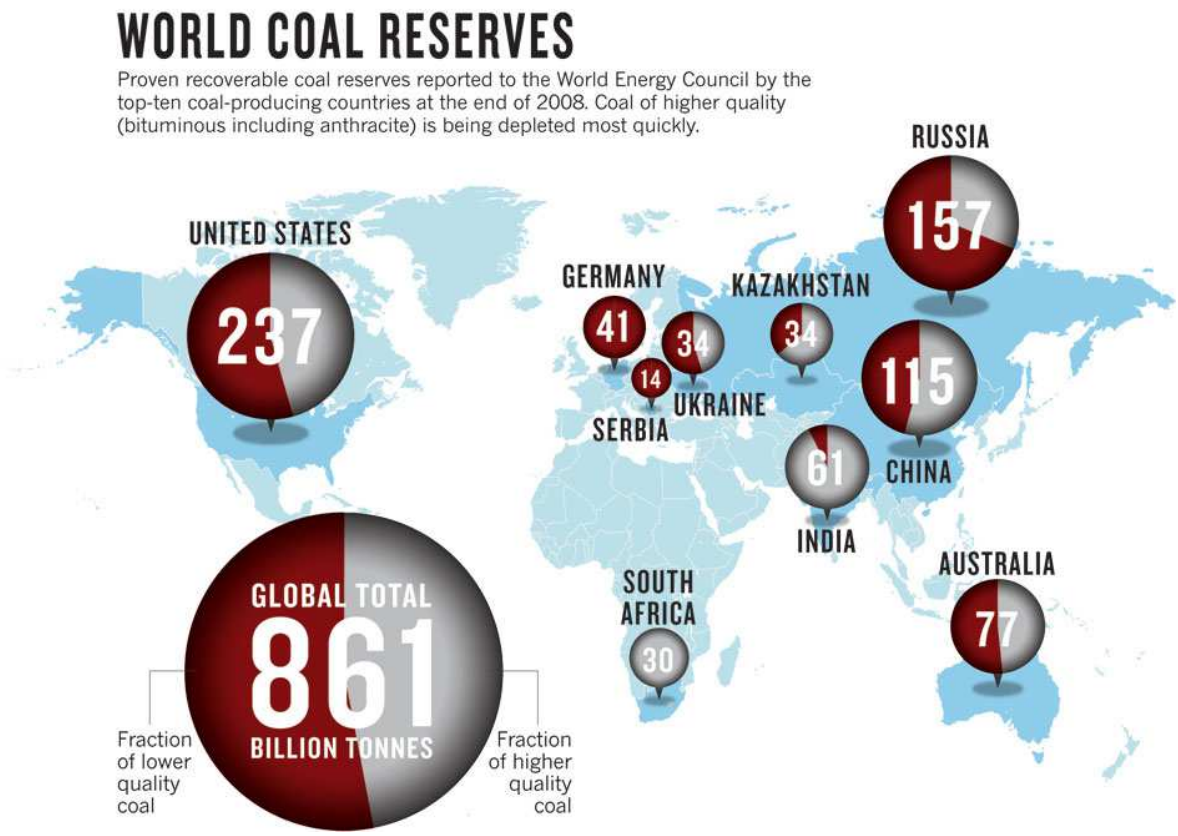


Ilustración 5: Reservas mundiales de carbon en 2010. Fuente: http://ustednoselocree.com/2010/11/19/nature-pico-energetico-carbon/

La minería de carbón, como la metálica, fue en su origen una industria muy laboriosa y esforzada. Las capas de carbón eran más fáciles de seguir que los filones metálicos, porque muchas estaban casi horizontales, y el mineral era más fácil de sacar porque se extrae a pico y pala de forma más fácil y segura que las menas metálicas. Por contraste, las condiciones de trabajo es una mina de carbón son más difíciles y mucho más peligrosas, porque muchas capas de carbón tienen menos de un metro de espesor y los huecos no tenían más anchura que la de la capa; además, los incendios y las explosiones en las minas, resultado de escape de gas metano en las labores, eran un fenómeno corriente. En el siglo XIX, en Gran Bretaña, Estados Unidos y muchos otros países, los niños trabajaban en las minas de carbón por su pequeño tamaño y porque se les pagaba menos. Antes de 1898 la jornada semanal en las minas de hulla de Estados Unidos era de 60 horas; más tarde se redujo a 52 horas, y permaneció así

hasta 1917, y finalmente a 40 horas en 1933. Los problemas de bajos salarios y largos horarios llevaron a los sindicatos y dieron lugar a conflictos bastante fuertes en los primeros años del siglo XX.

A pesar de los esfuerzos sindicales para mantener el empleo, la mecanización ha cambiado notablemente la minería de carbón y ha tenido como resultado una reducción en el número de mineros de los Estados Unidos; en 1923, unos 700 000 mineros producían unos 510 millones de toneladas de carbón, a mediados de los años 90, menos de 120 000 extraían 900 millones de toneladas. Tendencias semejantes en los rendimientos mineros se han experimentado en todos los países con producción importante.

En Gran Bretaña, donde la minería de carbón ha sido muchos años de dominio público, la vuelta a la propiedad privada, combinada con la mecanización, llevo a una notable reducción de plantillas. El aumento de la competencia de carbón importado más barato forzó el cierre de muchas minas en las décadas de 1980 y 1990.

De manera similar, la ruptura de la Unión Soviética y el alejamiento del modelo de industria subvencionada y propiedad del estado llevo al cierre de muchas minas, porque no podían competir en rentabilidad con operaciones más eficientes en otras partes en el mundo. La producción mundial del carbón creció lenta pero continuamente durante el siglo XIX, alcanzando la cifra de 1 000 millones de toneladas en 1907. En el siglo XX siguió creciendo salvo con una interrupción de la Segunda Guerra Mundial. A partir de los años 50 la producción experimento un incremento considerable. Alcanzo 2 000 millones de toneladas en 1953, los 3 000 millones en 1970, los 4 000 millones en 1982, los 5 000 millones a mediados de los años 90, llegando a alcanzar unos 6 000 millones antes del 2010.

3.1.3.1.1. Métodos de extracción de carbón

La minería de carbón moderna se lleva a cabo tanto en subterráneo (minería profunda) como en superficie, sea en terrazas o en corto.

3.1.3.1.1.1. Minería subterránea

En minería subterránea el pico y la pala han sido reemplazados a por los taladros con voladura y máquinas de corte, que arrancan el carbón y lo descargan en cintas transportadoras, para su traslado al punto de carga o a la superficie. Con el modelo más común de minería se remueve solo el 50 % del carbón y se deja el resto en pilares que soportan la roca suprayacente. Tanto el espaciamiento como el tamaño de los pilares dependen de la profundidad a la que se encuentren, la potencia de la capa de carbón, la estabilidad de la roca del techo y el número de capas individuales que se exploten. Después de terminar la fase inicial de extracción, parte del carbón contenido en los pilares puede recuperarse también, llevando a cabo un hundimiento controlado en retroceso. Este proceso se lleva a cabo en las etapas finales de actividad minera. Un método minero relativamente nuevo y rentable es el que utiliza el minador continuo, que se mueve adelante y atrás, arrancando casi el 100 % del carbón con una rueda dentada. La maquinaria de extracción y la cinta que transporta el carbón están protegidas por una cubierta de acero. La

maquinaria, la cinta y la protección avanzan juntas a medida que se arranca carbón del frente y se deja que el techo sufra un hundimiento continuo, pero controlado.

Ilustración 6: Minador continúo. Fuente: www.cat.com

La potencia de capa y la calidad del carbón determinan qué capas son rentables de explotar, pero generalmente se consideran se consideran capas con potencia mayor de 60 cm para su explotación. La minería subterránea es intrínsecamente peligrosa, muchos mineros mueren cada año por caída de los techos. Muchos carbones también desprenden gases, producen grandes cantidades de metano. A pesar del antiguo uso de los canarios y de los modernos equipos de sensores de gas para detectar la presencia de metano, la rápida acumulación de gas todavía da lugar a explosiones.

3.1.3.1.1.2. Minería a cielo abierto

En la minería a cielo abierto hay que quitar los estratos suprayacentes, para descubrir las capas de carbón. Una vez descubiertas, se extrae el material con equipos pesados de excavaciones, como buldocers, paras frontales, potentes retroexcavadoras y grandes dragalinas.

Para mover grandes masas de cobertera con rapidez y eficacia se han ideado equipos de excavación, que han ido aumentando de tamaño constantemente.

Ilustración 7: Maquinaría pesada, pala. Fuente: www.cat.com

Económicamente hablando, por lo general se indica que capas de carbón pueden explotarse mediante minería a cielo abierto; una regla empírica indica que la minería a cielo abierto es rentable si la relación entre potencia del recubrimiento y la potencia de la capa no excede 20:1. Donde el espesor del recubrimiento es demasiado grande, hay que acudir a la minería subterránea, o también puede arrancarse el carbón mediante barrenos horizontales, de más de un metro de diámetro, que se perforan en capas horizontales o de buzamiento pequeño. Al girar el barreno en forma de cabeza rozadora, corta el carbón y expulsa los pedazos rotos como un taladro de mano. Aunque los barrenos pueden recuperar solo el 50% del carbón de la veta, se trata de material que no podría recuperarse rentablemente por ningún otro medio.

La mayor parte de la producción de carbón en la primera mitad del siglo XX se obtuvo de la minería subterránea porque los carbones aflorantes o cercanos a la superficie

estaban muy alterados para su utilización o porque no había sistemas prácticos para mover las grandes cantidades de roca del recubrimiento y exponer las capas de carbón. Muchas de las capas posibles de explotación a cielo abierto permanecían fuera de mercado, porque la explotación de interior no permitía su transporte, sea por falta de disponibilidad o por inadecuación económica. Los sistemas de transporte más eficaces y el desarrollo de grandes palas y dragalinas hicieron, en la segunda mitad del siglo XX, que la minería de carbón a cielo abierto fuera rentable hasta más de 30 metros de profundidad.

3.1.3.2. Mercado global del carbón

3.1.3.2.1. Mercado mundial

El mundo consume actualmente más de 4.050 Mt de carbón al año, el cual es utilizado en diferentes sectores, incluyendo la generación de electricidad, producción de hierro y acero, producción de cementos y los combustibles líquidos. La mayor parte de carbón se utiliza para la generación de electricidad, de esta manera se usa en mayor cantidad el carbón térmico o lignito; o para la producción de hierro y acero, con el uso de carbón de coque.

Se producen más de 4.030 Mt de carbón con un incremento del 38% en los últimos 20 años. Sin embargo mientras en Asia la demanda crece, en Europa se produce un descenso en la producción. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA) el consumo global de este combustible fósil en 2017 llegara hasta las 4.320 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep).

Los principales **productores del carbón** son: China (46,3%), EEUU (11,69%), India (7,47%), Australia (5,33%) y Rusia (4,49%).

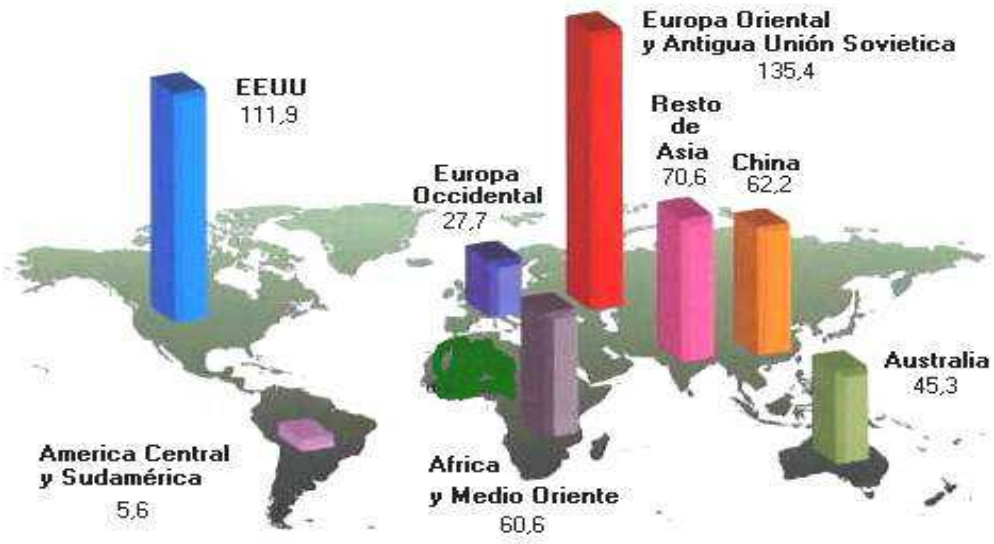


Ilustración 8: Principales productores mundiales de carbón.
Fuente: http://www.catamutun.com/produc/carbon/mundo.html

La mayoría de la producción mundial de carbón se utiliza en el país en el que se produce; solo un 18% de la producción de carbón se dedica al comercio internacional del mismo.

Hay una esperanza que la producción global de carbón alcance los 7.000 millones de toneladas en 2030, representando con China la mitad de este crecimiento durante este periodo. La producción del carbón térmico prevé el alcance de unos 5.200 millones de toneladas, la del carbón de coque los 624 millones de toneladas, y el carbón bituminoso los 1.200 millones de toneladas.

Refiriéndose al **consumo de carbón**, se conoce que juega un papel importante en la generación de electricidad y se espera que este papel siga siendo el mismo. Según los estudios varios se sabe que el carbón sirve de combustible para generar el 39% de la electricidad producida en el mundo y esta proporción se mantendrá aproximadamente por igual hasta el 2030.

Durante el periodo de 2002-2030 se ha previsto que el consumo de carbón térmico crecerá un 1,5 % cada año. El lignito crecerá a un ritmo de un 1% anual. La demanda de carbón coque para la producción de hierro y acero aumentara un 0,9 % anual durante este periodo. Se observa mayor demanda del carbón térmico en este caso.

Aunque hoy en día China es el mayor responsable del consumo y producción de carbón, muchos de los países no cuentan con recursos energéticos naturales para cubrir sus necesidades energéticas, por lo cual deberían de importar energía. Por ejemplo: Japón, Taiwán y Corea del Sur, importan cantidades importantes de carbón térmico para la generación de electricidad y carbón de coque para la producción de acero. Sin embargo los principales productores de carbón, como China, EEUU e India, también importan grandes cantidades de carbón pero por razones de calidad y logística.

Aunque en los últimos años se han puesto de auge las energías renovables el carbón seguir teniendo un papel fundamental en el conjunto energético del planeta. El crecimiento de los mercados del carbón térmico y de coque será mayor en los países

asiáticos en vías de desarrollo, en los que la demanda de electricidad y de acero para la construcción, fabricación de coches y electrodomésticos aumentará al tiempo que aumenten sus ingresos.

Tampoco se puede dejar de lado el comercio del carbón, el cual se comercializa en todo el mundo, transportándolo por mar hasta sus mercados de destino.

Durante las últimas dos décadas el comercio marítimo de carbón térmico ha aumentado un 8% cada años, mientras que el comercio marítimo de carbón de coque ha aumentado un 2% anualmente. El comercio internacional conjunto alcanzo los 718 Mt en 2003 aunque se trata de una cantidad significativa, solo representa el 18% del carbón total consumido.

Los costes de transporte representan una gran parte del precio total del carbón, debido a esto el comercio internacional del carbón térmico se divide en dos zonas abundantes: El Atlántico y el Pacifico. El primero se compone por los países importantes de Europa Occidental, especialmente Reino Unido, Alemania y España. El segundo incluye a los importadores de países en desarrollo y países asiáticos de la OECF (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, tratándose de un grupo de 30 países miembros comprometidos con la democracia y la económica de mercado) principalmente Japón, Corea del Sur y Taiwán. Actualmente el mercado Pacifico representa el 60% del tráfico mundial del carbón térmico. Cierto también que los mercados tienden a solaparse entre sí cuando los precios del carbón son altos y hay suficientes recursos. Sudáfrica es un punto natural de convergencia entre los dos mercados.

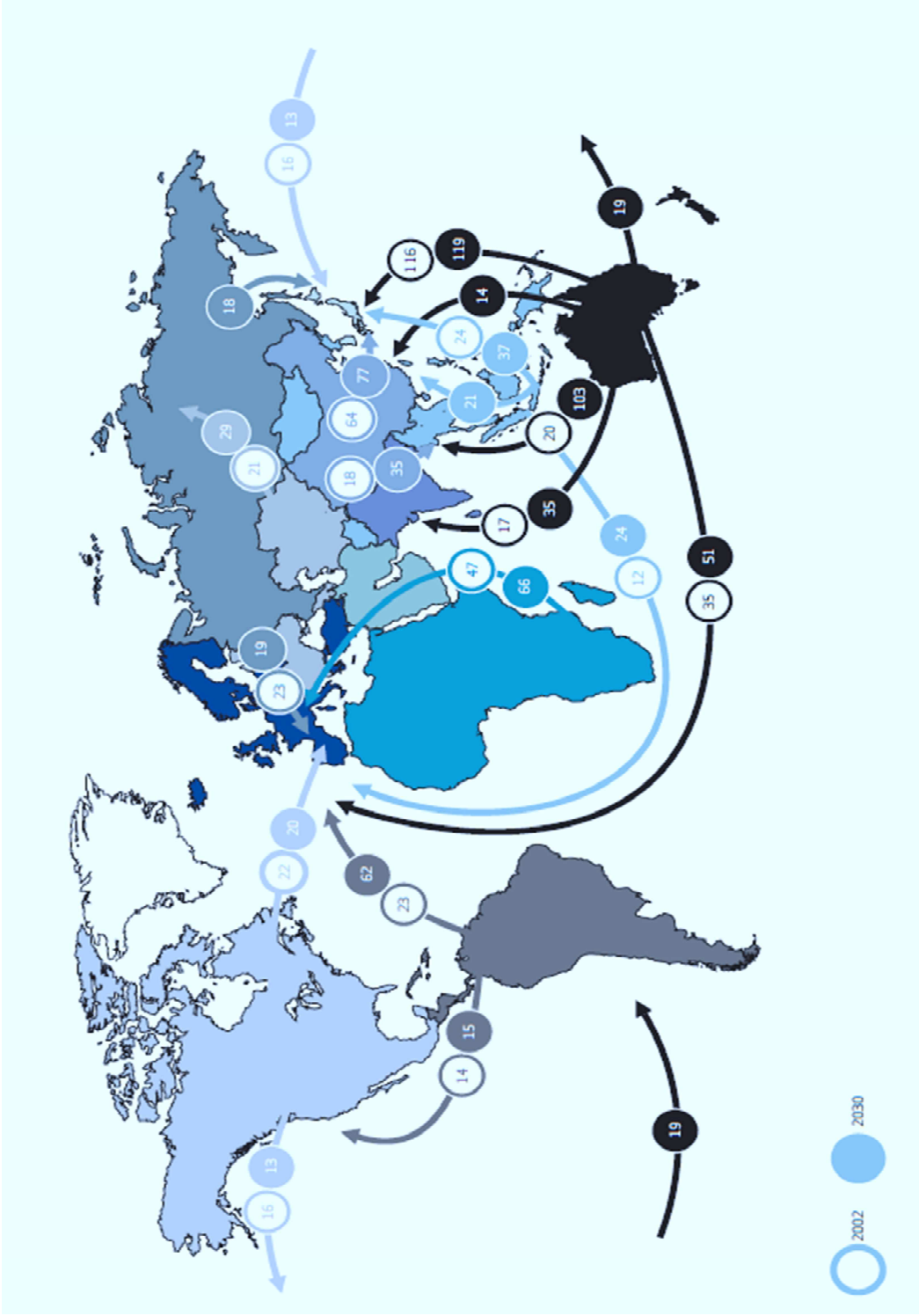


Ilustración 9: Principales flujos comerciales inter-regionales de carbon en los años 2002-2030 (Unidad Mt). Fuente: Instituto mundial de carbón. Una vision general de carbón

Observando la ilustración, Australia es el principal exportador mundial de carbón, exportando más de 207 Mt de hulla en 2003, de una producción total de 274 Mt. Aunque casi tres cuartas partes de las exportaciones de Australia tiene como destino el

mercado asiático, el carbón australiano se utiliza en todo el mundo, incluyendo Europa, Arica y África.

El comercio internacional de carbón está limitado, Australia es también el mayor proveedor de carbón de coque, representando el 51% del total exportado en todo el mundo. EEUU y Canadá son importantes exportadores, y China está emergiendo como un gran proveedor. Como el carbón coque es más caro que el térmico, Australia puede permitirse los altos costes de trasporte de carbón a todo el mundo.

Otro de los aspectos que hay que destacar es la **seguridad energética** de un combustible. En este caso es imprescindible minimizar los riesgos de interrupciones en el suministro energético, tanto si éstas están causadas por accidentes, intervenciones políticas, terrorismo o disputas industriales. El carbón tiene un papel fundamental en un momento en el que cada vez hay más preocupación por la seguridad energética.

Conociendo el mercado del carbón señalado con anterioridad, ya se sabe que es grande y diverso, por tanto se tiene diferentes consumidores y productores en cada continente. El suministro de carbón no llega desde una única zona, esto hace que los consumidores dependan de la seguridad del suministro y de la estabilidad de la región concreta.

Muchos países confían en sus suministros nacionales de carbón para cubrir sus necesidades energéticas, como China, EEUU, India, Australia y Sudáfrica. Otros importan carbón desde diferentes continentes como Colombia, Polonia, Rusia, Suráfrica y EEUU.

Por tanto esa relación de carbón ha de cumplir una misión importante a la hora de mantener la seguridad del conjunto energético de casi todo el mundo.

3.1.3.2.2. Mercado Español

El carbón en España ha desempeñado un papel relevante en la generación de electricidad, por un conjunto de causas, las más destacadas son las dos siguientes: garantía de suministros y bajo coste.

A su vez la garantía de suministro ha tenido dos pilares claves, por un lado la abundancia de las reservas mundiales y la estabilidad de abastecimiento; y por el otro lado el buen funcionamiento de las centrales de carbón con un alto grado de fiabilidad. Por lo que corresponde al coste de su kWh, ha estado siempre en los niveles bajos dentro de los sistemas de generación.

3.2.2.1 Situación Actual

Desde hace unos años, las centrales térmicas españolas están realizando un gran esfuerzo inversor en equipamientos tecnológicos y medioambientales para reducir de manera significativa las emisiones contaminantes derivadas de la combustión de carbón. Por lo cual hoy en día se están desarrollando gran cantidad de proyectos de investigación para poder llegar a un objetivo de “emisiones cero” o “combustión limpia de carbón” para el año 2020.

En concreto, hay dos líneas de actuación diferenciadas para lograr el objetivo del “carbón verde o emisiones cero”. Por un lado, la limitación y reducción de emisiones a la atmosfera de tres contaminantes principales: el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas en suspensión, que se están combatiendo con la progresiva introducción de mecanismos tecnológicos para posibilitar una combustión más limpia. Por otro lado, la eliminación de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), causante del efecto invernadero. En España, la combustión de carbón ocasiona en la actualidad solo el 15% del CO_2 emitido, mientras que el sector transportes provoca más de 32% y el Industrial casi el 28%.

En el año 2010 la Comisión Europea aprobó la concesión de fondos para siente de doce proyectos presentados de captura de CO_2, entre los que se incluye el promovido por la Fundación Ciudad de la Energía (Ciuden), dependiente del Gobierno central, y la

compañía Endesa para la central térmica de Compostilla (León). La dotación asciende a unos 180 millones de euros, con el propósito de construir varias plantas piloto o centrales basados en la demostración en tecnología oxicombustion de carbón en lecho fluido circulante o de carbón pulverizado y de postcombustión mediante absorción química.

También están muy avanzados los estudios necesarios para transportar el CO_2 una vez capturado y almacenado mediante su inyección en el subsuelo a más de 800 metros profundidad en superficies salinas con plenas garantías de confinamiento.

Otra problemática de situación actual es el coste de carbón nacional, ha aumentado en los últimos años drásticamente, por lo que resulta más económico a las centrales térmicas comprar un carbón internacional.

3.1.3.2.2.1. Distribución geográfica de producción

Respecto a la distribución del valor de la producción vendible por Comunidades Autónomas, en año 2013, Andalucía ha sido la CC.AA., que más ha contribuido con un 25,8%, seguida de Cataluña con el 20,4% y Castilla y León con un 11,2%.

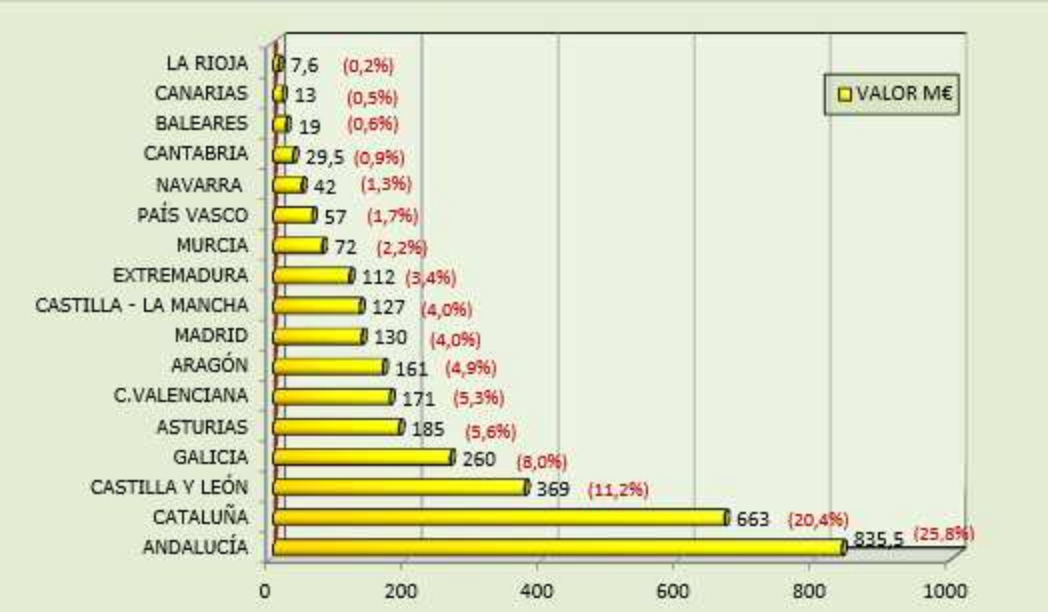


Ilustración 10: Valor de produccion minera por comunidades autónomas. Fuente: Ministerio de Industria, Energia y Turismo.

En cuanto a la distribución geográfica por subsectores se obtienen productos energéticos en seis CCAA. En Aragón la extracción de carbón supone el 45% del valor total de su producción minera. En Asturias, Cataluña, Castilla y León y Castilla – La Mancha la minería energética supone entre el 22 y el 33% del valor de la producción. En Andalucía el peso es mucho menor.

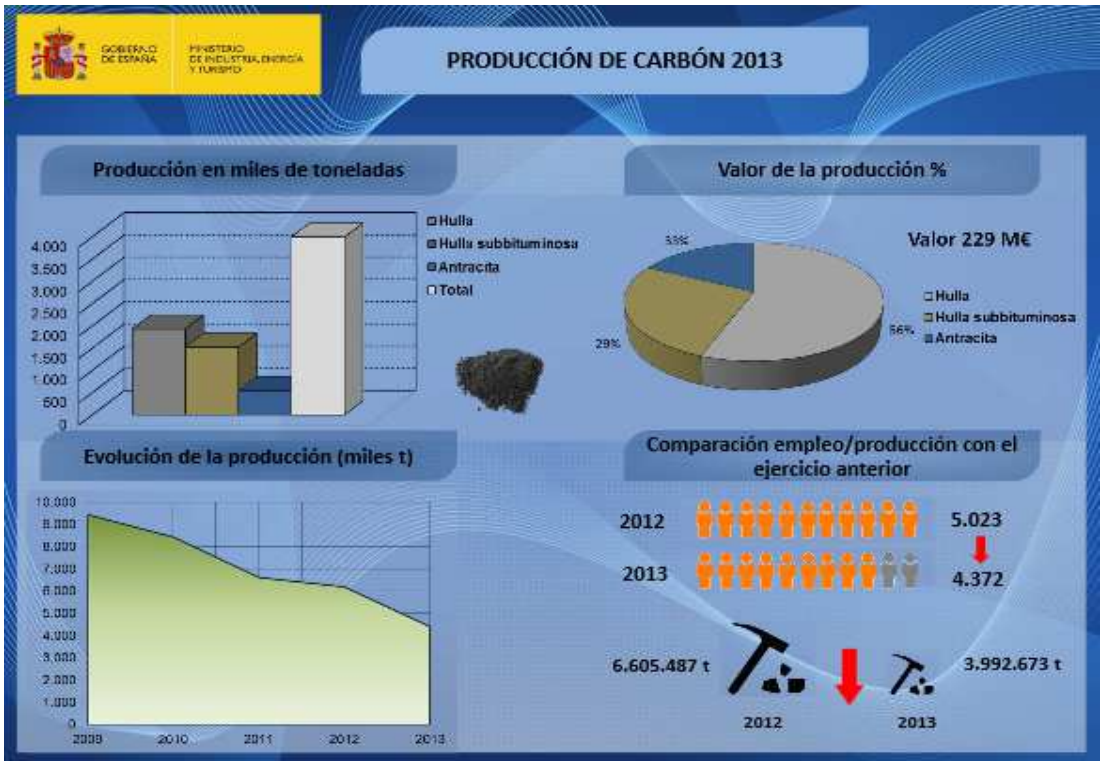


Ilustración 11: Resumen Produccion de Carbón 2013

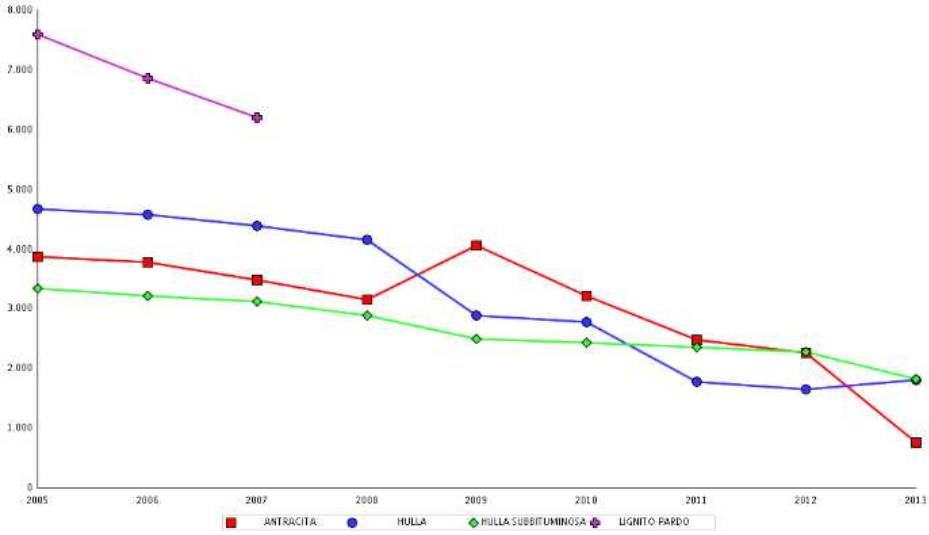


Ilustración 12: Produccion de carbón en España, años 2005 -2013(miles de toneladas). Fuente: Ministerio de Industria, Energia y Turismo.

Como se puede observar en las *Ilustraciones 9 y 10* España se encuentra en un periodo de decrecimiento de la demanda y de producción de carbón. Este comportamiento es debido a que en este momento hay centrales térmicas que afectan al medio ambiente, por lo que implantan las tecnologías específicas para eliminación de los contaminantes. Y por otro lado los precios son bastante elevados al combustible nacional para generar energía eléctrica, aunque siempre hayan estado en los límites bajos.

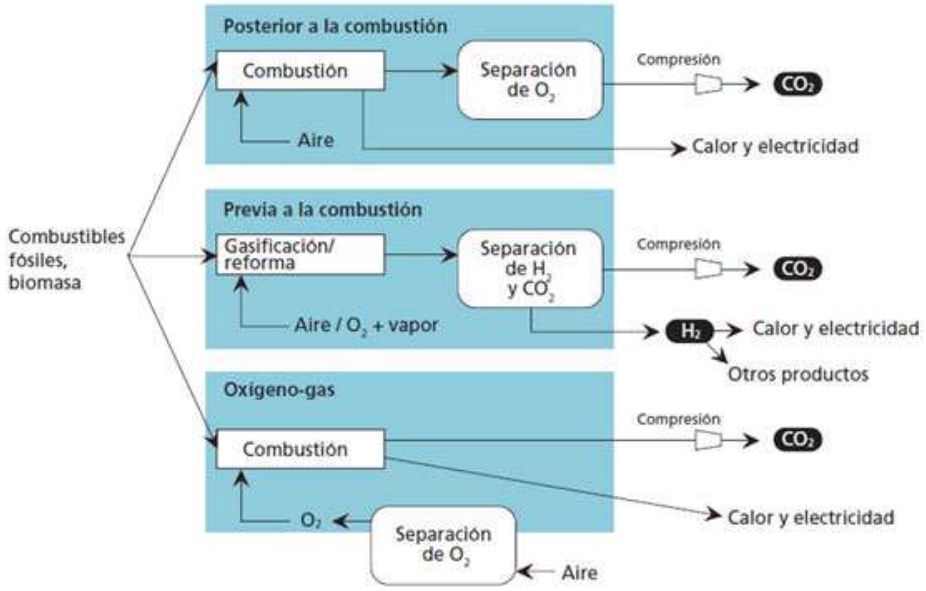
Se espera que con el cumplimiento de la normativa e implantación de nuevas tecnologías de depuración en las centrales térmicas, la producción de carbón vuelva a ascender a nivel nacional.

3.1.4. Combustión y productos producidos

Definiendo en detalle el fenómeno de combustión se obtiene que es un proceso químico de oxidación rápida que va acompañado de desprendimiento de energía bajo en forma de calor o luz. Para que este proceso se produzca, es necesario la presencia de un combustible, un comburente y el calor o la chispa. El material que es capaz de arder y se combina con el oxígeno, se conoce como combustible. En las combustiones ordinarias el combustible es una sustancia compuesta, como hidrocarburos. El oxígeno es elemento esencial para que se produzca y continúe el proceso de oxidación, se conoce como comburente.

Para que pueda arder el combustible tiene que alcanzar una temperatura mínima, llamada el punto de ignición o temperatura de inflamación. Los materiales combustibles tienen una temperatura de inflamación baja lo que les permite entrar con facilidad en combustión. No todos los combustibles desprenden la misma cantidad del calor al quemarse.

Ilustración 13: Diagrama de Combustión de combustible fósil o biomasa.



En el presente proyecto se utiliza Carbón como combustible principal a analizar, con un poder calorífico específico para su buen funcionamiento en una central térmica.

En la combustión se forma una serie de compuestos, como humos o gases de combustión, estos suelen expulsarse a la atmósfera, ya que suelen ser desechos. La problemática se presenta en la composición de estos gases y sus cantidades, ya que estos normalmente se acumulan.

Los gases de la combustión suelen tener los siguientes compuestos, al ser buena la combustión:

$$CO_2, H_2, SO_2, N_2, O_2$$

En cambio si la combustión es mala, tienden aparecer los siguientes compuestos:

$$CO_2, CO, H_2O, SO_2, N_2, O_2$$

Desde el punto de vista ambiental los peores componentes y más perjudiciales son el CO_2, CO, SO_2 siendo este último, el dióxido de azufre el más restrictivo desde el punto de vista legislativo.

Los valores límite, márgenes de tolerancia y umbrales de alerta para las concentraciones en el aire ambiente de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono serán los que se detallan, respectivamente, en los anexos I, II, III, IV, V y VI de BOE núm. 260 (Miércoles 30 de octubre 2002). Al ser SO_2 más restrictivo legislativamente, en primer lugar se añade una tabla del ANEXO I con los valores límites y umbral de alerta. También la tabla de ANEXO II con los valores de dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno por tener importancia. Todos estos se expresaran en $\frac{\mu g}{m^3}$. El volumen a la temperatura de 293 K y a la presión de 101,3 kPa.

Tabla 2: ANEXO I Valores límites y los umbrales de alerta de Dióxido de azufre (SO_2)

		Periodo de promedio	Valores Limite	Margen de Tolerancia	Fecha de cumplimiento del calor limite
1	Valor límite horario para la protección de la salud humana	1 hora	350 µg/m^3, valor que no podrá superarse en más de 24 ocasiones por año civil	90 µg/m^3, a la entrada en vigor del presente Real Decreto, reduciendo el 1 de enero 2003 y posteriormente cada 12 meses 30 µg/m^3, hasta alcanzar el valor límite el 1 de enero de 2005	1 de enero de 2005
2	Valores límite diario para protección de la salud humana	24 horas	125 µg/m^3, valor que no podrá superarse en más de 3 ocasiones por año civil	Ninguno	1 de enero de 2005
3	Valores límite para la protección de los ecosistemas*	Año civil e invierno (del 1 de octubre al 31 de marzo)	20 µg/m^3	Ninguno	A la entrada en vigor de la presente normativa

*Para la aplicación de este valor límite se tomaran en consideración los datos obtenidos en las estaciones de medición representativas de los ecosistemas a proteger, sin perjuicio, en su caso, de la utilización de otras técnicas de evaluación.

El valor correspondiente al umbral de alerta de dióxido de azufre se sitúa en **500 µg/m^3** registrados durante tres horas consecutivas en lugares representativos de la calidad de aire en un área de, como mínimo, 100 km^2, o en una zona o aglomeración entera, tomando la superficie que sea menor.

Tabla 3: ANEXO II Valores límites y los umbrales de alerta de Dióxido (NO_2) de Nitrogeno y Óxidos de Nitrogeno (NO_x)

		Periodo de promedio	Valores Limite	Margen de Tolerancia	Fecha de cumplimiento del calor limite
1	Valor límite horario para la protección de la salud humana	1 hora	200 µg/m^3 de NO_2,que no podrán superarse en más de 18 ocasiones por año civil	80 µg/m^3, a la entrada en vigor del presente Real Decreto, reduciendo el 1 de enero 2003 y posteriormente cada 12 meses de 10 µg/m^3, hasta alcanzar el valor límite el 1 de enero de 2010	1 de enero de 2010
2	Valores límite diario para protección de la salud humana	1 año civil	40 µg/m^3 de NO_2	16 µg/m^3, a la entrada en vigor del presente Real Decreto, reduciendo el 1 de enero de 2003 y posteriormente cada 12 meses 2µg/m^3, hasta alcanzar el valor límite el 1 de enero de 2010	1 de enero de 2010
3	Valores límite para la protección de los ecosistemas*	1 año civil	30 µg/m^3 de NO_x	Ninguno	A la entrada en vigor de la presente normativa

*Para la aplicación de este valor límite se tomaran en consideración los datos obtenidos en las estaciones de medición representativas de los ecosistemas a proteger, sin perjuicio, en su caso, de la utilización de otras técnicas de evaluación.

El valor correspondiente al umbral de alerta de dióxido de nitrógeno se sitúa en **400 µg/m^3** registrados durante tres horas consecutivas en lugares representativos de la calidad de aire en un área de, como mínimo, 100 km^2, o en una zona o aglomeración entera, tomando la superficie que sea menor.

Principalmente con estos valores limitativos se pretende no afectar de forma brusca al medio ambiente, de esta forma controlando los componentes contaminantes y de la misma manera controlar a la industria mediante sanciones importantes.

3.1.5. Debate ambiental de la minería de carbón

3.1.5.1. Contaminantes

La minería de carbón y su utilización han sido objeto de muchos debates ambientales, especialmente en los últimos años (décadas). La mayoría de estos debates se centran en los problemas del drenaje acido de minas, la lluvia acida, el incremento de los niveles de dióxido de carbono en la atmosfera y la recuperación de las minas a cielo abierto. Los dos primeros tienen relación con el azufre, que está presente en todos los carbones en cantidades entre 0,2 y 0,7 %. Por lo general, aproximadamente la mitad del azufre presente está ligado a los macérales orgánicos; el resto se encuentra en forma de los dos sulfuros más comunes, la pirita y la marcasita (ambos FeS_2). El azufre tiene origen en la materia orgánica, o en los sulfatos contenidos en aguas subterráneas, que se reducen por la acción de las bacterias. Cuando el carbón se expone al aire y al agua por la minería, el sulfuro de hierro se oxida a sulfatos ferrosos, $FeSO_4$ y ácido sulfúrico H_2SO_4. El vertido de estos residuos ácidos de mina en ríos y corrientes ha dejado miles de kilómetros de vías de agua desprovistos de peces y de cualquier tipo de fauna o flora acuática. El hierro ferroso es fácilmente soluble en las aguas fuertemente acidas que lavan las capas de carbón aflorantes y las escombreras, pero se oxida rápidamente a hidróxido férrico y precipita, cuando se produce la dilución en el agua de los arroyos. El resultado de la precipitación de los hidróxidos de hierro es una capa gelatinosa, de color café o rojizo, sobre las rocas y plantas. La mayor comprensión de los procesos implicados en la contaminación por aguas acidas de mina y el compromiso de que no se produzcan más abusos ha dado lugar a regulaciones más estrictas sobre el vertido de aguas de mina y sobre la descarga de residuos mineros ricos en azufre.

A pesar de los esfuerzos por limpiar y retirar la pirita del carbón antes de quemarlo siempre queda algo, así como también azufre orgánico, al quemar el carbón se libera azufre y dióxido de azufre, SO_2, que suponen aportaciones importantes a la lluvia acida.

Con respecto al último punto señalado, cada vez que se quema el carbón o cualquier otro combustible, aumentan los niveles de CO_2 de la atmosfera. Por término medio, al quemar la tonelada de hulla se liberan aproximadamente 2,8 toneladas de dióxido de carbono a la atmosfera. Para una cantidad igual de energía producida, quemar carbón produce un 25 % más de dióxido de carbono que si se quema petróleo, y cerca de 2,5 veces más que si se quema gas natural. Este fenómeno ha llevado a la sustitución del carbón por el gas natural en centrales eléctricas, y al desarrollo de investigaciones para recuperar el dióxido de carbono y evitar que entre en la atmosfera. Ambos procesos aumentan el coste de energía producida. Por lo cual, existen muchos incentivos para mantener el *statu quo. A* medida que se avanza en la era de los combustibles fósiles, aumentan los niveles de CO_2 atmosférico haya casi el doble del inicial. Como el dióxido de carbono retiene de forma eficaz la radiación infrarroja de la Tierra y evita su salida al espacio, se produce un calentamiento global de la superficie del planeta. Subsiste, sin embargo, una gran discusión sobre hasta dónde subirán los niveles de dióxido de carbono y cuando calentamiento producirán.

3.1.5.2. Problemática subterránea

Todos los métodos empleados en la minería subterránea pueden ocasionar problemas de subsidencia después de que la minería haya cesado. Como ejemplos pueden producirse mucho huecos mineros que provocan cavernas bajo la superficie. Estos huecos se pueden ver en localidades como Inglaterra, India y el este de Estados Unidos. Otro problema común son los incendios subterráneos de carbón que entran en ignición de forma espontánea. Si hay bastante oxígeno, un incendio de estos puede seguir ardiendo durante muchos años y extenderse de forma considerable. El fuego más famoso se produjo en Centralia, Pensilvania, donde el incendio de una escombrera se propago a una capa de carbón aflorante en 1961. El fuego continuo activo, a pesar de gasto de millones de dólares para intentar sofocarlo por inundación con agua. Este se propago por debajo de la ciudad dando lugar a gritas y escape de los gases calientes y nocivos. La medida drástica fue trasladar la ciudad entera, porque se comprobó que era muy difícil extinguir el fuego.

En el este de la India hay por lo menos 65 incendios importantes en minas subterráneas, muchos de ellos están ardiendo desde el 1916 y han consumido por lo menos mil millones de toneladas de carbón. El área está salpicada de grietas y agujeros que expulsan vapor, humo y gases tóxicos, y la propagación del fuego parece ser cada vez más activa. Incluso donde el fuego no es visible, la tierra está caliente y no puede utilizarse para los pastos ni cultivos.

Ilustración 14: Problematica de incendios. Incendios subterraneos de la mina, localidad Jharia (India) provocado desde 1916. Fuente: www.google.es/imagenes/India/incendios_mina

3.1.5.3. Metano

Otro de los grandes problemas que se señala es el metano presente en las capas de carbón. Desde siempre se ha temido al metano de las minas de carbón porque causa explosiones que han matado a cientos de miles de mineros de todo el mundo. La gente conoce el metano, un gas incoloro e inodoro, como el gas natural que se usa de forma general para cocinar, en la calefacción doméstica y en procesos industriales. La mayor parte del gasto, mediante extracción, transporte y tratamiento de limpieza y eliminación de impurezas, también se le añade un componente que da olor, de forma que sea fácilmente detectado por el sistema olfativo humano.

Los mineros antiguos llevaban canarios a los tajos para verificar la presencia de metano. Los canarios se desplomaban antes de que la concentración de gas fuera suficientemente grande como para perjudicar a los trabajadores. A veces, individuos valerosos eran enviados a los frentes de las minas para intentar quemar pequeñas bolsadas de gas antes de que produjeran explosiones. Con concentraciones menores de 5 %, el metano es inerte; si es superior al 15%, arde con llama estable y fácilmente controlable. Pero con concentraciones entre 5 y 15%, la mezcla de metano y aire causa explosiones violentas. Aunque todavía se producen explosiones esporádicas, los mecanismos modernos de detección suelen avisar con suficiente antelación para prevenir las concentraciones antes de que sean mortales.

Aunque actualmente, el metano de las capas de carbón comienza a considerarse en muchos lugares como un recurso valioso más empleado. Después de todo, el mismo gas que explota cuando se libera accidentalmente puede también usarse como fuente de energía cuando se extrae de forma sistemática. El metano en la materia carbonosa es el resultado de la actividad biogenética o termogenética. El gas biogenético puede producirse por bacterias anaerobias al principio de enterramiento, o mucho después, cuando la circulación de agua subterránea introduce bacterias en las capas de carbón. El gas termogénico se produce durante el enterramiento cuando, al calentarse y comprimirse la materia orgánicas, desprende hidrocarburos y otros gases (como el agua y nitrógeno).

3.2. Parámetros más representativos

En un principio para comprender la naturaleza y composición de carbón, tanto como sus diferentes clases y variedades de las muestras, hay que considerar la calidad de los materiales de que está formado así como también las condiciones en las cuales estos materiales fueron transformados.

Aunque existen muchas clases y variedades de carbón, todas ellas representan algún estado o producto de una primaria descomposición y transformación subsiguiente, bajo la influencia de la temperatura, de residuos vegetales de bosques primitivos y pantanos. Esta descomposición ha tenido lugar en varios de los periodos geológicos y en sus primeros estados puede verse hoy en día bajo diferentes condiciones en las turberas y deltas donde enormes masas de residuos vegetales sepultados en agua sufren una descomposición debida a la influencia de bacterias.

Por lo que ya se conoce del origen y modo de formación del carbón, puede comprenderse que todos los carbones, cualquiera que sea su edad geológica, contendrán en primer lugar compuestos orgánicos combustibles, de composición compleja y de gran peso molecular que representan productos de descomposición o de transformación de substancias resinosas o ligno-celulosas derivadas de los residuos vegetales, y en segundo lugar cantidades variables de materias minerales de la vegetación original o del suelo sobre el que crecían, parcialmente también se pueden añadir otras substancias minerales asociadas depositadas unas al mismo tiempo de formarse el carbón y originadas otras por filtraciones posteriores.

3.2.1. Ensayos normalizados de carbón

Existen múltiples ensayos que sirven de sustento a diversos sistemas de caracterización de carbones, por esta razón se ha observado con detalle la composición química como criterio de clasificación de los carbones.

Las substancias (materias- sustancias) orgánicas están compuestas principalmente de elementos de carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno y azufre cuyas proporciones relativas pueden ser determinadas con suficiente aproximación por los métodos constantemente empleados en el análisis de los compuestos orgánicos. Sin embargo la investigación de la naturaleza de los cuerpos complejos que forman ese conjunto de compuestos principales tiene problemática de la solución, ya que no se encuentra por ninguno de los métodos conocidos de análisis químico.

3.2.1.1. Análisis inmediato

Comprende la medida de contenido en humedad, volátiles, ceniza y carbono fijo; es una forma más inmediata de caracterizar un carbón. Este análisis se realizara con un equipo básico del laboratorio.

- ***Humedad***: depende de las condiciones de extracción y de su preparación mecánica, el tiempo en que ha estado expuesto a la acción atmosférica y las condiciones atmosféricas propias en el momento del muestreo.
    - Efectos de contenidos de humedad sobre carbón:
        - Los carbones de bajo rango, con mayor contenido en humedad tienen costes mayores a la hora de transportarlos.
        - La humedad actúa como un inerte, bajando la temperatura de llama, evacuando entalpia de cambio de estado con los humos e incrementando el consumo de ventiladores.
        - Un bajo contenido en humedad favorece la molienda e inhibe las posibles aglomeraciones.

- ***Contenido en Volátiles:*** son distintas cantidades de hidrogeno, óxidos de carbono, metano y otros hidrocarburos de bajo peso molecular. El contenido

en volátiles proporciona una indicación de su reactividad y facilidad de ignición. Este parámetro caracteriza la estabilidad de la llama tras la ignición y facilidad de producción de esta.

  - Carbones con alto rango tienen pocos volátiles y arden muy lentamente, siendo crítica la estabilidad de la llama. Rango superior al 30% es demasiado alto en contenido, puede provocar problemas con igniciones espontaneas.

- ***Cenizas:*** residuo sólido tras la combustión completa de toda la materia orgánica y de la oxidación de la materia mineral presente en el carbón. Nunca es igual al contenido en sustancias minerales del combustible antes de la combustión. Las cenizas definen la calidad del carbón en la combustión al determinar el contenido en materia incombustible presente. A mayor contenido en cenizas menor poder calorífico presenta el carbón bruto.

- ***Contenido en carbono Fijo:*** se emplea para estimar la cantidad de coque o "char", productos de combustión intermedia que se pueden producir. Así como el contenido de inquemados en las cenizas volantes.

3.2.1.2. Análisis Elemental

El análisis elemental de un carbón consiste en la determinación de la composición de los cuerpos simples, carbono, hidrogeno, nitrógeno, azufre y oxígeno en una muestra seca y bien preparada. Es la composición elemental de la fracción orgánica de carbón, la cual se determina en base a métodos de oxidación, descomposición y reducción, siendo realizados estos análisis mediante los equipos automáticos basados en la técnica de infrarrojo.

Este análisis es necesario para los balances de materia y energía de la combustión, también para precisar la aproximación del poder calorífico del carbón. Se consideran los datos de humedad y contenido en cenizas del análisis inmediato, con objeto de expresar los resultados del análisis elemental en tanto por ciento en peso y base seca exenta de cenizas.

- ***Carbono e Hidrogeno***

Estos elementos permiten estimar el CO_2 y H_2O que se producirá en la combustión de esta forma los tantos % de estos elementos se determinan siempre quemando una cantidad conocida, aproximadamente entre 0,25 y 0,50 gramos de carbón sin humedad en una corriente de oxigeno también seco. Este procedimiento se realiza dentro de un tubo de cristal dura y haciendo pasar los productos de la combustión a través de cromato de plomo que retiene el azufre oxidado procedente de la oxidación de la pirita de hierro o del azufre orgánico combinado en el carbón. El agua y anhídrido carbónico producidos por la combustión del carbón, son captados por absorbentes adecuados y pesados. Estos absorbentes son por ejemplo cloruro de calcio anhidro para el agua y una disolución de potasa caustica en proporción de 1:1 para el anhídrido carbónico.

- ***Nitrógeno***

La determinación exacta de este elemento en el carbón es muy importante probablemente existe al menos, bajo dos formas: como cuerpo compuesto que al descomponerse entre 300º y 900ºC origina amoniaco y del que se derivan las sales amoniacales que se obtienen en la carbonización en hornos de coque o en retortas; y como cuerpo compuesto mucho más estable que al descomponerse no produce amoniaco.

El nitrógeno ha adquirido importancia debido a la formación de óxidos de nitrógeno. No obstante existe una correlación simple entre el nitrógeno constituyente del carbón y los óxidos de nitrógeno emitidos en los gases de combustión.

La extracción de nitrógeno del carbón puede ser extraído como amoniaco calentando el carbón hasta el rojo en una corriente de vapor y esto es la base del proceso de gasificación de Dr. Ludwig Mond llamado como “recuperación del amoniaco”. Y el nitrógeno total puede ser determinado por la modificación siguiente del método de Kjeldahl.

- ***Azufre***

Contenido de azufre está relacionado con diferentes problemas medioambientales y también de operaciones en las calderas. Cuando se producen sulfatos (SO_3) estos incrementan el ensuciamiento y la corrosión de las superficies de transferencia de calor.

Por otra parte cuando se producen ácidos sulfúricos (combinación de SO_3 con el vapor de agua) se pueden presentar problemas de corrosión en las zonas frías de calderas, en los conductos de gases de combustión.

El contenido para evitar los problemas medioambientales y corrosión en las calderas ha de ser sobre 3,5%.

- ***Oxigeno***

El contenido de oxigeno puede ser utilizado como indicador del rango del carbón, siendo además una medida de su grado de oxidación. Generalmente se calcula por diferencia a 100 de la suma de los porcentajes de carbono, hidrogeno, nitrógeno y azufre, aunque existen métodos para su determinación directa.

3.2.1.3. Análisis petrográficos

Existen varias clasificaciones de carbón y una de ellas es en función de su tipo, análisis microscópico. Como índice de este se utiliza la medida de la reflectancia máxima de los distintos componentes orgánicos en una muestra pulverizada y pulimentada de carbón, sumergida en un aceite específico para mejora de contraste. Esta caracterización se basa en la diferente reflectancia de los macérales, mínima para la exinita, intermedia para la vitrinita y máxima para la inertita.

También hay que tener en cuenta las propiedades ópticas del carbón, estas varían, al igual que otros parámetros de este, en funciones de la extensión del proceso metamórfico de la carbogenesis. De esta forma, la reflectancia, que aumenta con el incremento de la aromaticidad y el tamaño de las estructuras moleculares puede ser empleada para la determinación no solo del tipo, sino también del rango del carbón. En este sentido, se considera la denominación reflectancia de la vitrinita, parámetro que presenta como gran ventaja el determinar una propiedad característica del rango sobre un único maceral, con lo cual es aplicable para todo tipo de carbones al objeto de establecer su rango. La técnica de la reflectancia de la vitrinita ha sido correlacionada con resultados óptimos con propiedades de carbón tales como contenido en volátiles, ratio H/C (Hidrogeno/ Carbono), poder calorífico, índice de hinchamiento y fracciones tras coquizado.

Los constituyentes de los carbones que presentan altas reflectancias son los que tienen una combustión más difícil. De esta manera, en términos generales, un carbón será más difícil de quemas si tiene elevada proporción de macérales inertita o si su rango es elevado.

3.2.2. Cenizas y análisis químico

Las cenizas del carbón están construidas por los residuos resultantes de la descomposición de silicatos, carbonatos, sulfuros. Para analizar características de fusibilidad de las cenizas es preciso conocer la composición química de las mismas, o análisis química. Ya que es importante en las especificaciones del diseño y operación de hornos y calderas.

Estos análisis permiten determinar la capacidad de las cenizas para la formación de escoria en el hogar y depósitos en las superficies de intercambio de calor. Se determinan los siguientes óxidos: ***SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, TiO_2, Na_2O, K_2O, P_2O_5, SO_3.***

Los ***SiO_2 y Al_2O_3*** se encuentran en silicatos. Juegan un papel importante en el comportamiento de las cenizas ya que a mayor cantidad de silicato y aluminio las temperaturas de fusión son más altas lo cual determina el tipo de calderas a utilizar (fondo húmedo a fondo seco). Una relación Si/AL mayor de tres puede indicar la presencia de sílice libre (cuarzo) en el carbón, lo que puede crear problemas de abrasión.

Fe_2O_3, CaO y MgO El hierro se encuentra principalmente en sulfuros, también en arcillas y carbonatos. El calcio y el magnesio en arcillas, micas y carbonatos, Estos óxidos controlan en mucha parte la viscosidad y temperatura de la fusión de cenizas.

El ***Na_2O y K_2O*** Provienen de micas, silicatos y cloruros. Estos óxidos cuando se volatilizan pueden originar depositaciones causando obstrucción, corrosión y pérdidas de eficiencia de las calderas. El sodio y el azufre controlan en parte la resistividad de las cenizas determinando el tipo de precipitaderos electrostáticos para remover las cenizas volantes.

El ***SO_3*** es un producto de la oxidación de la pirita. El SO_3 en el coque afecta la calidad del acero cuando su contenido es alto. Se requiere conocer su porcentaje para los cálculos de combustión.

El P_2O_5 proviene de los fosfatos. Un contenido alto de fosforo en coques disminuye la calidad del acero.

El TiO_2 se encuentra en micas, arcillas y especialmente en rutilo. Como posee un punto de fusión alto se le trabaja conjuntamente con la alúmina para la construcción de monogramas.

3.2.3. Propiedades del carbón y las cenizas

3.2.3.1. Propiedades físicas

En un principio para la evaluación comercial de un carbón es necesario caracterizar sus propiedades físicas. Existen múltiples ensayos en función de los requerimientos asociados a su empleo final, destacándose los siguientes:

- ***Manejabilidad***: Ensayos asociados a la facilidad de transporte, almacenamiento y tratamiento del carbón.
    - Densidad aparente: relación entre la masa y el volumen que ocupa, incluyendo los huecos dentro y entre las partículas, para el apilamiento y transporte en cintas.
    - Distribución de tamaños antes de la pulverización: para asegurar el adecuado rendimiento de los molinos, y tras ella para asegurar el rendimiento de la combustión.
    - Friabilidad o desmenuzabilidad: para determinar la degradación de tamaños y el polvo generado en el manejo, apilamiento y molienda.

3.2.3.2. Propiedades mecánicas

- ***Molturabilidad o Índice Hardgrove:*** Este parámetro es utilizado para estimación de capacidad, rendimiento y energía requerida en el proceso de molienda, asi como para definir el tamaño de partículas producido. Carbones con índices inferiores a 50 presentan dificultades para su pulverización, debido a su dureza.

  Esta determinación tiene como fundamento la aplicación de una cantidad definida de energía de molienda a una muestra del carbón a través de un pequeño pulverizador. Posteriormente determina la variación de tamaños producidos mediante el tamizado. Para la calibración del sistema se emplean muestras de referencia de distintos índices Hardgrove.

- ***Índice de Abrasividad:*** Se emplea para estimar el desgaste de los molinos. Consiste en la determinación de la perdida de metal de las palas de un molino de referencia.

- ***Índice de hinchamiento y aglomeración:*** es un indicador del comportamiento del carbón cuando se calienta, haciendo referencia a las características de carbonización y de producción de especies intermedias que pueden ser "char" o coque. Un índice alto de hinchamiento sugiere que durante la combustión la partícula de carbón se expandirá para formar residuos porosos de poco peso, que serán emitidos con los gases de combustión y podrán contribuir, de esta forma, a unos elevados niveles de inquemados en las cenizas volantes.

  La determinación de este índice consiste en la combustión en unas condiciones establecidas de una muestra de carbón en un recipiente característico, comparándose el coque residual obtenido con una serie de perfiles de referencia.

- ***Fusibilidad de las cenizas:*** Medida de la fusión y reblastecimiento de las cenizas del carbón. Se realiza mediante la observación de la temperatura a la que se producen modificaciones en la forma de una pirámide triangular de cenizas, de tamaño establecido, que sufre un calentamiento progresivo en condiciones normalizadas de temperatura y atmosfera, oxidante o reductora.

  Se puede definir distintas etapas en la transformación morfológica que la muestra experimenta con el aumento de temperatura, considerándose en relación a esto las siguientes temperaturas:

  - Temperatura de deformación inicial
  - Temperatura de reblandecimiento
  - Temperatura hemisférica
  - Temperatura de fluidez

Las características de fusibilidad de las cenizas son bastante importantes en la predicción de la formación de depósitos en las calderas. Estos depósitos se denominan “slagging” - escoriación, cuando se forman en las paredes del hogar o “fouling”- ensuciamiento, cuando se originan en sobrecalentadores y recalentador. Se han puesto a punto un cierto número de índices empíricos para correlacionar la escoriación y el ensuciamiento de sobrecalentador y recalentador con la composición química.

- ***Viscosidad de las cenizas fundidas***: afecta a la velocidad a la que fluyen por las paredes los depósitos de estas, con incidencia sobre el rendimiento de equipos de extracción como sopladores de paredes y hollín.

3.3. Efectos generales de los parámetros más representativos

3.3.1. Producidos en el comportamiento del carbón

3.3.1.1. Fusibilidad de las cenizas

Como bien se conoce el carbón es un combustible sólido fósil que procede de la descomposición de la materia vegetal y para combustionar es necesario llegar a una cierta temperatura para provocar su inflamación, aportando una cierta cantidad de calor. De esta forma se acumula el calor para llegar a la temperatura de inflamación.

Una vez combustionado y reaccionado se obtiene productos de la combustión como las cenizas. Las cenizas pueden permanecer en estado sólido (denominadas cenizas secas) o fundir. En el primer caso su eliminación no ofrece inconvenientes, pero en el caso de las cenizas fundidas da lugar a problemas de grandes procesos, hasta el punto de estudiar nuevas técnicas de aparatos térmicos con su eliminación.

Habitualmente en una caldera cuando se quema el carbón pulverizado, las cenizas funden y se adhieren a los tubos de agua creando puentes de escoria que impiden el paso normal de los gases.

En las conducciones de igual manera suele escoriarse una ceniza fundida en el sistema de evacuación impidiendo el funcionamiento del aparato.

La fusibilidad de las cenizas depende de su composición en gran parte. El problema presentado corresponde al estudio de los diagramas de fusibilidad de silicatos y aluminatos, estos son los compuestos predominantes en las cenizas y por tanto es semejante el estudio de los materiales refractarios, de los cementos y de las escorias metalúrgicas. El punto de fusión de una ceniza depende de la magnitud del índice:

$$SiO_2 + Al_2O_3 \; ; \; Fe_2O_3 + CaO + MgO$$

Normalmente los óxidos de hierro suelen ser los responsables de una fusibilidad elevada de las cenizas. Aunque se debería de estudia en mayor detalle estos óxidos, debido a que puedan presentarse diferencias de 400 ºC en los puntos de fusión según el tipo de óxidos de hierro.

Generalmente las cenizas con el punto de fusión superior a los 1 400 ºC se tienen por muy refractarias. Las intermedias son aquellas en las que el puente de fusión está comprendido entre los 1 200ºC y 1 400 ºC; y las cenizas fusibles son las de punto inferir a los 1 200ºC.

3.3.1.2. Factores "slagging" y "Fouling"

Factores "Slagging" y "Fouling" son parámetros[1] bastante importantes que dependen de muchos factores relacionados con el combustible natural, el diseño de la cardera y la operatividad. La propiedad física y mecánica que se encarga de estos factores es la Fusibilidad de las cenizas, mediante la observación de temperatura a la que se producen modificaciones notables. Estas temperaturas están marcadas a la hora de comprar el carbón, las más importantes son Temperatura hemisférica y Temperatura de fluidez.

Estos factores se definen de la siguiente manera:

- "***Slagging"*** - (escorificación): Se refiere al desarrollo de depósitos fundidos y resolidificados de cenizas en las paredes de los tubos de la cardera situadas a la altura o ligeramente por encima de los quemadores, es decir, en las secciones sometidas principalmente a radiación térmica. Se forma escoria.

- ***"Fouling"*** - (ensuciamiento): Es la formación de depósitos sinterizados o cementados, en forma de incrustaciones, sobre los bancos de tubos en la sección de convección de la caldera.

[1] Son calculados mediante el método de las ecuaciones empíricas utilizado por los proveedores de las calderas ***The Babcock & Wilcox Company*** a nivel industrial, utilizando de referencia la normativa ASTM para el análisis de las cenizas y de fusibilidad.

Por tanto estos índices son utilizados para evaluar la formación de escoria y ensuciamiento de los carbones. Relacionando la composición química de las cenizas con la formación de escoria y ensuciamiento hay que tener en cuenta: ***relación B/A; relación Fe_2O_3 / CaO; contenido de % Na_2O en cenizas***.

A parte también la composición de cloro señalada en análisis elemental puede afectar a la liberación de potasio, el cual afecta al "slagging" de las cenizas. Otras sustancias críticas que afectan a generación del "slagging" son el ***Fe, Ca.***

Tabla 4: Resumen de las relaciones empiricas para Slagging y Fouling

Index	Formula	Slagging or Fouling Propensity			
		Low	Medium	High	Severe
Slagging Propensity [38]					
Base-Acid Ratio	$B/A=\frac{Fe_2O_3+CaO+MgO+K_2O+Na_2O}{SiO_2+Al_2O3+TiO_2}$ for lignitic ash*	<0.4 or > 0.7		0.4 to 0.7	
Slagging Factor	$B/A \times Sulphur\ in\ coal\ (dry\%)$ for bituminous ash*	<0.6	0.6 to 2.0	2.0 to 2.6	> 2.6
T_{25}, °C. Temperature at which the viscosity of ash is equal 25 Pa*s.	$T_{25}\ ^oC=\left[\frac{M\times10^6}{\lg(25)-C}\right]^{0.5}+150$, where $C = 0.0415xSiO_2+0.0192xAl_2O_3+$ $+0.276xFe_2O_3+0.0160xCaO-3.92$ $M = 0.00835xSiO_2+0.00601xAl_2O_3-0.109$	>1400	1400 to 1245	1245 to 1120	<1120
Iron-Calcium Ratio	$\frac{Fe_2O_3}{CaO}$	<0.3 or > 3.0	0.3 to 3.0		
Iron plus Calcium	Fe_2O_3+CaO	<10%			
Slagging Index, °C	$\frac{4\cdot(\min IT)+(\max HT)}{5}$	>1340	1340 to 1230	1230 to 1150	<1150
Silica Percentage	$\frac{SiO_2\times100}{SiO_2+Fe_2O_3+CaO+MgO}$	72-80	65-72		50-65
Fouling Propensity					
Fouling Factor [66]	$B/A\times Na_2O\ in\ the\ ash\ (\%)$ for bituminous ash*	<0.2	0.2 to 0.5	0.5 to 1.0	>1.0
Sodium content [67]	Na_2O % in the ash for bituminous ash*	<0.5	0.5 to 1.0	1.0 to 2.5	>2.5
	Na_2O % in the ash for lignitic ash*	<2.0	2 to 6.0	6 to 8.0	8.0

En caso de la combustión de la ceniza de carbón, el comportamiento de la cardera esta dictado principalmente por los minerales de carbón participantes en combustión.

Observando la tabla anterior se deduce:

a. Tiene que haber una cierta correlación entre los óxidos de B/A, y deben de ser menores de 0,4 a 0,7 para una baja producción de escoria.
b. El contenido de S puede indicar la presencia de piritas y la formación de escoriación.
c. El contenido de sodio (% Na_2O) en el carbón presenta el factor de ensuciamiento que influye directamente en el combustible.
d. La cantidad de silicatos puede variar en la cantidad de cenizas, de mayor a menor presencia de sílice, que está relacionada con problemas de ensuciamiento y corrosión. Por tanto el Fe y Ca juegan un papel importante en los alumino-silicatos.

Por otro lado hay que saber el contenido de las cenizas que se tiene para utilizar la tabla y para conocer si son de tipo **lignitico o bituminoso**:

Bituminoso $Fe_2O_3 > (CaO + MgO)$

Lignitico $Fe_2O_3 < (CaO + MgO)$

Los bituminosos llevan la composición baja en ceniza y de la que varía la relación de alumino-silicatos, habitualmente es más dominante la relación de calcio, hierro y magnesio, que en parte es capaz de acelerar la formación de escoria mientras que los carbones ricos en sodio pueden conducir a la suciedad.

Para calcular el **contenido de álcalis** en las cenizas se utilizan de referencia **Na_2O, K_2O** mediante siguiente relación: ***$Na_2O + (0{,}589.\ K_2O)$***

Si los álcalis superan el **valor de 0,30%** en carbón darán problemas a los depósitos como obstrucción, corrosión, perdida de eficiencia en la caldera. Los carbones Rusos tienen contenido intermedio de álcalis. Aunque si van **enriquecidos en Fe y Ca** podrán influir más en problemas de “slagging” y “fouling”.

3.3.1.3. Resistividad y conductividad del carbón y las cenizas

- ***Conductividad*** es la habilidad de un material para llevar la corriente eléctrica.

- ***Resistividad*** es la resistencia a la conducción de la electricidad. De esta manera cuando es baja resistividad el material permite fácilmente el movimiento de carga eléctrica dentro de los electrofiltros, y cuando es alta – impide la carga eléctrica, es decir, es más complicado de realizar la retención de las partículas en suspensión.

Para regular las emisiones de partículas se utilizan los electrofiltros, que son precipitadores electrostáticos. Su función es cargar eléctricamente las partículas de ceniza volante en polvo presentes en los humos, para su recolección y posterior evacuación. La unidad se compone de una serie de placas verticales entre los que circulan los humos; entre cada dos placas consecutivas, se encuentran los electrodos que facilitan el campo eléctrico debidamente centrado. En los próximos apartados se describirá su funcionamiento con mayor detalle.

El cálculo de resistividad se realiza mediante el siguiente método [2] . Dicho método se basa en el cálculo de resistividad por volumen.

$$log\ \rho_{v_{2kV}} = 8{,}9434 - 1{,}8916.\log X - 0{,}9696.\log Y + 1{,}2370(logZ - log2{,}5);\ \ X = Li + Na; Y = Fe; Z = Mg + Ca$$

$$log\ \rho_{v_{10kV}} = \log \rho_{v_{2kV}} + (E + E_b).S_e\ \ ;\ \ \ \rho_{v_{10kV}} = 10^{\log \rho_{v_{10kV}}}$$

$log\ \rho_{v_{10kV}}$= logaritmo de resistividad ajustado a la misma intensidad de campo E (en este caso 10kV/cm)

- $log\ \rho_{v_{2kV}}$ = logaritmo de resistividad con el campo de 2kV/cm
- E = gradiente de voltaje aplicado de ajuste

[2] Método de R. E Bickelhaupt de su articulo de "Technique of prediction fly ash resistivity"

E_b = gradiente de voltaje base, en estabilidad 2kV

$S_e = \frac{\Delta log\rho}{\Delta E} = -0{,}030$ Si se aplica voltaje de 2kV-10kV

Existe un límite inferior de la resistividad eléctrica, para que las partículas no pierdan rápidamente su carga y es 10^6 a 10^7 Ohm.cm. El valor a partir del que se presentan problemas en electrofiltro es 10^{10} y 10^{11} Ohm.cm. Las dificultades se presentan en los electrofiltros cuando trabajan con cenizas volantes de resistencias extremadamente altas 10^{13} Ohm.cm. Por lo cual el **valor ideal** de resistividad para un correcto funcionamiento del electrofiltro **es 10^8 – 0,1x10^{10} Ohm.cm.**

Tabla 5: Limites de Resistividad en un Electrofiltro

A	(10^4-10^8) Ω·cm	Conductive	Low migration velocity	Low collection efficiency of ESP
B	(10^8-10^{10}) Ω·cm	Normal Resistivity	Moderate migration velocity	Moderate collection efficiency of ESP
C	(10^{10}-10^{11}) Ω·cm	Moderate Resistivity	High migration velocity	High collection efficiency of ESP
D	(10^{11}-10^{13}) Ω·cm	High Resistivity	Very low migration velocity	Low collection efficiency of ESP

Es importante señalar que la resistividad tiene dependencia de los parámetros del análisis inmediato y análisis químico de las cenizas. Favorecen la recolección en electrofiltro, reduciendo la resistividad los parámetros como: ***Humedad, Azufre, Na y K.***

Y los parámetros que provocan problemas en recolección de partículas e incrementan las emisiones a la salida de los humos son en mayoría de los casos: ***Ca y Mg***

3.3.2. Efectos producidos en los elementos de la central térmica

3.3.2.1. Definición de la central térmica

Una central térmica es una instalación que produce energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, fuel-oíl o gas en una caldera. La producción de energía eléctrica de las centrales térmicas se realiza mediante el aprovechamiento de la energía calorífica de un combustible para transformarla en electricidad.

La transformación sigue siguientes pasos:

- La energía contenida en el combustible se transforma, por combustión en energía calorífica.
- La energía calorífica que absorbe el fluido de trabajo se convierte al convierte al expansionarse en la turbina o motor en energía mecánica.
- La energía mecánica es transformada en energía eléctrica a través del generador eléctrico.

Dicha transformación sigue el ciclo de Rankine, empleado en las centrales térmicas de vapor. Es el ciclo fundamental que siguen las turbinas de vapor.

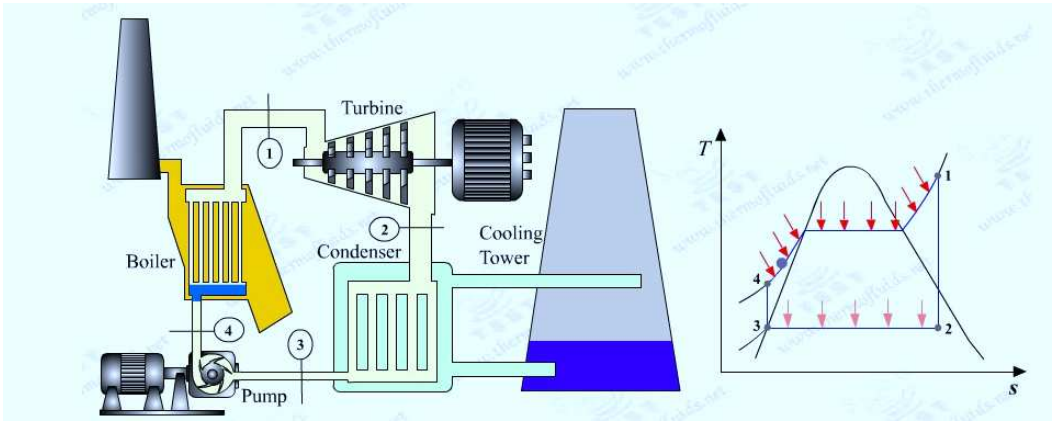


Ilustración 15: Ciclo abierto de Rankine. Basico de cualquier central térmica Fuente: www.catedu.es

La temperatura máxima que puede adquirir el vapor sobrecalentado esta normalmente limitada por los materiales empleados en la zona de sobrecalentamiento de la caldera. Hoy en día la temperatura máxima llega a 540ºC. La presión máxima es del orden de los 150 bar y está limitada por problemas de diseño mecánico de la

turbina y por la humedad admisible a la salida de la misma (10%). La presión mínima es funciona de la temperatura del condensador y su magnitud suele estar situada en el intervalo de 0,03 bar y 0,14 bar, lo que corresponde a una temperatura del condensador de 26ºC y 52ºC respectivamente.

3.3.2.2. Descripción de los circuitos y elementos principales de la instalación

Habitualmente en las centrales térmicas de vapor se utilizan como maquinas motrices las máquinas de vapor, o las turbinas de vapor, en algunos casos, ambos tipos de máquinas. Ocasionalmente además de accionar los generadores eléctricos principales, en las centrales térmicas de vapor, se pueden útiles para el accionamiento de equipos auxiliares, tales como bombas, hogares mecánicos, ventiladores, excitatrices.

El vapor necesario para el funcionamiento de las maquinas motrices, se produce en las calderas, mediante la quema de combustible en los hogares que forman parte integrante de la caldera. Mediante las canalizaciones bien aisladas el vapor se conduce hasta las maquinas o turbinas de vapor.

3.3.2.2.1. Los elementos principales de la instalación

- ***Generadores de Vapor***

Son las calderas que producen vapor a una presión superior a la requerida. Son unos recipientes en las que se calienta el agua para convertirse en vapor. Con este nombre no solo se refiere al recipiente, sino en general a toda la instalación y elementos anejos a ella, tales como el hogar, ahí es donde se realiza la quema del combustible para producir el calor necesarios; los conductores de humos de combustión, los calentadores de aire de combustión, economizador de agua de alimentación, recalentadores de vapor.

Por lo tanto se puede definir a la caldera como todo sistema a presión en el que el agua se transforma en vapor, como producto final, por cesión de calor de una fuente a temperatura superior.

En los recipientes de la caldera el vapor se acumula en el espacio comprendido entre el agua y las paredes superiores del recipiente, provocando de esta manera aumento de presión que determina un aumento de temperatura en el agua y en el vapor. Algunas de las centrales térmicas llegan a presiones de vapor del orden de unos 180 bar o kg/cm^2, como mínimo, que requieren temperaturas de ebullición de unos 350ºC llegando a unos 540ºC.

El funcionamiento de una caldera depende de los siguientes factores:

- Superficie de calefacción
- Cantidad de aire suministrado al hogar
- Clase y calidad de combustible
- Presión de vapor

Las calderas más utilizadas en las centrales térmicas se clasifican de siguiente manera:

- Calderas sin circulación de agua

El movimiento del agua está producido por la convección natural o por el desplazamiento del vapor producido a través de la masa del líquido. Este vapor se desprende a través del plano de agua y lleva una fuerte proporción de humedad, se trata de vapor saturado húmedo.

- Calderas con circulación natural

La circulación natural se debe a la diferencia de pesos entre dos columnas de líquido de las que una, más liguera tiende a elevarse, mientras que la más pesada tiende a descender. La diferencia de peso puede resultar de una diferencia de temperaturas, la más caliente siendo la más liguera.

Las columnas ascendente y descendente están a igual temperatura, y su diferencia de peso se debe a la presencia en una de ellas, del vapor producido por el calentamiento. La intensidad de circulación será tanto más elevada cuando mayor sea el volumen ocupado por el vapor en la columna ascendente. Entonces para tener una circulación activa hay que producir la vaporización en la parte más baja de la caldera.

Por tanto a medida que se eleva la presión, disminuye el volumen específico del vapor, mientras que aumenta el volumen específico del agua. De esta manera se puede deducir que cuanto mayor sea la presión de servicio más disminuye la diferencia de peso de las columnas, lo que hace menos activa la circulación.

La circulación natural no es posible en caso de tener la presión crítica, que es aproximadamente unos 230 bar o kg/cm^2, esto se debe a que el agua y el vapor tienen el mismo volumen específico.

- Calderas con circulación controlada

Dichas calderas utilizan una bomba para incrementar la circulación de agua o de vapor. Entre las conocidas se puede citar la caldera La Mont, esta lleva un depósito de agua y vapor, las pantallas de la cámara de combustión y el haz vaporizador están sometidos a la influencia de una bomba de circulación, mientras que la circulación de vapor en el recalentador se realiza como en las calderas de circulación natural.

El funcionamiento de estas calderas se produce mediante una bomba de circulación situada bajo el depósito de la caldera, que impulsa el agua de circulación en uno o varios colectores desde el punto donde parten los tubos vaporizadores.

- Calderas con circulación forzada

Estas calderas utilizan una fuerza exterior para que el agua circule por la caldera o pase a través de ella. La vaporización se realiza en sistemas tubulares montados en serie y el agua corresponde a la cantidad total de vapor producido, es obligada a pasar por los tubos de la caldera mediante una bomba de alimentación de gran potencia.

También estas calderas pueden llamarse calderas de circuito abierto, el agua solamente realiza un paso entre su entrada en un extremo y salida en el otro. Estas calderas no llevan depósitos de acumulación de agua y vapor, y pueden emplearse tanto a presiones inferiores a la presión crítica (aproximadamente 230 bar o kg/cm^2), como a superiores a ésta. Aunque en general estas calderas no se emplean a presiones inferiores de 80 bar o kg/cm^2.

Como ejemplo las calderas más empleadas son el generador de vapor Benson y generador monotubular de vapor Sulzer.

- Calderas especiales

Estas calderas son de construcción especial debido a que deben adaptarse a las peculiares características de funcionamiento, cumpliendo ciertas condiciones. Como calderas especiales más interesantes se puede encontrar las siguientes:

- Calderas de doble circulación
- Generadores de vapor sobrealimentado
- Calderas para ciclos binarios
- Cambiadores vaporizadores para centrales nucleares

- ***Turbinas***

Son unas turbomaquinas que transforman la energía de un flujo de vapor en energía mecánica mediante un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo, en este caso vapor y el rodete, elemento principal de la turbina que cuenta con unas palas o alabes de forma característica para poder realzar un intercambio energético de manera eficiente.

Estas turbinas se presentan en diversos ciclos de potencia que utilizan un fluido que pueda cambiar de fases. Uno de estos ciclos es el Ciclo de Rankine, genera el vapor en una caldera, de la cual sale en unas condiciones de elevada temperatura y presión.

Se pueden distinguir dos partes de una turbina, el rotor y el estator. El primero está formado por ruedas de alabes unidas al eje y que constituyen la parte móvil de la turbina. Y el segundo está formado por aleves no unidos al eje, sino a la carcasa de la turbinas.

- ***Generadores***

La energía mecánica producida por una turbina es aprovechada por un generador para producir electricidad. Entonces generador es una máquina que produce una corriente eléctrica. Es capaz de mantener una diferencia de cargas eléctricas entre dos puntos, el voltaje, transformando otras formas en energía mecánica y posteriormente en una corriente alterna de electricidad.

Para la construcción de un generador eléctrico de utiliza el principio de "inducción electromagnética" descubierto por Michael Faraday en 1831. Este establece que si un conductor eléctrico es movido a través de un campo magnético, se inducirá una corriente eléctrica que fluirá a través del conductor.

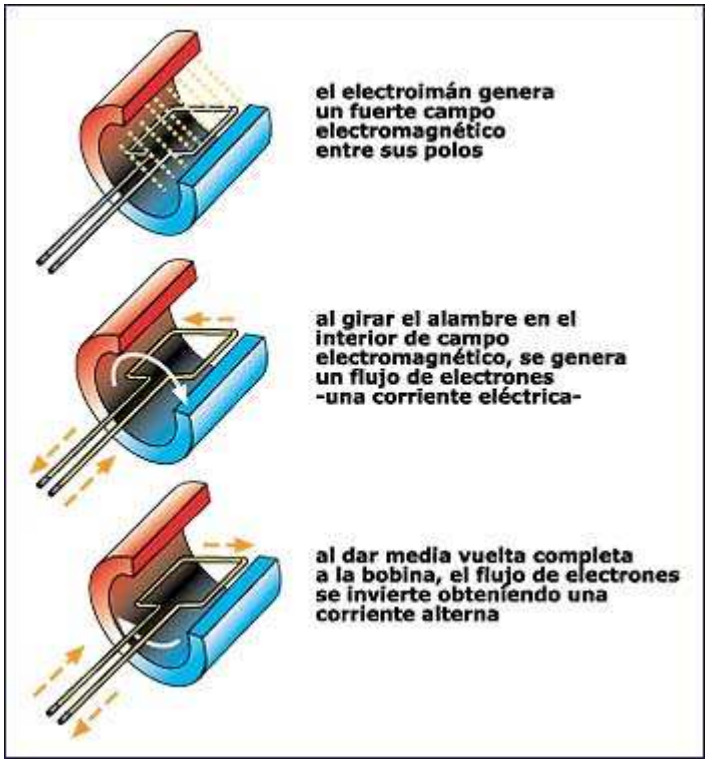


Ilustración 16: Campo magnético de un generador. Fuente: www.google.com/imagenes

Los componentes de un generador desde el punto de vista mecánico son el estator y el rotor. El primero es una armadura metálica en reposo cubierta por alambres de cobre que forman un circuito. Y el segundo es un eje que rota dentro del estator impulsado

or una turbina. Este rotor en su parte más externa tiene un electroimán alimentado por una corriente eléctrica pequeña.

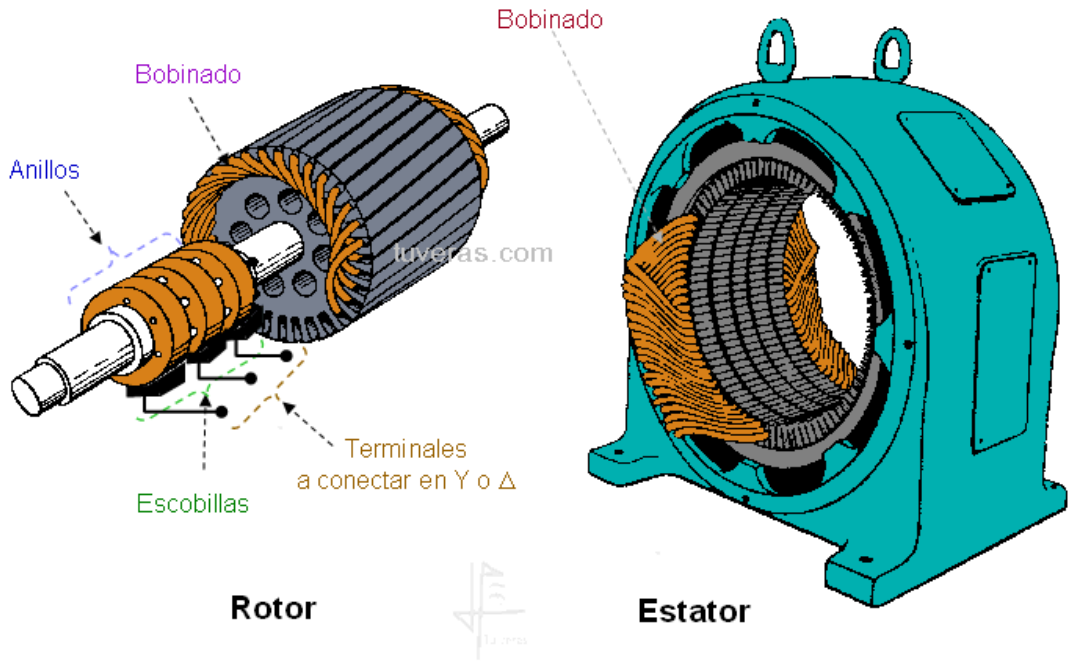


Ilustración 17: Componentes de un generador. Fuente: www.google.com/imagenes

Al girar el rotor a grande velocidades gracias a una energía mecánica externa proviene de una turbina, se producen corrientes en los hilos de cobre del estator.

Un generador que gira a 1000 rpm puede producir una corriente de 1 A con un voltaje de 6V.

- ***Electrofiltro o precipitador electrostático***

Sirven para regular las emisiones de las partículas. Su función es cargar eléctricamente las partículas de ceniza volante en polvo presente en los humos, para su recolección y posterior evacuación. La unidad se compone de una serie de placas verticales entre los que circulan los humos, en cada dos placas consecutivas, se encuentran los electrodos que facilitan el campo eléctrico debidamente centrado.

El procedimiento que realiza un precipitar electrostático para atrapar las partículas es el siguiente:

- Carga: al atravesar los humos el campo eléctrico, las partículas se cargan negativamente.

  El campo eléctrico se establece entre las placas colectoras conectadas a tierra, que constituyen electrodo positivo y los electrodos de descarga en el flujo de humos, conectados a una fuente eléctrica con polaridad negativa.

- Recolección: las partículas cargadas negativamente son atraídas por las placas colectoras conectadas a tierra, con polaridad positiva, y emigran a través del flujo de humos.

- Golpeo: la capa de polvo de ceniza volante que se forma sobre las placas colectoras se elimina periódicamente, mediante un golpeo instantáneo de la superficie colectora que fuerza el desalojo del polvo acumulativo.

- Retirada de la ceniza: las partículas retiradas caen desde las placas al interior de unas tolvas.

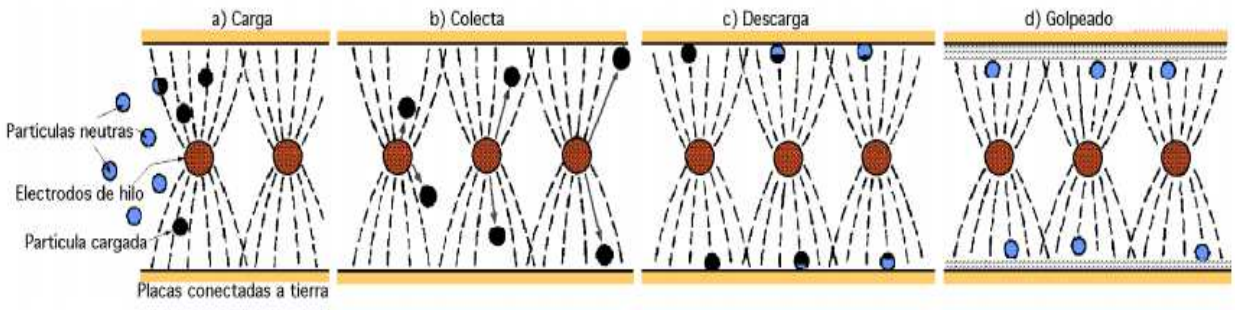


Ilustración 18: Procedimiento de Electrofiltro. Fuente: mecaingenieriaunet.blogspot.com

- ***Torres de refrigeración***

Son equipos que se usan para enfriar agua en grandes volúmenes, extrayendo el calor del agua mediante evaporación o conducción. Este proceso se puede considerar eficiente y económico, comparando con otros equipos de enfriamiento como los cambiadores de calor, donde el enfriamiento ocurre a través de una pared.

Una vez introducida el agua en mayor superficie de la torre por medio de boquillas de distribución, el enfriamiento ocurre cuando este al caer a través de la torre se pone en contacto directo con una corriente de aire que fluye a contracorriente o a flujo cruzado con una temperatura menor a la temperatura del agua. Por lo cual el agua se enfría por evaporación, originando que la temperatura del agua descienda. La temperatura límite de enfriamiento del agua es la temperatura del aire a la entrada de la torre.

Parte del agua que se evapora, causa la emisión de calor, por lo que se puede observar en muchas de las industrias en las que se encuentran estos elementos de refrigeración el escape de vapor de agua encima.

3.3.2.2.2. Los circuitos de la instalación

Las centrales térmicas de vapor componen tres partes constructivas esenciales:

1. Sala de calderas
2. Sala de maquinas
3. Sala de distribución

Se puede decir que a cada parte constructiva pertenece un circuito principal y de intercambio de energía.

- ***Circuito de combustible o aire-humos***

  El combustible se quema en el hogar, constituido por un recinto cerrado por paredes de mampostera, en las que se encuentran los canales de circulación del aire necesario para la combustión.

  Tras calentar la caldera donde, tiene lugar la vaporización del agua, los gases residuales de la combustión o humos pasan a un conducto para ser eliminado al exterior. Como los gases no se enfrían al instante, puede aprovecharse la energía térmica en ellos contenida para el circuito primario de uno o varios recalentadores de vapor y para el circuito primario de uno o más economizadores del agua de alimentación de la caldera. Desde este punto los gases pasan a la chimenea de tiro natural o de tiro forzado y un sistema de precipitador electromagnético antes de salir al exterior.

- ***Circuito de agua-vapor***

  El agua se vaporiza en los depósitos de las calderas, son unos depósitos de agua que se calienta hasta que este se convierte en vapor. El vapor al salir de la caldera aun contiene las partículas liquidas, por tanto se le convierte en vapor recalentado pasándolo por el circuito secundario de uno o más recalentadores primarios, situados en la trayectoria de los gases de combustión.

  El vapor a presión y alta temperatura se conduce hasta la turbina o máquina de vapor, donde se expansiona produciendo de esta manera la energía mecánica. En

las turbinas modernas se realizan extracciones de vapor, conduciendo este de nuevo hacia los recalentadores secundarios de la caldera donde el vapor sufre nuevos recalentamientos para ser posteriormente introducido en los siguientes cuerpos de las turbinas o en otras turbinas independientes. A parte también se pueden realizar extracciones de vapor para calentar el agua de alimentación.

Una central térmica de vapor tiene mejor rendimiento cuando más frio esté el vapor de escape, a la salida de la turbina, el vapor se hace pasar por un condensador que no es más que un dispositivo de refrigeración, donde el vapor se condensa y se transforma en agua de nuevo. La condensación se realiza introduciendo agua fría a presión en el condensador, a la que se obliga a circular por unos serpentines de refrigeración.

El agua que es originado tras la condensación y procede de la turbina se impulsa hacia las calderas por medio de bombas de alimentación. Para que el rendimiento térmico aumente es conveniente que el agua de alimentación entre en la caldera ya caliente, por este motivo se hace pasar previamente por los circuitos secundarios de uno o más precalentadores, calentados por las extracciones de vapor de las turbinas, y por uno o más economizadores, calentados por los gases de escape antes de su salida a la atmosfera por la chimenea.

- ***Circuito de energía eléctrica***

La energía eléctrica se produce en los generadores eléctricos, accionados por las maquinas o por las turbinas de vapor. En la mayoría de las centrales se produce corriente alterna trifásica.

La corriente eléctrica se lleva desde los generadores a los transformadores, ahí es donde se eleva la tensión de la energía producida. Los transformadores habitualmente tiene un local especifico de localización, que está separado de la sala d maquinas. Es importante tener en cuenta dicha separación para poder realizar en condiciones las inspecciones de los aparatos, transformadores, etc. Para

el montaje y desmontaje de los transformadores también debe haber espacio suficiente para poder instalar las canalizaciones.

A parte de estos circuitos existen otros que son auxiliares y los más señalados son los siguientes:

- Circuito de tratamiento del combustible
- Circuito de aire de combustible
- Circuito de eliminación de cenizas y escorias
- Circuito de tratamiento de agua de refrigeración
- Circuito de lubricación
- Circuito de mando
- Circuito de hidrogeno

3.3.2.3. Elementos afectados más señalados de la central

Entre los elementos más afectados de una central térmica se encuentran principalmente los generadores de vapor, electrofiltro o también llamado y señalado como precipitador electromagnético y por último la chimenea de gases. En los siguientes apartados se describirán los efectos más comunes producidos en los mismos.

3.3.2.3.1. Generador de Vapor

El generador de vapor o caldera, sufre habitualmente por los efectos de carbón y de las cenizas las formaciones de escorias y ensuciamiento en los tubos intercambiadores de calor, tanto como en los sobrecalentadores. Esto se debe a los efectos, ya señalados en los apartados anteriores, de factores slagging y fouling. Pero por otra parte hay que destacar también la corrosión que pueden originar mismamente estos factores y los componentes de las cenizas.

- **Efecto Slagging y Fouling**

Para un repaso y mejor definición el ***efecto slagging***, es la escorificación, al fundirse las cenizas a altas temperaturas forman unos depósitos fundidos los cuales se quedan resolidificados en las paredes y los tubos de la caldera. Este fenómeno se produce normalmente en la zona situada por encima de los quemadores, estas son las zonas que están sometidas a una radiación térmica.

El ***efecto fouling*** se debe a una incrustación de depósitos, que provocan capa de suciedad o ensuciamiento en la zona de convección de la caldera.

A modo explicativo para poder diferenciar las zonas de la caldera con mayor detalle se muestra una ilustración de la misma.

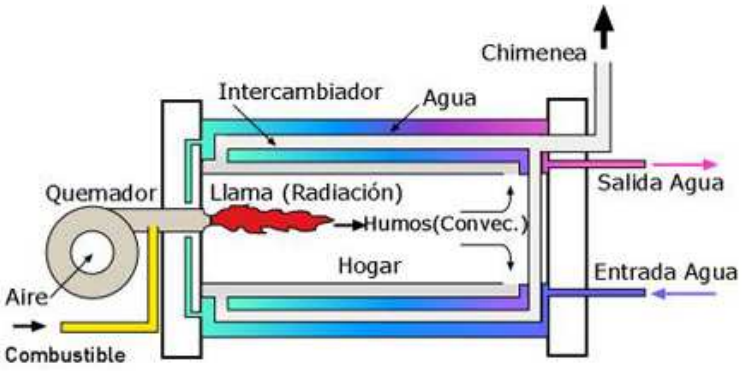


Ilustración 19: Definición de zonas en una caldera basica. Fuente: www.empresaeficiente.com

En la siguiente ilustración se puede observar las formaciones de escoria que se presentan por el fenómeno como slagging. En dichas ilustraciones se ve claramente su formación y se aprecia la textura de la misma. La primera fotografía de la segunda fila presenta poco escoria, esto quiere decir que su formación es normal, o más bien baja. Dicha caldera tendrá un índice correcto de slagging.

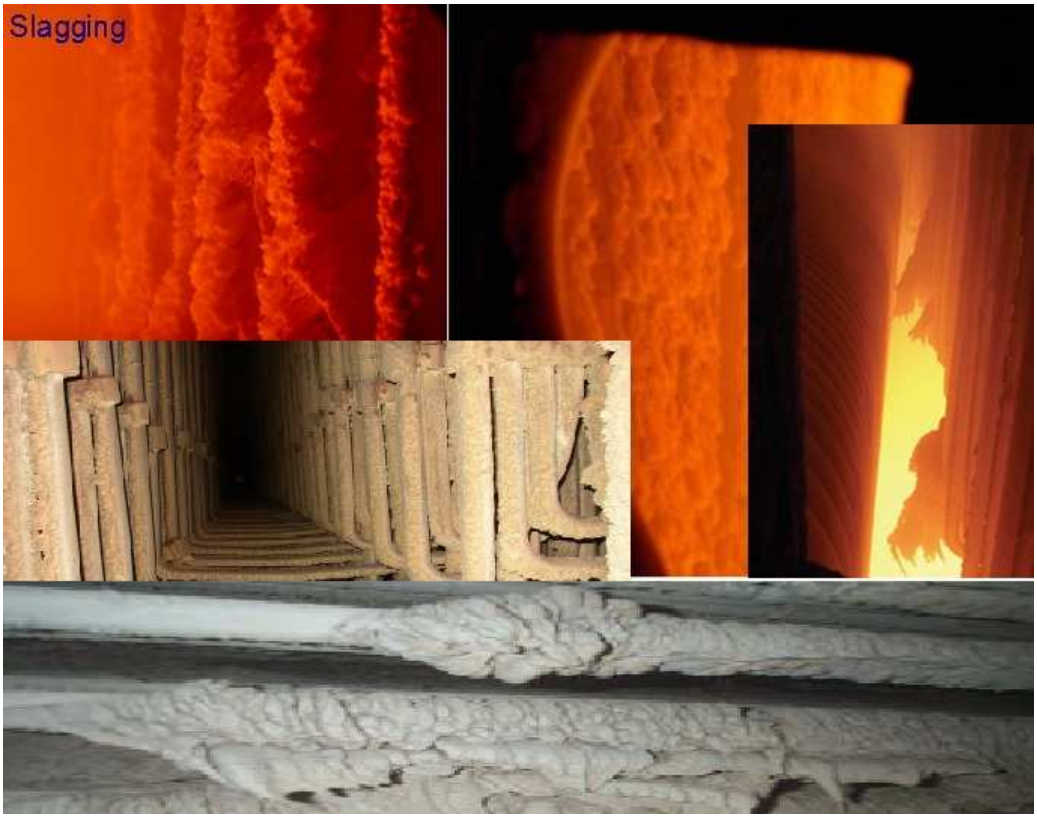


Ilustración 20: Efecto Slagging. Fuente: www.c4combustion.com

En la próxima ilustración se puede observar las incrustaciones y depósitos del fenómeno fouling. Se observa notable diferencia con el fenómeno anterior, y también se puede observar presencia de corrosión en los tubos provocada por las incrustaciones de las cenizas.

Ilustración 21: Efectos Fouling en la caldera. Fuente: technoindustria.wordpress.com

Estos índices y fenómenos afectan al diseño y operatividad de la caldera. En un principio como las cenizas de carbón son ricas en alúmino silicatos los cuales reducen la temperatura de fusión y de esta manera aumentan ***el slagging y el fouling (escoria e incrustaciones)*** dentro de la caldera. En general las incrustaciones pueden originar la incrustación en los tubos de convección.

Por otra parte no solo los alúmino silicatos son culpables de producir dichos fenómenos, sino que cualquier componente químico de las cenizas puede producir las alteraciones dentro del hogar de la caldera. Está claro que no todos

son generadores de efectos tan significativos, incluso hay algunos que posibilitan su disminución tales como (…)

Respecto al diseño de la caldera, en general el ensuciamiento progresivo en la superficie de los hogares y recalentadores no ocurre tan a menudo debido a que las características de las cenizas no son tan severas en comparación con la temperatura de los tubos de metal. Pero si se encuentra este problema en la caldera la solución generalmente es la mejora de las condiciones de combustión en el horno, y / o modificación de los procedimientos de soplado de hollín, para no recolectar el ensuciamiento, de otra manera este procedimiento hace evitar la corrosión de los tubos.

Los estudios realizados en los laboratorios y en los campos de instalaciones muestran que los ratios de depósitos de cenizas están en función de la velocidad y la temperatura de los gases de combustión, y de la concentración de ceniza en forma de aceite en los gases de combustión. La geometría de la superficie de hogar y el espaciado de los tubos en los bancos de convección se seleccionan mediante el diseño de una caldera, precisamente para minimizar el ratio o los índices de los fenómenos señalados en este apartado.

- **Efecto Corrosión**

Todos los carbones bituminosos contienen suficiente azufre y componentes alcalinos que producen depósitos corrosivos de cenizas en los sobrecalentadores y recalentadores, por lo que si el contenido supera *3,5% en azufre y 0,25% en cloro* aparece una preocupación.

La experiencia ha demostrado a lo largo de los años que a la corrosión de los tubos afecta la temperatura de metal y la temperatura de los gases. En la imagen su puede apreciar cómo se corroen los tubos de un sobrecalentador mediante los flujos de gas.

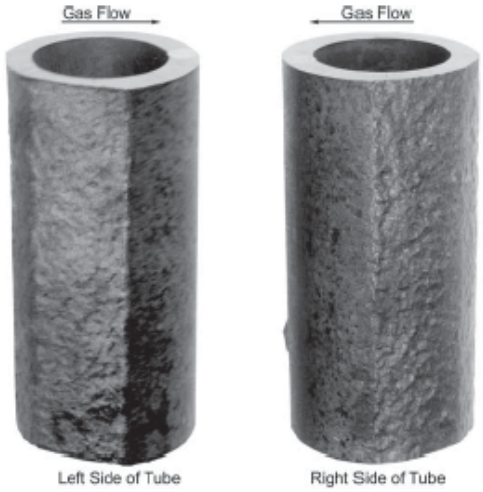
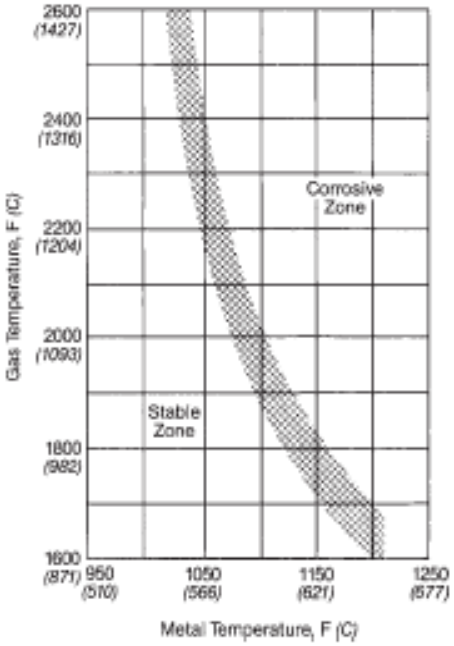


Ilustración 22: Corrosión tipica de tubo 18Cr-8Ni del 2º sobrecalentador de una caldera industrial.
Fuente: Libro proveedores de las calderas The Babcock & Wilcox Company a nivel industrial. Capítulo 23



Gráfica 1:Corrosión de cenizas - zonas estables y corrosivas.

Por tanto existe una gráfica que se utiliza de guía en el diseño de los tubos, esta indica una zona estable y corrosiva de la ceniza de combustible en función de temperatura de gas y de la temperatura de metal del tubo.

En el caso de estar en zona corrosiva, se dimensiona de nuevo un tubo realizando un cambio en su geometría e aleación de metales.

Por otra parte existen otros ***mecanismos de corrosión*** son los elementos de las cenizas cuales producen corrosión: ***Sodio (Na), Potasio (K), Aluminio (Al), Azufre (S) y Hierro (Fe)***, son elementos químicos derivados de la materia mineral del carbón. Los minerales que suministran estos elementos incluyen pizarras, arcillas y piritas que se encuentran habitualmente en todos los carbones.

Durante la combustión éstos minerales están expuestos a altas temperaturas y reducen fuertemente efectos de carbón en periodos a corto plazo. Aunque en estado estable, la materia mineral también sufre una descomposición rápida, en estas condiciones algunos de los álcalis se convierten en compuestos simples, con los puntos de rocío en el rango de *538 a 704 ºC (1000 a 1300 F).* Además, el azufre en el carbón se oxida, liberando SO_2 con la formación de una pequeña cantidad de SO_3, dejando un residuo de óxido de hierro (Fe_2O_3).

En mayor parte de la materia mineral o sus derivados compuestos reaccionan para formar las partículas vítreas de cenizas volantes, estas se encuentran en el depósito de gases de combustión justo en la superficie del tubo. De forma lenta y durante un período de semanas, los álcalis y los óxidos de azufre se difunden a través de la capa de ceniza volante hacia la superficie del tubo. En la zona de temperatura inferior del depósito de ceniza, las reacciones químicas como los álcalis , los óxidos de azufre , los componentes de hierro y aluminio de las cenizas volantes forman complejos sulfatos alcalinos tales como:

$$3K_3SO_4 + Fe_2O_3 + 3SO_3 \rightarrow 2K_3Fe(SO_4)_3$$

y

$$K_2SO_4 + Al_2O_3 + 3SO_3 \rightarrow 2KAl(SO_4)_2$$

Para prevenir la corrosión existen medidas corrosivas. Que se basan en varios métodos, para combatir la corrosión en tubos de sobrecalentadores y recalentadores, que son los siguientes:

1. El uso de los escudos de acero inoxidable para proteger los tubos más vulnerables.
2. La selección de carbón.
3. Mejora de la condición de combustión, es decir, el suministro y el exceso de aire apropiado.
4. Uso de aleaciones resistentes a la corrosión y uso de revestimiento con aleación en el sobrecalentador más vulnerables y los tubos de recalentadores.

El nuevo acero inoxidable de alto contenido de cromo es generalmente más resistente a la corrosión de las cenizas de carbón, pero el aditivo de cromo tiende a degradar otras propiedades metalúrgicas. Los nuevos aceros inoxidables han sido modificados para tener un 25 % de cromo y un 20 % de níquel, estos ofrecen un mejor rendimiento para condiciones moderadas. Y los aceros inoxidables con contenidos más altos de níquel-cromo en aleaciones y revestimientos pueden ofrecer máxima resistencia a las condiciones más severas.

3.3.2.3.2. Efecto en Electrofiltro

En el diseño de los electrofiltros para la recolección en seco de las cenizas, la resistividad de las cenizas es uno de los factores más importantes a considerar. Desde que la resistividad influye inversamente a los parámetros eléctricos operacionales tanto como al diseño del aparato, los valores con resistividades altos necesitan un electrofiltro con **características de diseño** más largo, para mejorar la recolección. Esto también juega un papel importante en el **rendimiento** del electrofiltro.

También cabe destacar que en un electrofiltro la resistividad tiene otros efectos como algunos **rompimientos eléctricos** local de un campo eléctrico en la capa. Cuando esto ocurre nuevos iones de la polaridad contraria son inyectados dentro de las placas para reducir la carga de las partículas. Este fenómeno lo llaman **"corona invertida"** que puede originarse cuando la resistividad de la capa es alta mayores de 1×10^{10} ohm.cm, el efecto que produce es reducción de recolección de las partículas en suspensión.

A resistividades por debajo de 10^8 ohm.cm, las partículas no se mantienen de forma fija en las placas para ser evacuadas posteriormente con golpeos, sino que están bastante sueltos. No cumplen el proceso en el cual las partículas con cargas negativas se adhieran a las placas recolectoras para poder ser eliminas mediante vibraciones o golpeos hacia los depósitos, estos se encuentran en el fondo del precipitador. Por este motivo pasan a la chimenea de gases y puede escaparse a la atmosfera.

Como norma general los precipitadores electrostático no son muy apropiados para uso en procesos que sean demasiado variables, ya que son bastante sensibles a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas (velocidad, temperatura, composición de las partículas y del gas, la carga de las partículas.

Hay que tener en cuenta los componentes de la composición de las partículas que provocan **problemas en recolección** de polvo y el incremento de las emisiones de salida de humos, esencialmente se presentan con contenidos altos de *calcio (Ca) y magnesio (Mg).*

En cambio los componentes de carbones y sus cenizas que reducen la resistividad de esta manera **favoreciendo la recolección** en los precipitadores o electrofiltros, dejando el paso de la menor cantidad de partículas contaminantes a la chimenea de gases son los siguientes:

- *Humedad, Azufre, Sodio, Potasio*

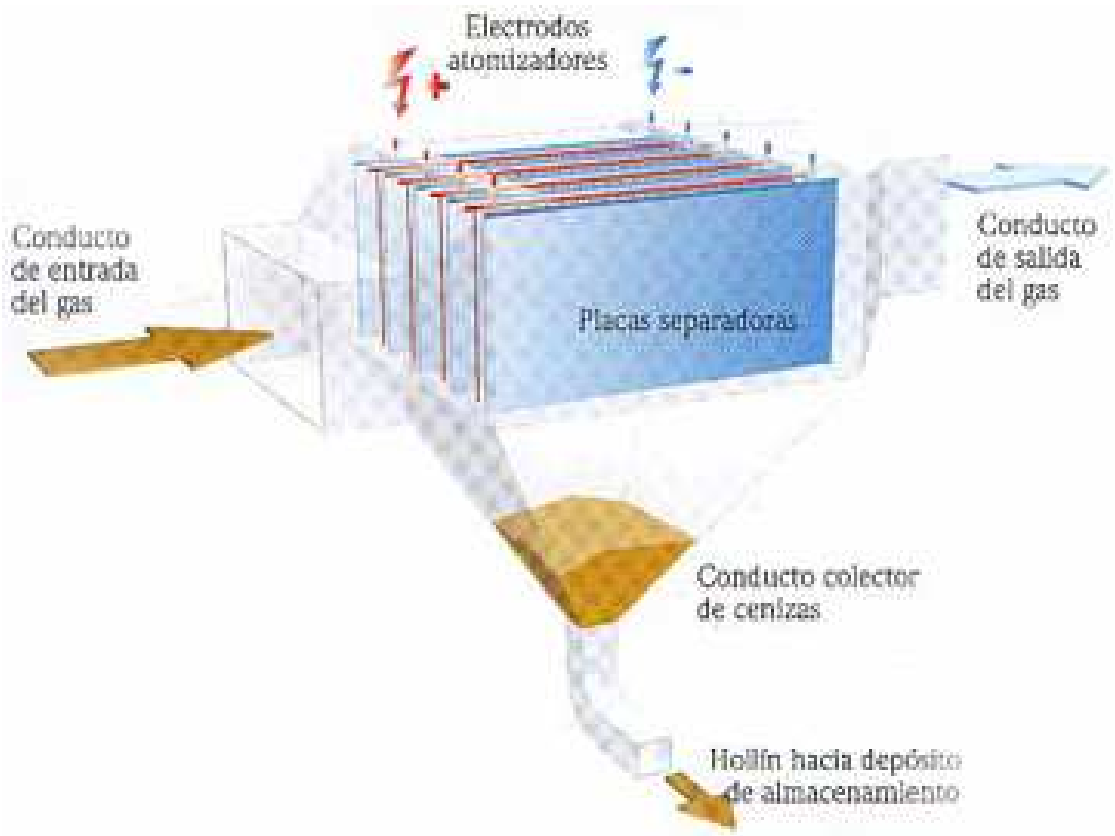


Ilustración 23: Buena recolección de partículas. Fuente: www.newprocess.cl

Ciertas partículas son difíciles de recolectar debido a sus características de resistividad demasiado altas o bajas. Hay que tratar de evitar estas situaciones debido a que puede existir un peligro de exposición al tratar gases de combustión y/o recolectar partículas de combustibles. Para estos casos, en caso de que pase dicha situación, se necesita personal de mantenimiento autorizado para proteger al personal de alto voltaje.

Por otra parte se conoce que las partículas tienen forma esférica, se considera esta forma para el cálculo de la velocidad de migraciones y la eficiencia de electrofiltro. Al desplazarse una partícula hacia la placa de colección se somete a una fuerza de aceleración provocada por el campo electrostático y a otra fuerza de retardo a causa de la viscosidad de gas.

Para un campo dado, la velocidad de migración esta normalmente en un mínimo para partículas de diámetro alrededor de 0,5 micrómetros. Las partículas más pequeñas se mueven más rápidas porque la carga no decrece.

Las principales formas que puede ayudar a aumentar la eficiencia son:

- Reducción de espacio entre placas
- Reducción de velocidad de los gases
- Aumento de área de recolección
- Aumento de velocidad de migración
- Aumento de voltaje

En resumen, se ve claramente que las chimeneas de los gases dependen en la mayor medida de los precipitadores electrostáticos, ya que todas las partículas que quedan en suspensión pasan directamente a la salida de los gases sin tratamiento añadido. Por este motivo se puede concluir este apartado de las descripciones señaladas anteriormente.

Hoy en día se puede apreciar diferentes tipos de los precipitadores en las centrales debido a las restricciones en emisiones en la normativa. Ya que su instalación ciñe al cumplimiento de las normativas establecidas por el gobierno.

3.4. Estado de la investigación científica.

El presente apartado responde a la necesidad de conocer el estado actual de trabajos o estudios similares al desarrollado dentro del campo de la energía, en especial combustible como carbón. En el subcapítulo de Investigación científica, se realiza un análisis con la ayuda de una base de datos, en este caso ***Scopus*****,** de artículos, libros o patentes que pueden tener o no relación con el caso de estudio.

Se ha seleccionado este buscador de artículos porque dispone de una base de datos mayor, ya que utiliza también el fondo de textos de la Universidad de Cantabria. Otra característica importante de este buscador, puede agrupar los artículos buscados mediante una gráfica, teniendo en cuenta el año de publicación y el número de los artículos por año. La búsqueda temporal normalmente empieza en el año 1929 y acaba con el año actual en el que encontramos. Otras opciones eran el uso de bases de datos como Scholar Google, o Elsevier, pero los resultados que arrojaban estos buscadores eran de menor precisión de ordenación.

El modo de proceder para realización de este análisis es, en un primer lugar, introducir distintos criterios de búsqueda mediante el uso de 2, 3 o 4 palabras clave que acoten la búsqueda, realizado una combinación entre estas, pudiendo así elaborar una tabla con los principales resultados de cada criterio de búsqueda. En el primer paso se trató de hacer un recuento total de artículos y del número de los mismos que guardan alguna relación con el presente estudio, para poder crear una idea más clara sobre el tema desarrollado. Poder ver si el tema tiene muchos estudios o patentes a nivel mundial o por el contrario es algo novedoso y raro o único. Pero la búsqueda arroja en ocasiones más de 200.000 resultados y es imposible realizar un análisis de cada uno de ellos.

La alternativa que proporciona la base de datos *Scopus*, es acotar la búsqueda mediante varias palabras clave en conjunto y poder reducir la busqueda dependiendo de cada caso a 34.630, después 10.689 y llegando a tan solo 454 y 297 resultados.

Aunque estos resultados siguen siendo altos, la opción alternativa es fijarse en cada grafica que aparece tras la busqueda y que tiene siguiente aspecto:

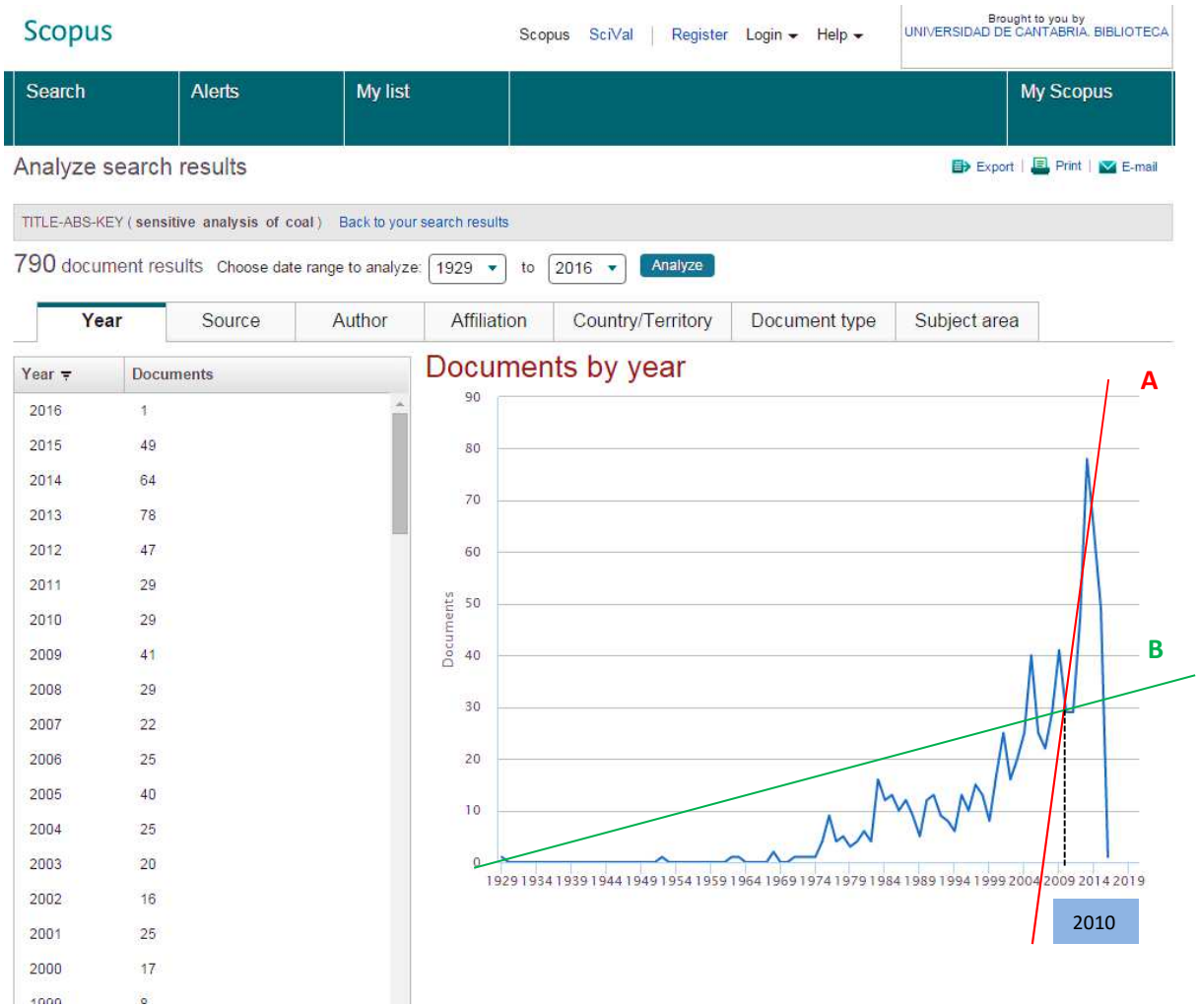


Ilustración 24: Busqueda general en Scopus

Se observa que la gráfica general de la primera busqueda tiene unos picos, los cuales tienen alguna relación o no con el estudio desarrollado. Para delimitar mejor la busqueda de los resultados, se fija criterio de observación de los puntos más altos o "picos" de la gráfica y también los más bajos. Los primeros artículos aparecen en los años 50, después de un gran parón vuelven a aparecer en los años 60, de manera progresiva y ascendiente vuelve el interés por el tema desarrollado a principios de los años 70 con el punto más alto por este momento en el 2013.

Teniendo en cuenta que las últimas tecnologías empezaron a instalarse a finales de los 90 y el último cambio de normativa relacionada con los combustibles y sus contaminantes, partículas nocivas, etc., están fijados a partir de 2010, dicha busqueda se acotará a partir del año 2010 en adelante, con mayor precisión hasta 2016. Estas

fechas también se pueden comprobar mediante las líneas de tendencias trazadas en la misma gráfica. La primera llamada “A” en color rojo, se traza siguiendo la trayectoria de auge de los últimos años. La segunda llamada “B” en color verde, se traza desde el primer punto inicial, hacia el último punto más bajo. Su corte origina un punto, junto con una línea discontinua mostrada con color negro. Alargando la misma hasta el eje X, que muestra los años se obtiene año 2010.

Por otro lado hay que tener en cuenta que en la mayoría de los artículos recientes se realizan citaciones de los años anteriores, esto da comprobación si un método desarrollado ha sido efectivo o no por los artículos recientes.

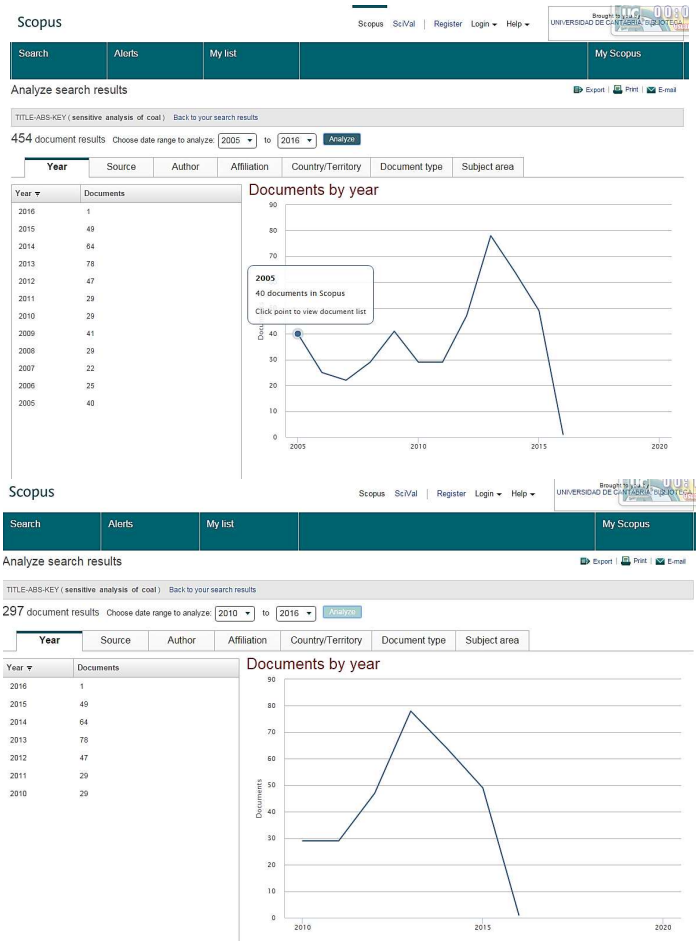


Ilustración 25: Busqueda acotada a los años recientes

Por tanto la opción alternativa es realizar el análisis de estos picos temporales acotados en los años citados y elaborar una tabla con los artículos más adecuados al contenido.

De los artículos analizados se muestra tanto el nombre de los mismos como la fecha de publicación, el autor o el nivel de relación con el estudio tratado. Este nivel de relación puede tomar tres posibles valores: nulo, bajo, intermedio o alto. Se clasificara como nulo un resultado, cuando contenga las palabras claves del criterio de busqueda, pero no guarde relación con el estudio buscado, esto es que utilice un proceso distinto, distinta materia prima o no realice un análisis de sensibilidad. Se clasificara como bajo si bien uno de los factores citados anteriormente, proceso o materia prima empleado es el mismo o realiza un estudio de análisis de sensibilidad necesario. En el caso de que dos de estos criterios se cumplan el nivel de relación será intermedio. Si el estudio cumple con todos los criterios de busqueda el nivel de relación será alto, esto quiere decir que existen estudios muy parecidos al desarrollado y la posibilidad de aportar algo nuevo se reduce.

A continuación se muestra las tablas obtenidas empleando los criterios de busqueda mediante el buscador especificado anteriormente.

Tabla 6: Criterio de selección: "coal, sensitivity analysis, parameters of coal"

	Artículo	Autor	Año	Nivel de relación
Criterio	**COAL - SENSITIVITY ANALYSIS-PARAMETERS OF COAL**			
1	Modeling the future costs of carbón capture using experts elicited probabilities under policy scenarios.	Gregory F. Nemet, Erin Baker, Karen E. Jenni.	2013	Bajo
2	Kinetic models of coal char steam gasification and sensetivity analysis of the parameters	Shuai C.,Bin Y.,Hu S.,Xu K., Xu C.-F.	2013	Intermedio
3	Life cycle assessment of hydrogen production from underground coal gasification.	Aman Verma, Amit Kumar	2015	Nulo

4	Multi-Criteria evaluation of coal properties in term of gasification.	Jolanta Marcianiak-Kowalska, Tomasz Niedoba, Agnieszka Surowiak, Tadeusz Tumidajski.	2014	Bajo
5	Mathematical modeling of coal gasification processes in a well stirred reactor: Effects of devolatization and moisture content.	Jian Xu and Li Qiao	2013	Bajo
6	Dynamic Modeling of the compoduction of liquid fuels and electricity from a hybrid solar gasier with various fuel blends.	Ashok A. Kaniyal, Philip J. van Eyk, Graham J. Nathan	2013	Nulo
7	Photovoltaic energy generation in Brazil – Cost analysis using coal-fired power plants as comparison.	Corrado Lacchini, Joao Carlos V. Dos Santos	2012	Nulo
8	The role of carbon capture and storage in a future sustainable energy system	Henrik Lund, Brian Vad Mathiesen.	2012	Bajo
9	Expert elicitation of cost, performance, and RD&B budgets for coal power with CCS.	Gabriel Chan, Laura D. Anadon, Melissa Chan, Audrey Lee	2011	Nulo
10	Chemical kinetic study of a novel lignocellulosic biofuel: Di-n-butyl ether oxidation in a laminar flow reactor and flames.	Liming Cai, Alena Sudholt, Dong Joon Lee, Fokion N. Egolfopoulos, Heinz Pitsch, Charles K. Westbrook, S. Mani Sarathy.	2013	Nulo

Tabla 7: Criterio de selección "Coal, Coal Effects, Properties, Optimization Process, Fly Ash"

	Artículo	Autor	Año	Nivel de relación
Criterio	**COAL -COAL EFFECTS-COAL PROPERTIES- OPTIMIZACTION PROCESS- FLY ASH**			
1	A comporative study of the multi-objective optimization algorithms for coal-fired boilers	Feng Wu, Hao Zhou, Jia-Pei Zhao, Ke-Fa Cen	2011	Bajo
2	A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry	Hui Zhang, Hong Wang, Xun Zhu, Yong - Jun Qiu, Kai Li, Rong Chen, Qiang Liao	2013	Nulo
3	The development of a slagging and fouling predictive methodology for large scale pulverised boilers fires with coal/biomass blends.	Piotr Patryk Plaza	2013	Intermedio
4	Determination of minerals in coal by methods based on the recalculation of the bulk chemical analyses	Michal Ritz and Zdenek Klika	2010	Intermedio

Los temas de mayor interés de búsqueda han sido: Comportamiento de carbón, Estudio de homogenización y/o optimización, Parámetros del carbón, Estudio parámetros. Por lo cual sus palabras claves para el Scopus han sido los siguientes: ***Coal, Fly ash, Coal properties, Coal effects, Parameters of coal, Optimization process, Sensitivity analysis.***

Se observa una notable diferencia entre las dos tablas, a parte del criterio, no existe gran coincidencia con el presente estudio. Esto puede deberse a que el método que se va aplicar en este trabajo es nuevo para el estudio de carbones.

La palabra clave "***Optimization process"*** se ha incluido en dicha busqueda debido a que al tener una variedad de datos, la manera más viable de realizar una homogeneización de los mismos es Optimizarlos numéricamente. Pero en este caso se ha plateado un problema, los datos no tienen variables dependientes por lo cual hay una necesidad de organizarlas mediante ecuaciones. Para conseguirlas se recurrirá a realizar un análisis de sensibilidad y facilitar este paso intermedio para poder tratar en un futuro los mismos datos mediante un análisis de optimización.

Capítulo 4: Descripción de los datos del estudio

4.1. Carbón a estudiar

En el presente proyecto se han presentado los datos de 14 carbones diferentes, señalando sus principales parámetros. Los parámetros han sido descritos con mayor detalle en el *Capítulo 3: Estado del Arte.* A modo recordatorio se puede apreciar en las siguientes **tablas 8 y 9** que los datos de los carbones que aparecen son de:

- Análisis Elemental
- Análisis Inmediato
- Análisis químico de las cenizas del carbón

Estos carbones se han utilizado en una central térmica, para generación de vapor. Por lo cual al ser diferentes carbones afectan de una manera u otra a las instalaciones de la central. En este caso en los objetivos se describe con detalle la realización del estudio, por lo que se pretende conseguir una mezcla homogénea de todos los carbones que disminuya los efectos negativos en las instalaciones.

Tabla 8: Datos de los carbones C1 – C14

Carbón	1	2	3	4	5	6	7
Humedad	12,80	10,30	9,97	10,34	11,99	9,87	10,70
Cenizas	8,79	9,08	9,39	10,76	7,56	8,77	12,01
Materia volátil	34,91	32,92	31,02	33,90	30,83	34,40	34,32
Azufre	0,46	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,22
PCS (kcal/kg)	6146,00	6351,67	6462,00	6314,00	6375,00	6583,00	6181,00
PCS (kJ/kg)	25731,85	26550,00	0,00	26435,22	26690,61	27561,46	25878,38
PCI (kcal/kg)	5843,00	6078,95	6191,00	6043,00	6116,00	6295,00	5911,00
PCI (kJ/kg)	24463,26	25410,00	0,00	25300,61	25606,24	26355,67	24747,96
SiO2	53,10	54,35	55,80	55,20	52,82	54,20	56,20
Al2O3	24,80	20,10	20,50	20,60	22,87	20,20	20,40
Fe2O3	7,60	7,72	6,83	6,30	7,50	7,40	6,68
CaO	4,70	6,25	5,90	5,90	5,60	6,10	6,10
MgO	1,30	2,75	2,30	2,60	2,13	2,70	2,60
Na2O	1,25	1,30	1,30	1,50	0,52	1,60	1,65
K2O	1,50	2,10	2,10	2,10	1,62	2,10	2,40
P2O5	0,40	0,62	0,61	0,71	1,00	0,60	0,57
TiO2	0,95	0,82	0,87	0,90	0,99	0,89	0,88
MnO2	0,03	0,04	0,04	0,07	0,08	0,06	0,07
SO3	4,22	3,80	3,60	4,00	4,58	4,00	2,30
SiO2					0,29		
Total	99,85	99,85	99,85	99,88	100,00	99,85	99,85
Relación alcalino-ácido	0,21	0,27	0,24	0,24	0,23	0,26	0,25

Tabla 9: Datos de los carbones C7- C14

Carbón	8	9	10	11	12	13	14
Humedad	9,60	9,07	14,50	9,22	12,10	9,32	10,08
Cenizas	11,01	10,54	9,00	10,60	8,77	10,79	9,44
Materia volátil	34,58	33,09	30,98	31,73	30,49	31,86	34,56
Azufre	0,24	0,28	0,62	0,26	0,29	0,37	0,42
PCS (kcal/kg)	6350,00		5979,00		6248,00		6207,00
PCS (kJ/kg)	26586,00		25032,66		26158,90		
PCI (kcal/kg)	6074,00	6416,00	5691,00	6361,00	6007,00	6446,00	5923,00
PCI (kJ/kg)	25431,00	26862,27	23826,87	0,00	25149,89	0,00	0,00
SiO2	57,40	55,10	59,66	60,80	54,99	58,87	59,66
Al2O3	20,20	21,10	19,93	22,40	21,72	23,06	19,93
Fe2O3	6,30	8,30	9,44	6,00	5,71	6,07	9,94
CaO	6,20	4,80	1,95	2,80	5,08	3,13	1,95
MgO	2,40	2,40	1,76	1,40	2,53	1,66	1,76
Na2O	1,30	1,00	1,31	0,75	1,02	0,99	1,31
K2O	2,20	2,00	1,80	1,80	2,24	2,04	1,80
P2O5	0,51	0,63	0,16	0,68	0,74	0,70	0,16
TiO2	0,89	0,87	1,04	0,92	0,91	0,90	1,04
MnO2	0,05	0,05		0,05	0,06	0,11	
SO3	2,40	3,60	1,37	2,25	4,05	2,38	1,37
SiO2					0,18		
Total	99,85	99,85	98,42	99,85	99,23	99,91	98,92
Relación alcalino-ácido	0,23	0,24	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00

4.2. Reservas de carbón

Rusia actualmente es uno entre los mayores productores mundiales de carbón y el segundo país con mayores reservas, alrededor de 157.000 millones de toneladas. Se explotan numerosos yacimientos de carbón ubicados en enormes cuencas industriales.

Solo en la cuenca de Siberia Occidental, que abarca las provincias de Tiumen, una parte de la de Tomsk, Novosibirsk, Omsk y una parte del territorio de Krasnoiarsk, se explotan más de 300 yacimientos de carbón, además de petróleo y gas.

La cuenca del Pechora con sus 30 yacimientos en producción tiene grandes reservas de hulla. Las reservas de carbón pardo, probadas en la cuenca de Moscú, constituyen cerca de 4 mil millones de toneladas.

Uno de los primeros lugares nacionales y mundiales por el volumen, la potencia de las capas y la calidad del carbón pertenece a la cuenca hullera de Kuznetsk (Kuzbass).

Otras cuencas conocidas por carbones pardos y de piedras siberianas son las siguientes:

- la Cuenca de Tungusska
- la de Kansk-Achinsk, que tiene las más grandes reservas probadas, aproximadamente 80 mil millones de toneladas, y en la que ¼ de reservas de carbón pardo puede obtenerse a cielo abierto
- Minusinsk
- Irkutsk, donde están explotados más de 20 yacimientos.

A continuación se describirán algunas de las características que predominan en las cuencas de mayor carácter. Por lo cual de las que se extrae mayores cantidades de carbón y los datos del presente proyecto se sitúan en estos marcos.

4.2.1. Características de la cuenca Pechora

Ilustración 26: Localización de Pechora. Fuente: www.google.com

Está situada en una latitud próxima al círculo polar ártico, cerca de los montes Urales septentrionales y ocupa un valle fluvial con terrazas. El relieve es poco pronunciado, estando su altitud comprendida entre los 42 m y los 64 m.

En la región de Pechora se encuentran yacimientos de carbón, gas natural y de petróleo, así como de materias primas utilizadas en la industria de la construcción:

- grava
- arena
- piedra de construcción
- arcilla refractaria para los ladrillos

En la periferia de la ciudad se puede encontrar suelos turbosos podzol, así como terrenos aluviales de praderas y ciénagas. La vegetación está constituida por una flora de pantano y de pradera propia de las zonas inundables, así como por bosques donde se mezclan coníferas y los abedules.

Las reservas de mayor magnitud se concentran en el Inta, Vorgashorskaya, Vorkuta y Usinks. El espesor de capa es de 0,7 m a 1 m, con una profundidad aproximada a 470m.

Sus carbones presentan siguientes propiedades:

- Tienen alta calidad
- Poder calorífico de 4300 - 6340 kcal/kg
- Bajo contenido en cenizas 4,6 %
- Humedad oscila entre 6 % y 11 %

4.2.2. Características de la cuenca minera de Kuznetsk (Kuzbass)

Ilustración 27: Localización de Kuznetsk (Kusbass). Fuente: www.google.com

Dicha cuenca tiene concentración de abundantes depósitos con amplia gama de carbones adecuados para coquización, la producción e liquido combustible y materias primas para la industria química.

Se encuentra en la región de Kemerovo en Siberia occidental. El yacimiento, o también llamada piscina, se extiende a lo largo del ferrocarril transiberiano a 800 km. El yacimiento tiene reservas carboníferas de diferentes rangos de antracita, también se puede encontrar hulla y coque, este último es el más valioso para la región.

El yacimiento cuenta con un diseño geográficamente favorable, por lo que facilita mayores ventas, debido a facilidad de acceso y transporte.

Los carbones que provienen de dicho yacimiento tienen las siguientes propiedades:

- Bajo contenido en cenizas 4,6 % aproximadamente
- Bajo contenido en azufre de 0,3 a 0,65 %
- Poder calorifico oscilante entre 6000 – 8000 kcal/kg

En general, al ser estas dos cuencas con mayores reservas de carbón y buenas propiedades, que incluyen bajo contenido en azufre, bajo contenido en cenizas y alto poder calorífico, es exportado a todo el mundo. Aunque la Pechora es el área de mayores reservas se extrae mucho menos que en Kuzbass.

4.3. Situación de los carbones analizados

4.3.1. Localización geográfica punto de partida

Los datos de 14 carbones que se tiene proceden del mismo lugar, Múrmansk. Es una ciudad portuaria de Rusia ubicada en el extremo noroeste del país, para más exactitud se encuentra en la costa norte de la península de Kola en la desembocadura del río Kola frente al mar de Barets, muy próxima a la frontera rusa con Noruega y Finlandia, en la región de Laponia. Dista a 1.486 km al norte de Moscú y a 2.345 km al sur del Polo Norte. Es el mayor puerto de Rusia en el Ártico y en relación a la cantidad de sus habitantes, la mayor ciudad del mundo al norte del Círculo Polar Ártico, con casi 315.000 habitantes.

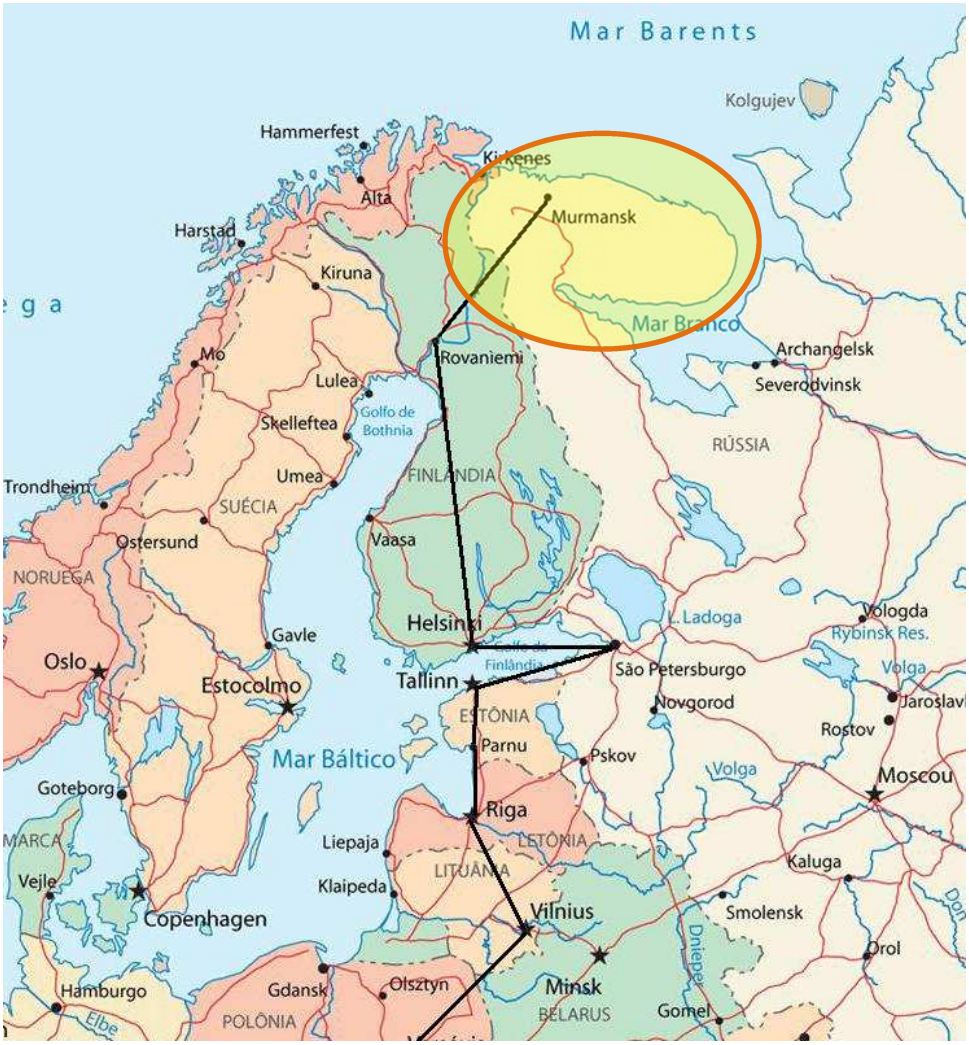


Ilustración 28: Situación geográfica. Fuente: www.google.com

La ciudad de Múrmansk es la capital del distrito federal noroeste y sede de la flota de rompehielos nucleares de la Armada de la Federación Rusa. Esto se debe a que el puerto permanece libre del hielo todo el año, por causas de corriente marina cálida que proviene del Atlántico Norte. La ciudad cuenta con un aeropuerto, aunque su principal actividad pasa por el puerto.

Históricamente, el puerto sirvió durante la Segunda Guerra Mundial para abastecer a la Unión Europea. Una vez concluido el conflicto, el puerto se convirtió en la base principal de la Marina de Guerra Soviética. En ese entonces, albergaba más de 179 submarinos atómicos con misiles intercontinentales, número que hoy en día se ve reducido a 26.

Al ser una ciudad portuaria, es más fácil de realizar el transporte de carbón. Por lo que las toneladas compradas de carbón son transportadas desde el yacimiento inicial mediante ferrocarril o camiones, para posterior carga en los barcos y traslado a su destino.

4.3.2. Clima

4.3.2.1. Clima global

Debido a gran extensión del territorio de norte a sur, Rusia tiene cuatro zonas climáticas: ártica, subártica, moderada y subtropical. El clima de cada una de ellas es de tipo ártico, subártico, moderado y subtropical, respectivamente.

En Rusia domina el clima continental moderado con cambios estacionales periódicos, inviernos fríos, nevosos y largos, veranos suaves y relativamente cortos. El contraste continental del clima aumenta en Siberia y en el norte del Extremo Oriente, donde se hace fuertemente continental, a lo cual se deben las condiciones atmosféricas rigurosas y los bruscos saltos térmicos estacionales y entre día y noche, así como la existencia de una fuerte capa de congelación perpetua.

En Siberia Oriental, cerca de la ciudad de Verjoyansk, en la depresión de Oimiakón, se halla uno de los "polos del frío" del hemisferio septentrional, donde se registra la mínima absoluta de -71° C.

En los extremos occidental y oriental de Rusia, susceptibles a la influencia global de océanos y sus mares, se han formado climas de tipo marítimo y continental transitorio con rasgos de marítimo (en el noroeste) y monzónico (en el sur del Extremo Oriente).

Las islas y el litoral continental del océano Glacial Ártico se destacan por un clima ártico y subártico riguroso. El clima subtropical, con inviernos suaves pero húmedos y veranos cálidos y secos, es típico de la zona balnearia de la costa caucásica del mar Negro (de Tuapsé a Anapa).

En las regiones montañosas el clima es muy variado, lo cual no sólo se debe a la situación geográfica de toda la cordillera, sino también a la altura de cada zona, la exposición de las pendientes, etc. Estos factores influyen en la singular variedad climática local, el llamado microclima.

Las temperaturas medias de enero en toda Rusia, excepto la costa caucásica del mar Negro, son negativas: de -1° C y -5° C en el oeste de la parte europea a -50° C en Yakutia. Son muy diferentes las temperaturas estivales en el norte y el sur de Rusia. Las medias térmicas de julio oscilan entre +1°C en el norte de Siberia y +25° C en la depresión del Caspio.

La máxima de lluvias (2.000 mm al año) corresponde a las pendientes del Cáucaso y los montes Altái, así como al sur del Extremo Oriente (hasta de 1.000 mm anuales, con frecuencia las lluvias monzónicas estivales dan lugar a inundaciones) y en los bosques de la llanura de Europa Oriental. La zona más árida se considera la parte semidesértica de la depresión del Caspio, donde las lluvias llegan a 150 mm anuales.

4.3.2.2. Clima en zona de Múrmansk

El clima es frio y templado. Hay precipitaciones durante todo el año hasta el mes más seco aún tiene mucha lluvia. El clima está calificado como DFC por el sistema Köppen – Geiger. La temperatura media en invierno es de -16ºC, aunque en ocasiones llego a descender hasta los -49ºC. En verano la temperatura media es de 15 ºC y siempre hay

presencia de luz natural 24 horas al día durante junio. Por el contrario el sol no es visible durante diciembre.

En general la temperatura media anual se encuentra a 0,2 ºC y la precipitación es de 481 mm al año.

Tabla 10: Promedio de temperaturas anuales en Múrmansk. Fuente: pogoda.ru.net

Parámetros climáticos promedio de Murmansk													[ocultar]
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima absoluta (°C)	7.0	6.6	9.0	16.9	29.4	30.8	32.9	29.1	24.2	15.0	9.6	7.2	32.9
Temperatura máxima media (°C)	−6.8	−6.7	−2.4	2.6	7.6	13.6	17.3	14.9	10.0	3.6	−2.4	−5.3	3.8
Temperatura media (°C)	−10.0	−9.7	−5.5	−0.7	4.0	9.2	12.8	11.1	7.0	1.5	−4.8	−8.2	0.56
Temperatura mínima media (°C)	−13.0	−12.8	−8.6	−3.8	1.1	5.7	9.2	8.0	4.5	−0.4	−7.1	−11.2	−2.4
Temperatura mínima absoluta (°C)	−39.4	−38.6	−32.6	−21.7	−10.4	−2.5	1.7	−2.0	−5.4	−21.2	−30.5	−35.0	−39.4
Precipitación total (mm)	30	22	23	24	36	53	70	61	52	51	38	34	494
Días de lluvias (≥ 1 mm)	0.1	0.3	0.7	3	9	17	20	21	19	8	1	0.4	99.5
Días de nevadas (≥ 1 mm)	23	21	20	14	7	0.5	0	0	0.5	9	19	24	138.0
Horas de sol	0	33.6	120.9	183.0	192.2	228.0	235.6	155.0	90.0	46.5	6.0	0	1291.1
Humedad relativa (%)	84	83	79	73	72	70	73	78	81	83	86	85	78.9

4.3.3. Localización geográfica en destino y transporte

El carbón es traído mediante un transporte determinado a España, habitualmente si viene de Rusia se utilizan los barcos.

Ilustración 29: Transporte de carbone. Fuente: www.google.com/imagenes

Estos carbones los ha adquirido una empresa ficticia para uso propio como producción de vapor. Dicha empresa recibe los barcos en la provincia de Cantabria, ciudad de Santander que cuenta con un puerto, para posterior reparto a la central o centrales térmicas.

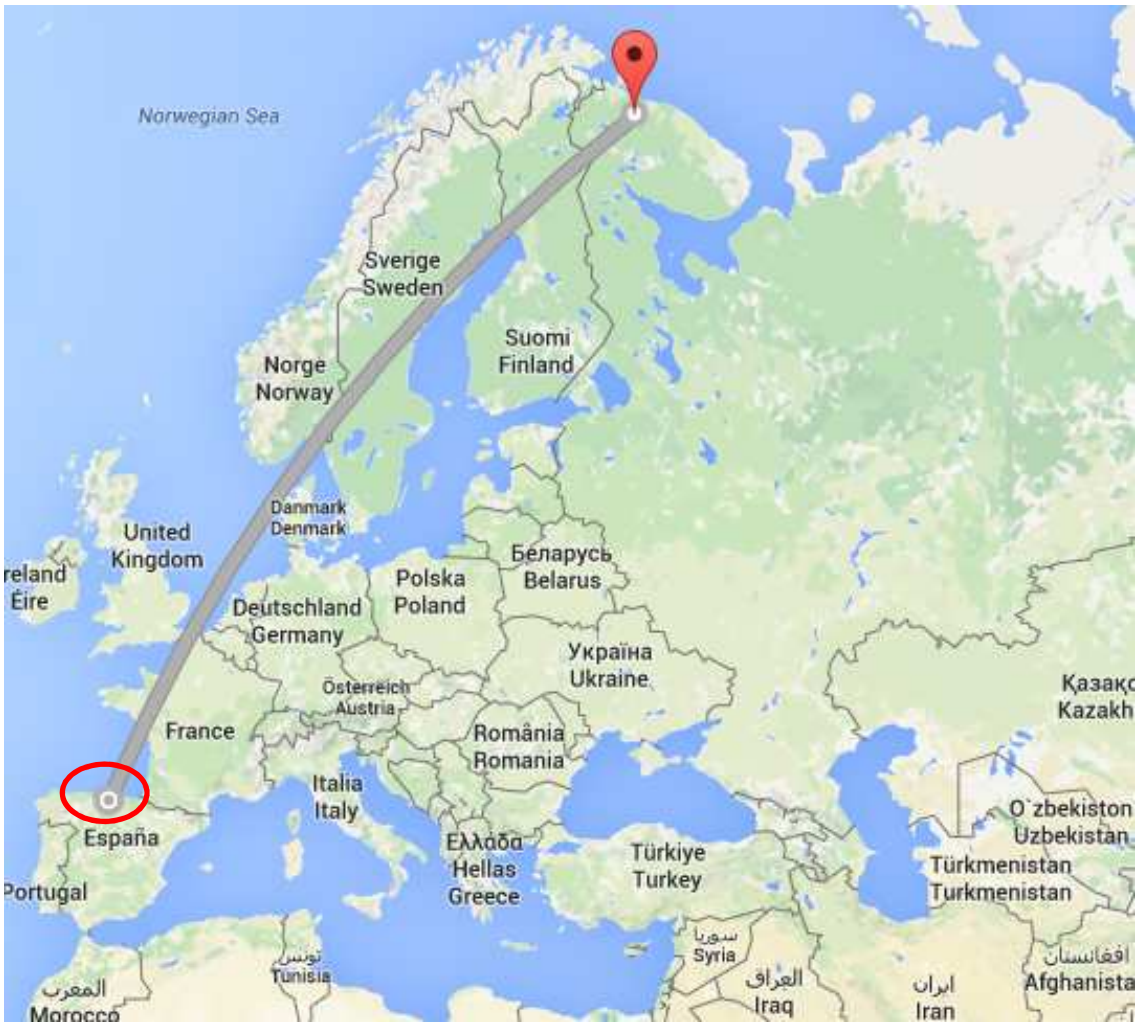


Ilustración 30: Destino de los carbones traídos del puerto de Múrmansk. Fuente: www.google.maps.com

El carbón que se pretende conseguir se define como hulla térmica, aunque en ocasiones se puede observar mezclas de varios carbones de diferente rango. Para evitar variación de las propiedades de un carbón en concreto se realizan los **ensayos en el punto de partida**. A partir de los cuales la empresa decide la compra de un carbón u otro.

Como bien se conoce hay que tener en cuenta el transporte de carbón, pero no como se ha transportado la materia prima, sino en qué condiciones. Por ejemplo si los silos o pilas de carbón han sido cubiertos o no, el tiempo de transporte, condiciones meteorológicas, etc.

Debido a esto cuando se reciben los barcos en el destino se realiza otro ensayo, que es idéntico al de punto de partida, para verificar la variación de algunas de las propiedades. En la mayoría de los casos suele variar la humedad, con elevado porcentaje. El resto de las propiedades varia en pequeña medida, casi siempre los valores que se obtienen en el **ensayo en destino** son muy próximos al de punto de partida.

Por tanto los ensayos que se confeccionan en las *tablas 8 y 9* de los datos de carbones son ensayos en destino, ya que son valores definitivos de las propiedades de cada carbón que se usara como combustible principal en una central térmica.

Capítulo 5: Metodología

5.1. Introducción

Establecidos y descritos los datos anteriormente se procede a la realización de un estudio de los mismos. Como el nombre del presente proyecto ya indica, se trata lo siguiente:

- Por un lado estudiar el carbón y sus características.
- Y por otro lado homogeneizar todos los carbones dados para obtener una mezcla de homogeneidad, que afecte en menor medida posible a una instalación de la central térmica.

5.2. Metodología a seguir

5.2.1. Parte I

La primera parte del estudio se puede describir brevemente, se trata de aplicar los conocimientos de teoría descrita en el *Capítulo 3: Estado del Arte*, para realizar una comparativa de propiedades entre los 14 carbones a estudiar.

En un principio se ha organizado todos los datos del C1 al C14, como se puede comprobar en el *Capítulo 4: Descripción de los datos, tabla 8 y 9,* en una hoja Excel formando las tablas anteriores. El criterio que se ha seguido para su organización es el mismo que se utiliza a la hora de realizar sus ensayos y análisis.

En primer lugar se han introducido los datos importantes del **Análisis Inmediato** que abarca:

- Humedad
- Poder Calorífico, tanto superior como inferior
- Contenido en materia volátil
- Contenido en cenizas

Seguidamente se ha introducido uno de los datos principales del **Análisis Elemental**, que es el azufre. Es importante conocer este valor ya que siempre está presente en el carbón y cuando este se quema forma el SO_2. Por tanto hace falta eliminarlo antes de la combustión para que este compuesto no pueda escaparse por la chimenea.

El poder calorífico, superior e inferior, se expresa en unidades como: kcal/kg o kJ/kg. El resto de los datos en los análisis inmediato e elemental se expresan en un tanto %.

Y en el último lugar se han introducido los datos del **Análisis químico de las cenizas** de los carbones estudiados. Se introducen los componentes químicos del análisis de las cenizas de mayor a menor contenido en tanto % y son los siguientes:

- SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, TiO_2, MnO_2, SO_3

Una vez obtenidos todos los datos representados, se **calculan los factores** o también llamados **Slagging y Fouling** utilizando las formulas del *Capítulo 3: Estado de Arte*. Todo esto se elabora en la misma hoja Excel en la que se encuentran introducidos los 14 Carbones. El cálculo de los factores se realiza solamente con el análisis químico de las cenizas, ya que Slagging y Fouling son efectos de las mismas. Sus unidades son adimensionales.

La **resistividad** también se calcula mediante otras fórmulas que se explican en el mismo capítulo, salvo que esta se representa en *Ohmios x cm*.

Mediante estos pasos se completa definitivamente la tabla, para su posterior trato.

5.2.2. Parte II

Consiste en encontrar una mezcla homogénea de carbón. Para ello se tratan los datos numéricamente, mediante un **Análisis de Sensibilidad**.

5.2.2.1. Explicación Teórica del Análisis de Sensibilidad

En parte el análisis de sensibilidad se utiliza en los cálculos de inversiones e aspectos económicos de proyectos, y se puede definir como:

"Una técnica que, aplicada a la valoración de inversiones, permite el estudio de la posible variación de los elementos que determinan una inversión de forma que, en función de alguno de los criterios de valoración, se cumpla que la inversión es óptima o es preferible a otra." Iturrioz del Campo, Javier.

Como ejemplo, mediante estos análisis se puede analizar la cuantía mínima de los flujos caja para una inversión óptima según Valor Actualizado Neto (VAN), o cual es el desembolso inicial para que una inversión sea preferible a otra según la Tasa Interna de Retorno o Rentabilidad (TIR).

En estos casos dicho análisis se considera como una primera aproximación al estudio de inversiones con riesgo, porque permite identificar elementos más sensibles ante una valoración. Y se utiliza en dos casos:

1. Determinar solución óptima de una inversión
2. Establecer determinado orden de preferencia entre varias inversiones.

También se puede utilizas para apoyar un proceso de toma de las decisiones con hechos. Pudiendo establecer modelos de comportamiento aproximándose a unos ajustes para su modificación.

5.2.2.2. Explicación Práctica

Se parte de las **tablas 8 y 9**, *del Capítulo 4: Descripción de los datos*. Las tablas contienen 14 Carbones utilizados en una instalación de central térmica y las variables respectivas de los análisis. De estas variables se resume las 10 más importantes en otra tabla que se podrá apreciar en el *Capítulo 5: Resultados*.

Cada una de las variables ha de cumplir una ecuación patrón establecida:

$$C_{final} = (A \times C_1 + B \times C_2 + C \times C_3 + D \times C_4 + E \times C_5 + F \times C_6 + G \times C_7 + H \times C_8 + I \times C_9 + J \times C_{10} + K \times C_{11} + L \times C_{12} + M \times C_{13} + N \times C_{14}) / 14$$

En este caso se aplica una escala de ponderación de 0 a 5 para cada variable, tomando **0 como valor malo o nulo**, **3 como valor aceptable** y **5 como buen valor**. Y se establece el valor óptimo de tanteos, en este caso son 10, para poder variar todas las variables y conseguir un resultado efectivo de sensibilidad. Teniendo en cuenta que el **primer tanteo** siempre pertenece a la ecuación establecida a cumplir: ***C final***, y no tiene por qué coincidir con la escala de ponderación.

Se dan pesos iniciales de 1 punto a cada carbón, que iniciaran el primer tanteo, como ya se ha mencionado anteriormente. Tras asignar los pesos de 1 punto es importante de realizar una media ponderada, que engloba el cálculo de la ***C final*** para comprobar el resultado establecido.

El resultado tiene que quedar entre los valores Máximos y Mínimos de cada variable a estudiar de los 14 Carbones y los límites legales de la normativa vigente hasta el momento. Estas restricciones son valores de ***Objetivos a cumplir.***

El segundo tanteo y los posteriores tratan de utilizar la escala de ponderación e ir dando pesos a cada uno de los carbones. En este caso los el criterio de asignación de pesos es el siguiente:

- Primero se dan puntos de 5 y 0 a los carbones que cumplen con mayor preferencia o no cumplen los objetivos
- Los valores intermedios como 2,3 y 4 se dan en función de cómo se aproximen al cumplimiento de los objetivos. El 3 es aceptable, entonces el 2, define un criterio cercano al valor objetivo, y 4 indica que el carbón se aproxima en mayor medida a la aproximación de los objetivos a cumplir.
- El punto 1 por norma general en alguna de las variables no se altera desde el primer tanteo y significa que es un carbón que no altera, o afecta en una escala escasa al comportamiento de la variable.

Tras variar todos los carbones con unos pesos u otros mediante 10 tanteos en este último se genera otra ecuación. En este caso es una ecuación ***C patrón***, la cual representa todos los pesos de variable establecidos dentro de los limites u objetivos a cumplir.

Como ya se ha comentado se estudian 10 variables más importantes, son las siguientes:

- *Cenizas, Azufre, Humedad, Materia Volátil, Poder Calorífico, Slagging, Fouling,* $Fe_2O_3 + CaO$, Na_2O, *Resistividad*

Por consiguiente se obtienen 10 ecuaciones de ***C patrón, una para cada variable.***

Otro paso importante es organizar y relacionar todas las ecuaciones ***C patrón*** con los carbones. Para ello se construye una matriz de trazabilidad, que relación variables (puestas en filas) y carbones (en columnas). Es una matriz de 10x14. Para poder comparar cada carbón mediante las ecuaciones ***C patrón*** obtenidas en el análisis de sensibilidad se identifican las variables con mayor aproximación y se definen con colores. En este caso el color rojo toma valores de 0 y 1, el color amarillo o naranja toma valores de 2 y 3, que son más próximos al valor aceptable, y el verde representa valores 4 y 5, los mejores valores.

Una vez organizada y revisada, la matriz, se procede a su "reducción", propiamente dicho simplificación. Debido a que algunas variables, menos la resistividad, son próximas y dependen unas de otras como:

- Cenizas y azufre
- Humedad y materia volátil
- Slagging y Fe_2O_3 + CaO
- Fouling y Na_2O

Este paso se realiza para poder hallar una ecuación general, ***C general***. Que debe de cumplir los objetivos establecidos para cada variable y no pasarse de los valores límites de la normativa. Es la ecuación única que consigue una mezcla homogénea de todos los carbones.

Es importante comprobar que esta ecuación ***C general*** es válida para todos los carbones con sus respectivas variables. Si se da algún caso de que una de las variables se desvía de objetivo a cumplir, o algunos carbones aparecen con el 0 en la ecuación, se puede realizar un procedimiento de aporte de variación (+1punto o -1 punto) para ver el resultado definitivo de la ***C general*** y nuevo cumplimiento de los objetivos, mediante la construcción de una tabla.

Capítulo 6: Resultados

Tras completar los capítulos anteriores de *Descripción de los datos y Metodología*, se dejan en presente Capítulo los resultados obtenidos, tablas, etc. Todos los cálculos se han realizado mediante unas hojas Excel.

Tabla con las variables más importantes a estudiar:

Tabla 11: Variables notables de carbones C1 - C7.

CARBÓN	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	A	B	C	D	E	F	G
VARIABLES NOTABLES							
PODER CALORIFICO I (KCAL/KG)	5843,00	6068,78	6191,00	6043,00	6116,00	6295,00	5911,00
HUMEDAD	12,80	10,30	9,97	10,34	11,99	9,87	10,70
MATERIA VOLATIL	34,91	32,92	31,02	33,90	30,83	34,40	34,32
AZUFRE	0,46	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,22
PCI (KJ/KG)	24463,26	25410,00	25921,72	25300,61	25606,24	26355,67	24747,96
FE2O3	7,6	7,72	6,83	6,3	7,50	7,4	6,68
CaO	4,7	6,25	5,9	5,9	5,60	6,1	6,1
FE2O3+CaO	12,3	13,97	12,73	12,2	13,1	13,5	12,78
SLAGGING	0,10	0,09	0,08	0,07	0,00	0,09	0,06
FOULING FACTOR	0,26	0,35	0,31	0,36	0,12	0,42	0,41
Na2O	1,25	1,3	1,3	1,5	0,52	1,6	1,65
CENIZAS	8,79	9,08	9,39	10,76	7,56	8,77	12,01
RESISTIVIDAD	2,14	1,28	2,16	1,31	8,43	0,93	1,02

Tabla 12: Variables notables de carbones C8 - C14.

CARBÓN	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
	H	I	J	K	L	M	N
VARIABLES NOTABLES							
PODER CALORIFICO I (KCAL/KG)	6074,00	6416,00	5691,00	6361,00	6007,00	6446,00	5923,00
HUMEDAD	9,60	9,07	14,50	9,22	12,10	9,32	10,08
MATERIA VOLATIL	34,58	33,09	30,98	31,73	30,49	31,86	34,56
AZUFRE	0,24	0,28	0,62	0,26	0,29	0,37	0,42
PCI (KJ/KG)	25431,00	26862,27	23826,87	26633,51	25149,89	26989,40	24799,60
FE2O3	6,3	8,3	9,44	6	5,71	6,07	9,94
CaO	6,2	4,8	1,95	2,8	5,08	3,13	1,95
FE2O3+CaO	12,5	13,1	11,39	8,8	10,79	9,2	11,89
SLAGGING	0,06	0,07	0,15	0,04	0,06	0,00	0,09
FOULING FACTOR	0,30	0,24	0,26	0,11	0,22	0,17	0,27
Na2O	1,3	1	1,31	0,75	1,02	0,99	1,31
CENIZAS	11,01	10,54	9	10,6	8,77	10,79	9,44
RESISTIVIDAD	1,75	2,44	2,67	11,57	3,23	5,63	2,48

La escala de ponderación que se utiliza en todo el método de estudio es la siguiente:

Tabla 13: Escala de ponderación elegida.

0	1	2	3	4	5
Malo			Aceptable		Bueno

Los objetivos a cumplir en cada variable se presentan en la siguiente tabla con sus respectivos valores máximos, mínimos y valor límite.

Tabla 14: Restricciones y valores máximos /mínimos de las variables.

Variables	Cenizas	Azufre	Humedad	Materia Volatil	Poder Carolrifico	Salgging	Fouling	Fe2O3+CaO	Na2O	Resistividad
Restriccion	<=12 > 7,56	<= 0,5 % <3,5%	>5 y <=10 Promedio 10,70 Min 9,07	>30,49 Entre 28-36%	24 - 32 MJ/kcal	Valor limite 0,06 - 2,00 Min 0,00 Max 0,15	Valor limite 0,20 - 0,5 Min 0,11 Max 0,42	<10% Max 13,97 Min 8,8	< = 0,5 - 1,15 % Max 1,65 Min 0,52	Valor limite $0,1x10^{10}$ Ohm.cm Max 11,57 Min 0,93
valor maximo	12,01	0,62	12,8	34,91	26,9	0,15	0,42	13,97	1,65	0,1157
valor minimo	7,56	0,22	9,07	30,49	23,8	0	0,11	8,8	0,52	0,0093
valor cierre	12	0,5	10	36	32	0,06	0,24	10	1	0,1

La primera variable a estudiar ha sido el contenido en **Cenizas**. Los tanteos y la fórmula patrón, creada mediante el último tanteo se reflejan a continuación, mediante un método propio desarrollado por la autora del presente trabajo:

Tabla 15: Análisis de sensibilidad del Contenido en Cenizas.

Primer tanteo:			Segundo tanteo:			Tercer tanteo:			Cuarto tanteo:			Quinto tanteo:		
A	1		A	2		A	2		A	2		A	2	
B	1		B	1		B	1		B	1		B	1	
C	1		C	1		C	1		C	1		C	1	
D	1		D	1		D	1		D	1		D	1	
E	1		E	1		E	3		E	4		E	4	
F	1		F	1		F	2		F	2		F	2	
G	1		G	1		G	1		G	1		G	1	
H	1	9,751	H	1	9,605	H	1	9,238	H	1	9,139	H	1	9,148
I	1		I	1		I	1		I	1		I	1	
J	1		J	1		J	1		J	1		J	0	
K	1		K	0		K	0		K	0		K	0	
L	1		L	1		L	1		L	1		L	1	
M	1		M	1		M	0		M	0		M	0	
N	1		N	1		N	1		N	1		N	1	
	14			14			16			17			16	

Sexto tanteo:			Septimo tanteo:			Octavo tanteo:			Noveno tanteo:			Decimo tanteo:		
A	3		A	3		A	3		A	3		A	3	
B	1		B	2		B	2		B	2		B	3	
C	1		C	1		C	2		C	2		C	2	
D	1		D	1		D	1		D	1		D	1	
E	4		E	4		E	4		E	4		E	4	
F	2		F	2		F	2		F	2		F	2	
G	1		G	1		G	1		G	1		G	1	
H	1	9,126	H	1	9,124	H	1	9,138	H	1	9,158	H	1	9,227
I	1		I	1		I	1		I	1		I	1	
J	0		J	0		J	0		J	0		J	0	
K	0		K	0		K	0		K	0		K	1	
L	1		L	1		L	1		L	0		L	0	
M	0		M	0		M	0		M	0		M	0	
N	1		N	1		N	1		N	1		N	1	
	17			18			19			18			20	

$$C_{PATRON-Cenizas} = 3C_1+3C_2 + 2C_3+1C_4+4C_5 + 2C_6+1C_7 + 1C_8 + 1C_9 + 0C_{10} + 1C_{11} + 0C_{12} + 0C_{13} + 1C_{14} \quad [1]$$

La segunda variable a estudiar ha sido **Azufre**. Los tanteos y la formula patrón, creada mediante el último tanteo se deja a continuación:

Tabla 16: Análisis de sensibilidad de Azufre.

Primer tanteo:			Segundo tanteo:			Tercer tanteo:			Cuarto tanteo:			Quinto tanteo:		
A	1		A	0		A	1		A	1		A	5	
B	1		B	1		B	3		B	2		B	2	
C	1		C	1		C	3		C	2		C	2	
D	1		D	1		D	3		D	2		D	2	
E	1		E	1		E	3		E	2		E	2	
F	1		F	1		F	3		F	2		F	2	
G	1		G	1		G	5		G	5		G	5	
H	1	0,339286	H	1	0,2954545	H	4	0,2952632	H	4	0,2941176	H	4	0,353617
I	1		I	1		I	4		I	4		I	4	
J	1		J	0		J	0		J	0		J	5	
K	1		K	1		K	3		K	3		K	3	
L	1		L	1		L	3		L	3		L	3	
M	1		M	1		M	2		M	3		M	3	
N	1		N	0		N	1		N	1		N	5	
	14			11			38			34			47	

Sexto tanteo:			Septimo tanteo:			Octavo tanteo:			Noveno tanteo:			Decimo tanteo:		
A	0		A	3		A	4		A	4		A	5	
B	3		B	2		B	2		B	2		B	3	
C	3		C	2		C	2		C	2		C	3	
D	3		D	1		D	1		D	1		D	2	
E	3		E	1		E	1		E	1		E	2	
F	3		F	1		F	1		F	1		F	2	
G	5		G	5		G	5		G	5		G	2	
H	4	0,2874286	H	4	0,3011538	H	4	0,39725	H	4	0,3558974	H	2	0,3692857
I	3		I	3		I	2		I	3		I	3	
J	0		J	0		J	10		J	5		J	5	
K	3		K	1		K	1		K	3		K	2	
L	3		L	1		L	1		L	2		L	3	
M	2		M	1		M	1		M	1		M	4	
N	0		N	1		N	5		N	5		N	4	
	35			26			40			39			42	

$$C_{PATRON-Azufre} = 5C_1+3C_2 + 3C_3+2C_4+2C_5 + 2C_6+2C_7 + 2C_8 + 3C_9 + 5C_{10} + 2C_{11} + 3C_{12} + 4C_{13} + 4C_{14} \quad [2]$$

La tercera variable a estudiar ha sido **Humedad**. Los tanteos y la formula patrón, creada mediante el último tanteo se deja a continuación:

Tabla 17: Análisis de sensibilidad de la Humedad.

Primer tanteo:			Segundo tanteo:			Tercer tanteo:			Cuarto tanteo:			Quinto tanteo:		
A	1		A	0		A	0		A	0		A	0	
B	1		B	1		B	1		B	1		B	0	
C	1		C	1		C	1		C	1		C	2	
D	1		D	1		D	1		D	1		D	0	
E	1		E	0		E	0		E	0		E	0	
F	1		F	1		F	1		F	1		F	1	
G	1		G	1		G	1		G	1		G	1	
H	1	10,70429	H	1	9,847	H	1	9,625	H	1	9,580625	H	1	9,508
I	1		I	1		I	5		I	5		I	5	
J	1		J	0		J	0		J	0		J	0	
K	1		K	1		K	1		K	2		K	2	
L	1		L	0		L	0		L	0		L	0	
M	1		M	1		M	1		M	2		M	2	
N	1		N	1		N	1		N	1		N	1	
	14			10			14			16			15	

Sexto tanteo:			Septimo tanteo:			Octavo tanteo:			Noveno tanteo:			Decimo tanteo:		
A	0		A	0		A	0		A	0		A	0	
B	0		B	0		B	0		B	0		B	0	
C	2		C	2		C	2		C	2		C	1	
D	0		D	0		D	0		D	0		D	0	
E	0		E	0		E	0		E	0		E	0	
F	2		F	2		F	2		F	3		F	2	
G	0		G	0		G	0		G	0		G	0	
H	2	9,3970588	H	4	9,4184211	H	3	9,3984211	H	3	9,4086957	H	3	9,3694737
I	5		I	5		I	5		I	5		I	5	
J	0		J	0		J	0		J	0		J	0	
K	4		K	4		K	5		K	5		K	4	
L	0		L	0		L	0		L	0		L	0	
M	2		M	2		M	2		M	5		M	4	
N	0		N	0		N	0		N	0		N	0	
	17			19			19			23			19	

$$C_{PATRON-Humedad} = 0C_1{+}0C_2 + 1C_3{+}0C_4{+}0C_5 + 2C_6{+}0C_7 + 3C_8 + 5C_9 + 0C_{10} + 4C_{11} + 0C_{12} + 4C_{13} + 0C_{14} \quad [3]$$

La cuarta variable a estudiar es la **Materia Volátil**. Los tanteos y la formula patrón, creada mediante el último tanteo se deja a continuación:

Tabla 18: Análisis de sensibilidad de Materia Volátil.

Primer tanteo:			Segundo tanteo:			Tercer tanteo:			Cuarto tanteo:			Quinto tanteo:		
A	1		A	1		A	1		A	1		A	1	
B	1		B	1		B	1		B	3		B	3	
C	1		C	1		C	4		C	4		C	4	
D	1		D	1		D	1		D	1		D	1	
E	1		E	1		E	1		E	1		E	1	
F	1		F	1		F	1		F	1		F	0	
G	1		G	1		G	1		G	1		G	1	
H	1	32,82786	H	1	32,450455	H	1	32,22	H	1	32,24125	H	1	32,171613
I	1		I	5		I	5		I	5		I	5	
J	1		J	1		J	1		J	1		J	1	
K	1		K	1		K	4		K	4		K	4	
L	1		L	5		L	5		L	5		L	5	
M	1		M	1		M	1		M	3		M	3	
N	1		N	1		N	1		N	1		N	1	
	14			22			28			32			31	

Sexto tanteo:			Septimo tanteo:			Octavo tanteo:			Noveno tanteo:			Decimo tanteo:		
A	1		A	-1		A	0		A	0		A	0	
B	3		B	3		B	3		B	2		B	1	
C	4		C	4		C	4		C	4		C	4	
D	1		D	1		D	1		D	2		D	1	
E	1		E	1		E	1		E	3		E	4	
F	0		F	0		F	0		F	0		F	0	
G	0		G	0		G	0		G	0		G	0	
H	0	31,923571	H	0	27,223448	H	0	31,812963	H	0	31,778966	H	0	31,550000
I	5		I	5		I	5		I	5		I	5	
J	1		J	1		J	1		J	1		J	4	
K	4		K	4		K	4		K	4		K	3	
L	5		L	5		L	5		L	5		L	5	
M	3		M	3		M	3		M	3		M	2	
N	0		N	-1		N	0		N	0		N	0	
	28			29			27			29			29	

$$C_{PATRON-MateriaVolatil} = 0C_1+1C_2 + 4C_3+1C_4+4C_5 + 0C_6+0C_7 + 0C_8 + 5C_9 + 4C_{10} + 3C_{11} + 5C_{12} + 2C_{13} + 0C_{14} \quad [4]$$

La quinta variable a estudiar es el **Poder Calorífico**. Los tanteos y la formula patrón, creada mediante el último tanteo se deja a continuación:

Tabla 19: Análisis de sensibilidad del Poder Calorífico.

Primer tanteo:			Segundo tanteo:			Tercer tanteo:			Caurto tanteo:			Quinto tanteo:		
A	1		A	1		A	1		A	1		A	2	
B	1		B	1		B	1		B	1		B	2	
C	1		C	1		C	4		C	4		C	4	
D	1		D	1		D	1		D	1		D	3	
E	1		E	1		E	1		E	4		E	4	
F	1		F	1		F	4		F	4		F	4	
G	1		G	1		G	1		G	1		G	2	
H	1	25535,57	H	1	26132,258	H	1	26133,465	H	1	26014,191	H	4	25847,964
I	1		I	5		I	5		I	5		I	5	
J	1		J	1		J	1		J	1		J	1	
K	1		K	5		K	5		K	5		K	5	
L	1		L	1		L	1		L	4		L	4	
M	1		M	5		M	5		M	5		M	5	
N	1		N	1		N	1		N	1		N	2	
	14			26			32			38			47	

Sexto tanteo:			Septimo tanteo:			Octavo tanteo:			Noveno tanteo:			Decimo tanteo:		
A	2		A	2		A	1		A	1		A	1	
B	2		B	2		B	1		B	1		B	1	
C	4		C	4		C	4		C	2		C	5	
D	3		D	4		D	4		D	1		D	1	
E	5		E	5		E	5		E	2		E	5	
F	5		F	5		F	5		F	2		F	5	
G	2		G	1		G	1		G	1		G	1	
H	4	25853,392	H	4	25864,671	H	3	25914,448	H	1	25793,34	H	1	26078,243
I	5		I	5		I	5		I	2		I	5	
J	1		J	1		J	1		J	1		J	1	
K	5		K	5		K	5		K	2		K	5	
L	4		L	4		L	4		L	1		L	1	
M	5		M	5		M	5		M	2		M	5	
N	2		N	2		N	2		N	1		N	1	
	49			49			46			20			38	

$$C_{PATRON-PoderCalorifico} = 1C_1+1C_2 + 1C_3+1C_4+1C_5 + 1C_6+1C_7 + 1C_8 + 1C_9 + 1C_{10} + 5C_{11} + 1C_{12} + 5C_{13} + 1C_{14} \quad [5]$$

La sexta variable a estudiar es el **Índice de Slagging**. Los tanteos y la formula patrón, creada mediante el último tanteo se deja a continuación:

Tabla 20: Análisis de sensibilidad Índice Slagging.

Primer tanteo:			Segundo tanteo:			Tercer tanteo:			Cuarto tanteo:			Quinto tanteo:		
A	1		A	1		A	1		A	1		A	1	
B	1		B	1		B	1		B	3		B	1	
C	1		C	1		C	1		C	1		C	2	
D	1		D	1		D	1		D	1		D	2	
E	1		E	5		E	5		E	5		E	5	
F	1		F	1		F	1		F	1		F	1	
G	1		G	1		G	4		G	4		G	4	
H	1	0,069734	H	1	0,0442277	H	4	0,0485855	H	4	0,0481223	H	4	0,0474754
I	1		I	1		I	1		I	1		I	1	
J	1		J	1		J	1		J	0		J	0	
K	1		K	5		K	5		K	5		K	5	
L	1		L	1		L	4		L	4		L	4	
M	1		M	5		M	5		M	5		M	5	
N	1		N	1		N	1		N	1		N	1	
	14			26			35			36			36	

Sexto tanteo:			Septimo tanteo:			Octavo tanteo:			Noveno tanteo:			Decimo tanteo:		
A	1		A	1		A	0		A	0		A	0	
B	1		B	1		B	1		B	1		B	1	
C	2		C	2		C	2		C	2		C	2	
D	2		D	2		D	2		D	2		D	2	
E	5		E	5		E	5		E	5		E	5	
F	1		F	1		F	1		F	0		F	0	
G	3		G	3		G	3		G	3		G	3	
H	3	0,0463181	H	3	0,0404832	H	3	0,0384873	H	3	0,036706	H	3	0,0412696
I	1		I	1		I	1		I	1		I	1	
J	0		J	-1		J	-1		J	-1		J	0	
K	4		K	4		K	4		K	4		K	4	
L	3		L	3		L	3		L	3		L	3	
M	5		M	5		M	5		M	5		M	5	
N	1		N	1		N	1		N	1		N	0	
	32			33			32			31			29	

$$C_{PATRON-Slagging} = 0C_1+1C_2 + 2C_3+2C_4+5C_5 + 0C_6+3C_7 + 3C_8 + 1C_9 + 0C_{10} + 4C_{11} + 3C_{12} + 5C_{13} + 0C_{14} \quad [6]$$

La séptima variable a estudiar es el **Índice Fouling**. Los tanteos y la formula patrón, creada mediante el último tanteo se deja a continuación:

Tabla 21: Análisis de sensibilidad Fouling.

Primer tanteo:			Segundo tanteo:			Tercer tanteo:			Cuarto tanteo:			Quinto tanteo:		
A	1		A	1		A	1		A	1		A	1	
B	1		B	1		B	1		B	1		B	1	
C	1		C	1		C	1		C	1		C	1	
D	1		D	1		D	1		D	1		D	1	
E	1		E	5		E	5		E	5		E	5	
F	1		F	1		F	0		F	0		F	0	
G	1		G	1		G	0		G	0		G	0	
H	1	0,272165	H	1	0,2077023	H	1	0,1901493	H	1	0,1956936	H	2	0,2018824
I	1		I	1		I	1		I	3		I	3	
J	1		J	1		J	1		J	1		J	1	
K	1		K	5		K	5		K	5		K	5	
L	1		L	1		L	1		L	3		L	3	
M	1		M	5		M	5		M	5		M	5	
N	1		N	1		N	1		N	1		N	2	
	14			26			24			28			30	

Sexto tanteo:			Septimo tanteo:			Octavo tanteo:			Noveno tanteo:			Decimo tanteo:		
A	2		A	2		A	2		A	2		A	2	
B	1		B	1		B	0		B	0		B	0	
C	1		C	1		C	1		C	2		C	1	
D	1		D	1		D	0		D	0		D	0	
E	5		E	5		E	5		E	5		E	5	
F	0		F	-1		F	0		F	-1		F	0	
G	0		G	-1		G	0		G	-1		G	0	
H	2	0,2056202	H	2	0,1689167	H	2	0,1957502	H	2	0,1620091	H	2	0,196464
I	3		I	3		I	3		I	3		I	3	
J	2		J	2		J	2		J	2		J	2	
K	5		K	5		K	5		K	5		K	5	
L	3		L	3		L	3		L	3		L	4	
M	5		M	5		M	5		M	5		M	5	
N	2		N	2		N	2		N	2		N	2	
	32			34			30			33			31	

$$C_{PATRON-Fouling} = 2C_1 + 0C_2 + 1C_3 + 0C_4 + 5C_5 + 0C_6 + 0C_7 + 2C_8 + 3C_9 + 2C_{10} + 5C_{11} + 4C_{12} + 5C_{13} + 2C_{14} \quad [7]$$

La séptima variable a estudiar es la suma de las componentes químicas del análisis de las cenizas como **Fe_2O_3 y CaO**. Los tanteos y la formula patrón, creada mediante el último tanteo se deja a continuación:

Tabla 22: Análisis de sensibilidad de Fe2O3 y CaO.

Primer tanteo:			Segundo tanteo:			Tercer tanteo:			Cuarto tanteo:			Quinto tanteo:		
A	1		A	1		A	1		A	1		A	1	
B	1		B	0		B	0		B	0		B	0	
C	1		C	1		C	1		C	1		C	1	
D	1		D	1		D	1		D	1		D	2	
E	1		E	0		E	0		E	0		E	0	
F	1		F	0		F	0		F	0		F	0	
G	1		G	1		G	1		G	1		G	1	
H	1	12,01786	H	1	11,458	H	1	10,365556	H	1	10,542727	H	1	10,6768
I	1		I	0		I	0		I	0		I	0	
J	1		J	1		J	1		J	1		J	3	
K	1		K	1		K	5		K	5		K	5	
L	1		L	1		L	1		L	3		L	3	
M	1		M	1		M	5		M	5		M	5	
N	1		N	1		N	1		N	3		N	3	
	14			10			18			22			25	

Sexto tanteo:			Septimo tanteo:			Octavo tanteo:			Noveno tanteo:			Decimo tanteo:		
A	1		A	1		A	0		A	0		A	0	
B	0		B	0		B	0		B	0		B	0	
C	1		C	1		C	1		C	1		C	0	
D	2		D	2		D	1		D	1		D	0	
E	0		E	0		E	0		E	0		E	0	
F	0		F	0		F	0		F	0		F	0	
G	1		G	1		G	0		G	0		G	0	
H	1	10,6528	H	1	10,60125	H	1	10,340476	H	1	10,340476	H	0	9,856
I	0		I	0		I	0		I	0		I	0	
J	2		J	2		J	2		J	2		J	2	
K	5		K	5		K	5		K	5		K	5	
L	4		L	4		L	4		L	4		L	3	
M	5		M	5		M	5		M	5		M	4	
N	3		N	2		N	2		N	2		N	1	
	25			24			21			21			15	

$$C_{PATRON-Fe2O3+CaO} = 0C_1+0C_2 + 0C_3+0C_4+0C_5 + 0C_6 + 0C_7 + 0C_8 + 0C_9 + 2C_{10} + 5C_{11} + 3C_{12} + 4C_{13} + 1C_{14} \quad [8]$$

La octava variable a estudiar es otra componente química del análisis de las cenizas como **Na_2O**. Los tanteos y la formula patrón, creada mediante el último tanteo se deja a continuación:

Tabla 23: Análisis de sensibilidad de Na2O.

Primer tanteo:			Segundo tanteo:			Tercer tanteo:			Cuarto tanteo:			Quinto tanteo:		
A	1		A	1		A	1		A	1		A	2	
B	1		B	1		B	1		B	1		B	2	
C	1		C	1		C	1		C	1		C	2	
D	1		D	1		D	1		D	0		D	0	
E	1		E	5		E	5		E	5		E	5	
F	1		F	1		F	1		F	0		F	0	
G	1		G	1		G	1		G	0		G	0	
H	1	1,2	H	1	0,9976471	H	1	0,9976471	H	1	0,9409677	H	2	0,9983784
I	1		I	5		I	5		I	5		I	5	
J	1		J	1		J	1		J	1		J	2	
K	1		K	5		K	5		K	5		K	5	
L	1		L	5		L	5		L	5		L	5	
M	1		M	5		M	5		M	5		M	5	
N	1		N	1		N	1		N	1		N	2	
	14			34			34			31			37	

Sexto tanteo:			Septimo tanteo:			Octavo tanteo:			Noveno tanteo:			Decimo tanteo:		
A	2		A	2		A	2		A	2		A	2	
B	2		B	1		B	1		B	1		B	1	
C	2		C	1		C	1		C	1		C	1	
D	0		D	0		D	0		D	0		D	0	
E	5		E	5		E	5		E	5		E	5	
F	0		F	0		F	0		F	0		F	0	
G	0		G	0		G	0		G	0		G	0	
H	2	0,9979412	H	1	0,9425	H	1	0,9441379	H	1	0,9466667	H	1	0,9425
I	4		I	4		I	4		I	4		I	4	
J	2		J	1		J	1		J	1		J	1	
K	5		K	5		K	5		K	5		K	5	
L	4		L	3		L	3		L	4		L	3	
M	4		M	4		M	5		M	5		M	4	
N	2		N	1		N	1		N	1		N	1	
	34			28			29			30			28	

$$C_{PATRON-Na2O} = 2C_1+1C_2 + 1C_3+0C_4+5C_5 + 0C_6 + 0C_7 + 1C_8 + 4C_9 + 1C_{10} + 5C_{11} + 3C_{12} + 4C_{13} + 1C_{14} \quad [9]$$

Y por último, la décima variable a estudiar es la **Resistividad de las cenizas**, que se calcula en función de todos los componentes químicos de las cenizas. Los tanteos y la formula patrón, creada mediante el último tanteo se deja a continuación:

Tabla 24: Análisis de sensibilidad de Resistividad.

Primer tanteo:			Segundo tanteo:			Tercer tanteo:			Cuarto tanteo:			Quinto tanteo:		
A	1		A	1		A	1		A	4		A	3	
B	1		B	1		B	1		B	4		B	4	
C	1		C	1		C	1		C	4		C	4	
D	1		D	1		D	1		D	5		D	5	
E	1		E	1		E	1		E	1		E	1	
F	1		F	1		F	1		F	5		F	5	
G	1		G	1		G	1		G	5		G	5	
H	1	3,358923	H	1	2,485725	H	5	2,4983295	H	5	1,8999339	H	5	1,9238292
I	1		I	1		I	1		I	1		I	1	
J	1		J	1		J	1		J	1		J	1	
K	1		K	0		K	0		K	0		K	0	
L	1		L	1		L	1		L	1		L	1	
M	1		M	0		M	1		M	1		M	1	
N	1		N	1		N	1		N	1		N	3	
	14			12			17			38			39	

Sexto tanteo:			Septimo tanteo:			Octavo tanteo:			Noveno tanteo:			Decimo tanteo:		
A	3		A	3		A	3		A	3		A	3	
B	4		B	5		B	5		B	5		B	5	
C	4		C	4		C	4		C	4		C	4	
D	5		D	5		D	5		D	5		D	5	
E	1		E	1		E	0		E	0		E	0	
F	5		F	5		F	5		F	5		F	5	
G	5		G	5		G	5		G	5		G	5	
H	5	2,0599087	H	5	2,0436927	H	5	1,8269522	H	5	1,8409376	H	5	1,7956891
I	4		I	4		I	4		I	4		I	4	
J	4		J	4		J	4		J	4		J	4	
K	0		K	0		K	0		K	0		K	0	
L	3		L	3		L	3		L	3		L	2	
M	1		M	1		M	0		M	0		M	0	
N	3		N	3		N	3		N	4		N	3	
	47			48			46			47			45	

$$C_{PATRON-Resistividad} = 3C_1+5C_2 + 4C_3+5C_4+0C_5 + 5C_6 + 5C_7 + 5C_8 + 4C_9 + 4C_{10} + 0C_{11} + 2C_{12} + 0C_{13} + 3C_{14} \quad [10]$$

Todas las ecuaciones patrón obtenidas por cada variable, son analizadas mediante la siguiente matriz de trazabilidad.

Tabla 25: Matriz de Trazabilidad.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
VARIABLES	CARBON	CARBON 1	CARBON 2	CARBON 3	CARBON 4	CARBON 5	CARBON 6	CARBON 7	CARBON 8	CARBON 9	CARBON 10	CARBON 11	CARBON 12	CARBON 13	CARBON 14
1	CENIZAS	3	3	2	1	4	2	1	1	1	0	1	0	0	1
2	AZUFRE	5	3	3	2	2	2	2	2	3	5	2	3	4	4
3	HUMEDAD	0	0	1	0	0	2	0	3	5	0	4	0	4	0
4	MATERIA VOLATIL	0	1	4	1	4	0	0	0	5	4	3	5	2	0
5	PODER CALORIFICO	1	1	5	1	5	5	1	1	5	1	5	1	5	1
6	SLAGGING	0	1	2	2	5	0	3	3	1	0	4	3	5	0
7	Fe_2O_3+CaO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	3	4	1
8	FOULING	2	0	1	0	5	0	0	2	3	2	5	4	5	2
9	Na_2O	2	1	1	0	5	0	0	1	4	1	5	3	4	1
10	RESISTIVIDAD	3	5	4	5	0	5	5	5	4	4	0	2	0	3

La forma de la matriz anterior simplificada se mostrara a continuación:

Tabla 26: Matriz de Trazabilidad simplificada.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
VARIABLES	CARBON	CARBON 1	CARBON 2	CARBON 3	CARBON 4	CARBON 5	CARBON 6	CARBON 7	CARBON 8	CARBON 9	CARBON 10	CARBON 11	CARBON 12	CARBON 13	CARBON 14
1	CENIZAS y AZUFRE	4	3	3	2	2	2	2	2	3	4	2	3	3	3
	HUMEDAD Y MATERIA VOLATIL	0	1	2	1	2	2	0	2	2	3	3	3	3	0
3	SLAGGING y Fe2O3 + CaO	0	1	1	1	3	0	3	3	1	0	4	3	5	0
4	FOULING Y Na2O	2	1	1	0	5	0	0	2	3	2	5	4	5	2
5	RESISTIVIDAD	3	5	4	5	0	5	5	5	4	4	0	2	0	3
Carbon general		3	1	3	1	3	1	2	3	3	4	4	3	4	2
Aporte de variacion	(+1)	3	2	4	2	4	1	4	3	4	4	5	4	5	4
	(-1)	1	0	2	0	2	0	2	1	2	2	4	2	4	2

Dicha simplificación ayuda encontrar con más facilidad la ecuación general para todas las variables, mediante la escala de ponderación. Esta ecuación se halla a partir de las dos matrices anteriores:

$$C_{GENERAL} = 3C_1{+}1C_2 + 3C_3{+}1C_4{+}3C_5 + 1C_6 + 2C_7 + 3C_8 + 3C_9 + 4C_{10} + 4C_{11} + 3C_{12} + 4C_{13} + 2C_{14} \quad [11]$$

La comprobación de validez de esta ecuación se realiza introduciéndola como ecuación patrón de cada variable. También para ver la variación puntual de cada variable mediante la ecuación, se formula una segunda ecuación con (***Cgeneral+1***) y una tercera ecuación en forma de (***Cgeneral-1***).

$$C_{GENERAL(+1)} = 4C_1{+}2C_2 + 4C_3{+}2C_4{+}4C_5 + 2C_6 + 3C_7 + 4C_8 + 4C_9 + 5C_{10} + 5C_{11} + 4C_{12} + 5C_{13} + 3C_{14} \quad [12]$$

$$C_{GENERAL(-1)} = 2C_1{+}0C_2 + 2C_3{+}0\,C_4{+}2C_5 + 0C_6 + 1C_7 + 2C_8 + 2C_9 + 3C_{10} + 3C_{11} + 2C_{12} + 3C_{13} + 1C_{14} \quad [13]$$

Una vez obtenidas las ecuaciones, se introducen en cada una de las variables, y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 27: Resultado de comprobación con ecuación general y variación puntual de ecuación general.

Variables	Cenizas	Azufre	Humedad	Materia Volatil	Poder Carolrifico	Salgging	Fouling	Fe2O3+CaO	Na2O	Resistividad
Restriccion	<=12 >7,56	<= 0,5 % <3,5%	>5 y <=10 Promedio 10,70 Min 9,07	>30,49 Entre 28-36%	24 - 32 MJ/kcal	Valor limite 0,06 - 2,00 Min 0,00 Max 0,15	Valor limite 0,20 - 0,5 Min 0,11 Max 0,42	<10% Max 13,97 Min 8,8	< = 0,5 - 1,15 % Max 1,65 Min 0,52	Valor limite $0{,}1x10^{10}$ Ohm.cm Max 11,57 Min 0,93
Resultado C general	9,737	0,349	10,808	32,537	25,595	0,067	0,249	11,674	1,139	0,040
Resultado C general (+1)	9,741	0,347	10,780	32,616	25,579	0,068	0,255	11,767	1,156	0,038
Resultado C general (-1)	9,730	0,355	10,868	32,368	25,630	0,066	0,235	11,474	1,104	0,043

Capítulo 7: Conclusiones

- En primer lugar, se ha establecido un criterio propio a seguir. Utilizando como punto de partida el método de ponderación de los datos, con la construcción de una matriz de trazabilidad. En base a esto se ha podido encontrar un paso importante, que son las ecuaciones para homogeneizar una mezcla de carbones.
- En la *tabla 27* se observa claramente que la ecuación encontrada se ajusta para todas las variables, la desviación entre la variación puntual de dicha ecuación es de 0,2 al 2% como máximo cumpliendo en todo caso las restricciones. Salvo dos variables que no cumplen la restricción, humedad y el sumatorio de los componentes químicos de las cenizas, pasándose un 8% y 16% respectivamente. La primera desviación al no superar 10% puede considerarse optima, pero la segunda con un 16% puede deberse a mezcla de rango de carbón.
- Las ecuaciones obtenidas mediante el análisis de sensibilidad pueden ser utilizadas en las optimizaciones posteriores. También señalar que es posible aplicar dicho método para los casos prácticos y obtener resultados esperados.
- También hay que tener en cuenta el aspecto económico. Siendo la ecuación general: $C_{GENERAL} = 3C_1+1C_2 + 3C_3+1C_4+3C_5 + 1C_6 + 2C_7 + 3C_8 + 3C_9 + 4C_{10} + 4C_{11} + 3C_{12} + 4C_{13} + 2C_{14}$, se observa que la mezcla homogénea no conserva la medida proporcional de cada carbón. Sino que algunos tienen mayor participación, por tener mejores características. Esto puede afectar de igual manera al coste, teniendo igual presupuesto X para la compra de cada carbón, los de mayor ponderación serán de mayor coste.

Capítulo 8: Bibliografía

[1] CARBUNION. [http://www.carbunion.com]. *El sector del carbón en España.* 2010. [Consulta: 10 junio 2015]. Disponible en: http://www.ine.es/censos2011_datos/cen11_datos_inicio.htm

[2] MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO. 2007. *La energía en España.* [http://www.minetur.gob.es]. División de información, documentación y publicaciones. [Consulta: 15 junio 2015]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.minetur.gob.es/energia/es-ES/Servicios1/Destacados/LaEnerg%C3%ADaenEspa%C3%B1a2007.pdf

[3] APRENDEENLINEA. [http://aprendeenlinea.udea.edu.co]. *Conductividad.* Conductividad eléctrica y molar, efecto de la temperatura y composición iónica. [Consulta: 15 junio 2015]. Disponible en: http://aprendeenlinea.udea.edu.co/lms/moodle/mod/resource/view.php?inpopup=true&id=54386

[4] COALAGE. [http://www.coalage.com]. *Coal Quality As the Boiler Sees It.* 2010. [Consulta: 19 junio 2015]. Disponible en: http://www.coalage.com/features/704-coal-quality-as-the-boiler-sees-it.html#.Vm2teb-PWnt

[5] PFERNANDEZDIEZ. *Eliminación de partículas.* [http://files.pfernandezdiez.es]. [Consulta: 25 junio 2015]. Archivo pdf. Disponible en: http://files.pfernandezdiez.es/CentralesTermicas/PDFs/32CT.pdf

[6] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2002. *Controles de materia particularizada.* [http://www3.epa.gov/]. Capítulo 3: Precipitadores electrostáticos. [Consulta: 27 junio 2015]. Archivo pdf. Disponible en: http://www3.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs6ch3-s.pdf

[7] LONDOÑO GIRALDO, C.A. 2002. [http://www.bdigital.unal.edu.co/]. *Combustión de carbón.* [http://www.bdigital.unal.edu.co]. Capítulo 4.3: Combustión de carbón pulverizado. [Consulta: 27 junio 2015]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/10987/31/70502857.2002.Parte6.pdf

[8] THE AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION. [https://www.acaa-usa.org/]. *Fly Ash.* [Consulta: 28 junio 2015]. Disponible en: https://www.acaa-usa.org/About-Coal-Ash/What-are-CCPs/Fly-Ash

[9] UNIVERSIDAD NACIONAL DE COOMBIA. [http://www.unalmed.edu.co] *Análisis de cenizas.* [Consulta: 28 septiembre 2015]. Disponible en: http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/an%E1lisis_de_cenizas.htm

[10] PLAZA, P.P. [http://orca.cf.ac.uk]. *The Development of a Slagging and Fouling Predictive Methodology for Large Scale Pulverised Boilers Fired withCoal/Biomass Blends.* [Consulta: 02 octubre 2015]. Disponible en: http://orca.cf.ac.uk/58453/1/2014PlazaPPPhD.pdf

[11] FUNDACIÓN PARA ESTUDIOS SOBRE LA ENERGÍA. [http://www.fundacionenergia.es]. *El futuro del carbón en la energética española*. 2008. [Consulta: 08 octubre 2015]. Disponible en: http://www.fundacionenergia.es/pdfs/Carb%C3%B3n%20Futuro/Portada%20%20Indice%20y%20Res%C3%BAmenes.pdf

[12] AMAYA, A. [https://www.colibri.udelar.edu.uy/]. *Obtención y caracterización de tamices moleculares de carbón.* 2010. [Consulta: 15 octubre 2015]. Disponible en: https://www.colibri.udelar.edu.uy/bitstream/123456789/2687/1/fq30315.pdf

[13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. [http://www.astm.org.htm] ASTM *D388-15, Standard Classification of Coals by Rank.* [Consulta: 27 octubre 2015]. Disponible en: www.astm.org/Standards/D388.htm

[14] SIERRA CLUB. [http://vault.sierraclub.org]. 2010. *Merchants of Climate Chaos.* [Consulta: 30 octubre 2015]. Disponible en: http://vault.sierraclub.org/sierra/201005/coalmap.aspx

[15] MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. [http://www.magrama.gob.es/es/]. *Inventarios nacionales de emisiones a la atmósfera 1990-2012.* [Consulta: 30 octubre 2015]. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/00_Introducci%C3%B3n_tcm7-219780.pdf

[16] CORTÉS, V.J. [http://www.factoria3.com]. *Carbón.* [Consulta: 8 noviembre 2015]. Disponible en: http://www.factoria3.com/documentos/CARBON.pdf

[17] PALLARÉS RANZ, J. [https://zaguan.unizar.es]. *Predicción de inquemados en cenizas en calderas de carbón pulverizado. Análisis y evaluación de estrategias de operación.* 2008. Repositorio de la Universidad de Zaragoza. [Consulta: 30 octubre 2015]. Disponible en: https://zaguan.unizar.es/record/3359?ln=es

[18] DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES AND MINES. [https://www.dnrm.qld.gov.au/]. *Queensland Coal.*1998. [Consulta: 15 noviembre 2015]. Disponible en: https://www.dnrm.qld.gov.au/?a=267505

[19] HUFFMAN, G.P.; HUGGINS, F.E. [https://web.anl.gov]. *Reactions and transformations of coal mineral matter at elevated temperatures.* [Consulta: 15 noviembre 2015]. Disponible en: https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/29_4_PHILADELPHIA_08-84_0056.pdf

[20] MOHANTY, C.R.; SWAR, A.K.; MEIKAP, B.C.; SAHU, J.N. *Studies on factors influencing fly ash resistivity from electrostatic precipitator with reference to India.* 2010. Journal of Scientific & Industrial Research, pp. 795-803.

[21] *Steam Its Generation and Use.* Babcock & Wilcox Enterprises. 2010.

[22] CHANDRA, A.; KUMAR, S.; SHARMA, P.K. *Investigation on fly ash resisitivity: Development of empirical relations based on experimental measurement*. 2006. Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology Delhi.

[23] BICKELHAUPT, R.E. *A technique for predicting fly ash resistivity.* 1979. Office of scientific and technical information.

[24] WEATHER UNDERGROUND. [http://www.wunderground.com/]. Información del tiempo en Múrmansk, Russia. [Consulta: 30 octubre 2015]. Disponible en: http://www.wunderground.com/q/zmw:00000.1.22113

[25] CLIMATE-DATA.ORG. [http://es.climate-data.org/]. Información del tiempo en Múrmansk, Russia. [Consulta: 30 octubre 2015]. Disponible en: http://es.climate-data.org/location/3338/

[26] GEOCOYMAS. [http://geoecoymas.galeon.com/]. Información sobre la minería en Rusia. [Consulta: 30 octubre 2015]. Disponible en: http://geoecoymas.galeon.com/rusiasecter.htm

[27] SOCIEDAD CANARIA DE FOMENTO ECONÓMICO. *Informe de mercado de Rusia.* [http://www.proexca.es/es-es]. [Consulta: 27 julio 2015]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.proexca.es/Portals/0/Documents/EstudiosMercado/Europa/INFORME_DE_MERCADO_RUSIA.pdf

[28] VEDOMOSTI. [http://www.vedomosti.ru/]. *Factores para la ampliación del carbón ruso.* 2010. The Wall Street Journal and Independent Media. [Consulta: 22 septiembre 2015]. Disponible en:

http://www.vedomosti.ru/business/articles/2010/10/22/strana_dast_uglya

[29] EMBAJADA DE LA FEDERACIÓN DE RUSIA EN LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. [http://colombia.mid.ru]. *Geografía y clima en la Rusia.* [Consulta: 26 septiembre 2015]. Disponible en: http://colombia.mid.ru/es/rusia/-/asset_publisher/Js0ve5UB400H/content/geografia-y-clima

[30] EMISON. [http://www.emison.com/]. *Descripción de las características y propiedades de los electrofiltros.* [Consulta: 23 septiembre 2015]. Disponible en: http://www.emison.com/electrofiltro.htm

[31] ITURRIOZ, J. [http://www.expansion.com]. *Análisis de sensibilidad en valoración de inversiones.* DIARIO EXPANSIÓN. [Consulta: 13 septiembre 2015]. Disponible en:

http://www.expansion.com/diccionario-economico/analisis-de-sensibilidad-en-valoracion-de-inversiones.html

[32] J. R. CRAIG, D. J. VAUGHAN, B. J. SKINNER. *Recusrsos de a tierra: origen, uso e impacto ambiental.* 2007. Pearson Prentice Hall.

[33] FUNDACION PARA ESTUDIO SOBRE LA ENERGIA. *El futuro del carbón en la política energética española*. 2008. Tiasa.