



ASIGNATURA: MÁQUINAS TÉRMICAS –AÑO 2020

UNIDAD TEMÁTICA N° 2

Combustibles para generadores de vapor, combustibles sólidos, líquidos, gaseosos. Combustibles nucleares. Características físico químicas. Poderes caloríficos. Su almacenamiento y transporte.

2.1 GENERALIDADES:

La energía en forma de calor que transforman las maquinas térmicas, se obtienen en forma directa o indirecta por combustión (quemar) de un material o por fisión o fusión de sus componentes.

En la mayoría de las bibliografías existentes, los distintos autores definen como combustible a todo material que al combustionar desprende energía en forma de calor.

Con los recursos energéticos que se disponen actualmente es mas racional considerar como COMBUSTIBLE, a toda substancia que por un proceso químico de oxidación exotérmica o por proceso físico de fisión o fusión suministran energía en forma de calor. A los que cumplen el primer proceso, consideremos como COMBUSTIBE INDUSTRIAL, a aquellos que liberan energía en forma de calor, sin producir gases nocivos para el hombre. Esta aclaración es válida, desde el omento que existen materiales que al quemar producen gases tóxicos y corrosivos, como por ejemplo el azufre.

Como COMBUSTIBLE NUCLEAR, se considera a toda substancia que por un proceso físico de Fisión o Fusión de sus elementos componentes liberan energía en forma de calor, y partículas RADIOACTIVAS perjudiciales para el hombre, lo que obliga a que su utilización se realice en severas condiciones de aislamiento.

Existe otro grupo de combustibles denominados PROPULSION, que resultan de la mezcla de sustancias solidas y/o liquidas, una de las cuales actúa como combustible y la otra como comburente. Se los utiliza específicamente en la industria aeronáutica y balística.

2.2 COMBUSTIBLES INDUSTRIALES

De acuerdo con su origen los combustibles industriales se agrupan en:

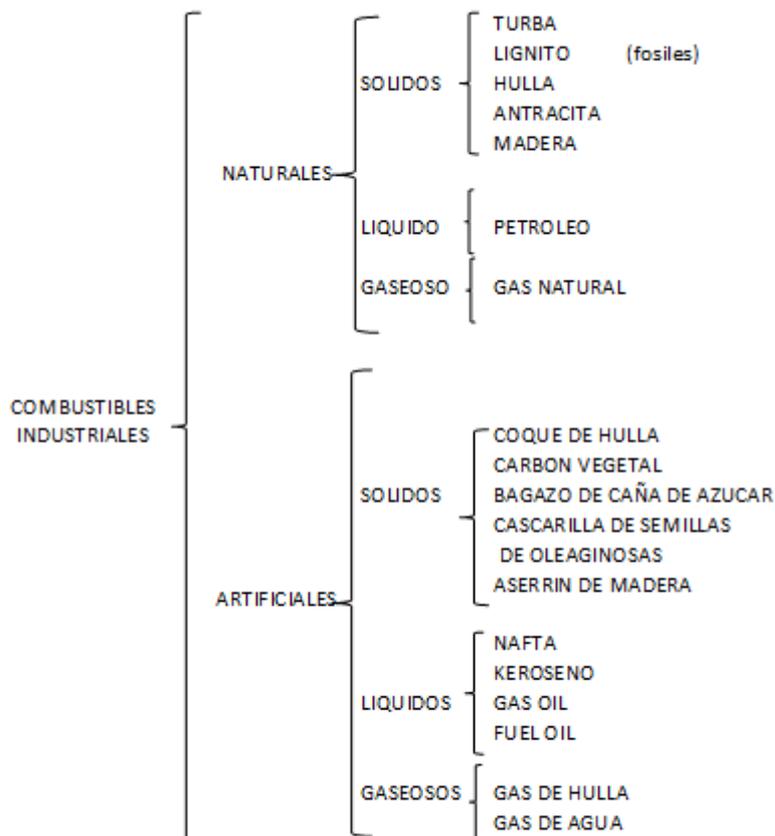
- a). Naturales, y
- b). Artificiales.

Cada uno de ellos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos.



Se consideran naturales a todos aquellos que se los utilizan, tal cual se los encuentra en la naturaleza, o a lo sumo con una preparación previa en cuanto se refiere a su granulometría, % de humedad higroscópica, etc., pero sin modificación de su estructura, tendientes a que el proceso de combustión se realice en la forma lo más completa posible.

Son artificiales los derivados de los naturales, por un proceso de transformación. Desde el punto de vista del proceso de combustión, los líquidos y gaseosos, son los más convenientes, ya que no necesitan preparación previa, y se combustionan en forma más completa y perfecta que los sólidos, y dentro de los mismos los gaseosos. No obstante, ello, la disponibilidad en el lugar de consumo, características que debe reunir, costo, etc. son los factores concurrentes que se deben analizar para establecer el tipo de combustible a utilizar.





2.3 COMBUSTIBLES NATURALES

2-3-1) SOLIDOS.

a) FOSILES: Se denominan de esta manera a todos aquellos que son el resultado de la acumulación de restos vegetales y/o. animales, en épocas geológicas pasadas, que por acción de diversos agentes (presión, temperatura, microorganismos, etc.) experimentaron una pérdida gradual de oxígeno e hidrógeno aumentando su contenido en carbono. Dentro de los mismos tenemos: LA TURBA, EL LIGNITO, LA HULLA Y LA ANTRACITA.

a-1) TURBA: es el primer producto, resultado de la acumulación de materiales, como consecuencia de ello sus yacimientos, son los de menor edad geológica, y tienen por tal motivo bajo contenido de carbono y gran porcentaje de humedad, características que le confieren gran fragilidad. Se utiliza en las proximidades de sus yacimientos, que son explotaciones a cielo abierto, ya que para su transporte a grandes distancias, debe ser cortado en paneles y sometido a un proceso de secado, que aumenta su costo. En nuestro país existen turberas en Tierra del Fuego y Jujuy.

a-2) LIGNITO: Es el segundo producto que se forma por acción de los factores mencionados. Sus yacimientos son más profundos y tienen mayor contenido de Carbono en detrimento del % de oxígeno e hidrógeno. Su utilización se realiza en forma de briquetas. En nuestro País se encuentran yacimientos en San Juan, Mendoza, la Rioja y Catamarca.

a-3) HULLA: Es el producto que sigue en formación geológica. Se denomina también de carbono “carbón de piedra o carbón mineral”. Tiene alto contenido (85-90%) de carbono y por tal motivo alto poder calórico con respecto a los anteriores. Sus yacimientos son de profundidad y su explotación debe realizarse en galerías (minas)

Es el combustible fósil más utilizado. En nuestro país se lo explota en Santa Cruz (Rio Turbio), Existiendo yacimientos en San Juan y Mendoza.

a-4) ANTRACITA: Es el último de los productos que se forma, es decir, sus yacimientos son de mayor antigüedad y profundos. Tiene alto contenido de carbono; (Mayor de 90 %) y elevado poder calórico, En nuestro país no existen yacimientos.

La mayor producción de combustibles fósiles se encuentra en EEUU, Canadá, Alemania, Irlanda, Inglaterra, Suecia, Noruega y Rusia.



b) MADERA: Se considera como tal la sustancia dura y compacta de los árboles (especies vegetales de tronco leñoso, que se ramifica a cierta altura del suelo), de gran abundancia en la naturaleza. Tiene la ventaja que es un recurso energético renovable. Nuestro país por su gran diversidad de climas, posee una gran variedad de especies vegetales aptas para ser utilizados como combustible.

2-3-2) LIQUIDOS

a) **PETROLEO:** Es el único combustible natural líquido, que según algunos autores es de origen inorgánico (teoría de Mendelejeff) por composición de carbohidratos metálicos por acción del agua, formando hidrocarburos. Otros de origen orgánico (teoría de Engler-Höfer), por acumulación y posterior descomposición de restos de animales y algas. En la práctica lo que en realidad se utiliza son sus derivados. En nuestro país tenemos yacimientos en Salta, Formosa (de base parafinica), Chubut; Neuquén y Mendoza (de base nafténica)

2-3-3) GASEOSOS

Se obtienen por perforaciones a grandes profundidades, directamente por la presión existente en el yacimiento o por bombeo.

2-4) COMBUSTIBLES ARTIFICIALES:

2-4-1) SOLIDOS:

a) **COQUE DE HULLA:** Se lo obtiene por destilación seca de la hulla, en las denominadas coquerías. Con el proceso indicado se aumenta el contenido de carbono de Hulla a prácticamente un 98-99%.

b) **CARBON VEGETAL:** Se lo obtiene a partir de la madera por un proceso de combinación incompleta (pirólisis), en hornos de mampostería o metálicos.

c) **BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR:** Es un residuo de la fabricación del azúcar. Como también este Sub- Producto se lo puede utilizar para la fabricación de papel, se lo emplea cuando razones económicas así lo ameritan

d) **CASCARELLAS DE SEMILLAS DE OLEAGINOSAS:** se obtiene como residuo en la industria aceitera. Como en el caso anterior, se lo utiliza cuando no tiene otra aplicación económica.



e) ASERRIN DE MADERA: Como un subproducto del proceso de fabricación de tanino y / o furfural, se lo utiliza en las industrias tánicas. El producido por los aserraderos se lo podría utilizar como combustible, previo briqueteado, que en nuestro país lamentablemente no se realiza, como ocurre por ejemplo en, EEUU. En la industria papelera se lo utiliza en forma de pequeñas chips, que se obtiene de la madera que no se utiliza en el proceso de fabricación del papel.

2-4-2) LIQUIDOS

Pertenecen a este grupo todos aquellos que se obtienen por destilación fraccionada del petróleo: naftas; queroseno; diesel-oil; fuel-oil.

2-4-3) GASEOSOS

a) GAS DE HULLA: Se obtiene por destilación de la hulla y posterior purificación para la extracción de alquitrán y gases nocivos y / o corrosivos.

b) GAS DE ACUA: Se obtiene haciendo pasar vapor de agua sobre carbono al rojo.

En la actualidad no tiene aplicación, salvo el gas de Hulla en las acerías donde es un subproducto de las coquerías.

2-5) COMBUSTIBLES NUCLEARES:

Se denominan de esta manera a todos esos minerales (elementos químicos) que por un proceso físico de fisión o fusión liberan gran energía en forma de calorías y partículas, estabilizándose después de muchas desintegraciones sucesivas. Por tal motivo son elementos alternativamente radioactivos y los que más afectan al ser humano. Su utilización debe realizarse bajo severas condiciones de aislamiento.

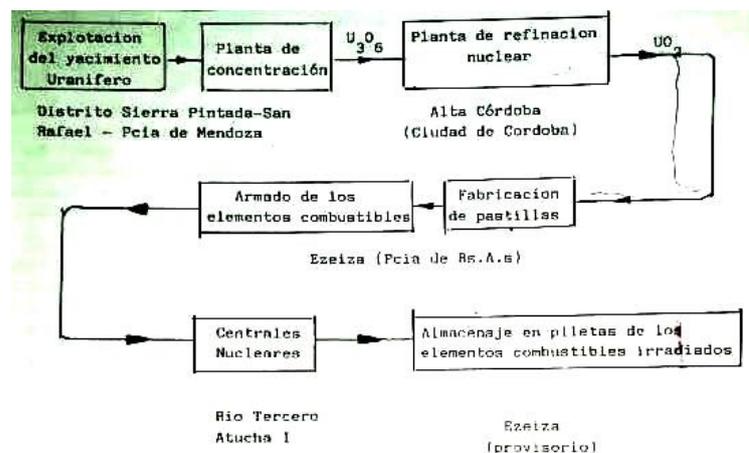
2-5-1) URANIO: Actualmente es el combustible nuclear más utilizado. Se encuentra en la naturaleza en tres isotopos (variedades que presenta un elemento químico) U^{234} (+0,01%) U^{235} (0,7%) y U^{238} (99,29%). El isotopo más utilizado es el U^{235} por ser el más fisionable, al ser bombardeado por neutrones térmicos (de baja velocidad). El U^{238} no se fusión por acción de los neutrones térmicos y con los rápidos tienen bajo rendimiento. Por tal motivo cuando esto es posible (razones económicas), se utiliza el Uranio enriquecido que posee un 2-4% del isótopo 235.



2-5-2) PLUTONIO: Es un combustible nuclear derivado, que se obtiene en los llamados reactores reproductores, que estudiaremos posteriormente.

2-5-3) CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR: Se denomina de esta manera al conjunto de procesos que se realizan para transformar el Uranio, desde el estado en que se encuentra en la naturaleza hasta el depósito de los residuos de las centrales nucleares. En términos generales, comienza con la explotación del yacimiento uranífero, siguiendo su concentración para elevar el tenor de uranio; su refinación; conversión a dióxido de uranio (UO_2), fabricación de pastillas de UO_2 fabricación de los llamados elementos combustibles; su utilización en la central nuclear y termina con el depósito de los elementos combustibles agotados (irradiados o envenenados).

En nuestro país la transformación del Uranio natural hasta constituir los elementos combustibles nucleares comienza, en la provincia de Mendoza, con la extracción del mineral de Uranio, en el distrito sierra Pintada (San Rafael) y su tratamiento para obtener un concentrado de Óxido de Uranio con un tenor del 75%, continua en la ciudad de CORDOBA (En el establecimiento ubicado en alta Córdoba) donde a partir del concentrado de Uranio, se obtiene dióxido de Uranio (UO_2) en polvo, para finalizar en Ezeiza donde se transforma el polvo de UO_2 en pastillas, y luego su cargado en tubos construidos con una aleación a base de Zirconio para constituir los denominados “Elementos Combustibles”, que se utilizan posteriormente en los reactores nucleares para provocar el proceso físico de fisión.





Estudio de factibilidad realizada en diversas zonas del país, indicaron que la zona más apta, en cuanto a seguridad se refiere, sería la roca existente en la zona de la sierra del Medio, cerca de la localidad de GASTRE, en la provincia de Chubut.

Nuestro país reúne condiciones excepcionales para el uso del Uranio, como combustible nuclear, ya que las tareas de exploraciones realizadas, que los yacimientos del mineral de Uranio, abarca un 20% del territorio nacional, con una existencia relevada hasta la fecha de unas 11,000 toneladas, suficientes para el cupo de las necesidades de 4 a 6 centrales nucleares, durante unos 30 años (estimación de la vida útil de las mismas). A la existencia de mineral de Uranio debemos sumar la obtención de Uranio enriquecido en la planta instalada en Picaniyen, en la provincia de Chubut y de agua penada (deuterio) en Arroyito, en la provincia de Neuquen.

2-6) COMBUSTIBLES DE PROPULSIÓN:

Si bien actualmente estos tipos de combustibles no tienen interés para el funcionamiento de las máquinas térmicas, los mencionaremos por su aplicación en el campo de la Astronáutica y balística de largo alcance. Se los agrupa en MONERGOLES, cuando la propulsión procede de un producto, o bien de una mezcla previa de productos que contienen simultáneamente al comburente y al combustible y en PROPERGOLES o HIPEGOLES, cuando la propulsión se produce al mezclarse el comburente y el combustible, al estado líquido o ambos. El funcionamiento de los cohetes se realizan utilizando agua oxigenada, el oxígeno y el ácido nítrico.

2-7) FACTORES A TENER EN CUENTA PARA LA ELECCION DE UN COMBUSTIBLE INDUSTRIAL:

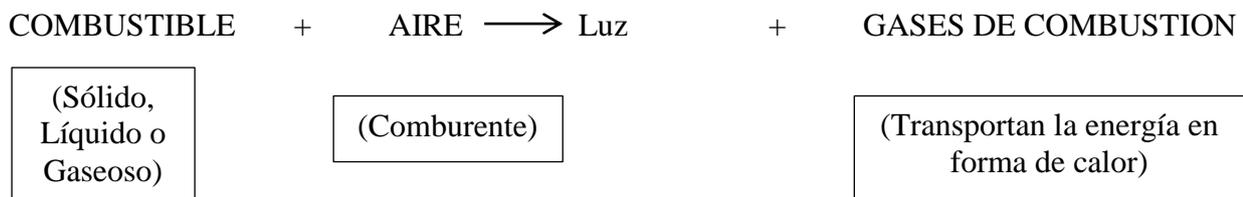
La energía en forma de calor que se obtiene de un combustible industrial debe ser el mayor posible para obtener un bajo costo de producción. La existencia de los distintitos combustibles mencionados previamente, lleva la necesidad de efectuar un análisis previo de una serie de factores para decidir qué tipo de combustible se debe utilizar para obtener el mayor rendimiento económico posible. En primer lugar, sin que ello excluya otro orden de análisis, se debe tener en cuenta el. PODER CALORIFICO del combustible, es decir la energía liberada en forma de calor en el proceso de COMBUSTION. La lógica indica que se debe utilizar el que tenga el mayor valor. En la práctica, esto no es tan así. En efecto,



debemos considerar la disponibilidad en el lugar de uso. De nada valdrá elegir un combustible de elevado poder calorífico, si se lo debe traer de otro lugar y su transporte tiene un costo elevado. Otro de los factores a tener en cuenta es la preparación que necesita el combustible (generalmente los sólidos) para que la combustión se produzca en la forma más perfecta y completa posible. Se debe analizar también las características que presentaran los gases de combustión o humos, que se envían a la atmosfera, para no contaminar el medio ambiente. En cada caso y dentro de los posibles combustibles, se debe establecer EL COSTO DE PRODUCCIÓN de la energía en forma de CALOR.

2-8) COMBUSTIÓN:

Se define como COMBUSTION, a la reacción química de oxidación exotérmica, por la cual la energía química de un combustible industrial (sólido: liquido o gaseoso) se libera en forma de energía calórica. El agente oxidante es el oxígeno del aire, que constituye el comburente. La característica de la reacción es que se produce con desprendimiento de luz y gases de combustión que transportan la energía en forma de calor.



El proceso de combustión es complejo y en él intervienen factores de carácter químico, térmico y mecánico, difíciles de determinar con exactitud en la práctica. Para un estudio completo de la misma, deben considerarse factores estáticos y dinámicos. Los estáticos determinan la cantidad de sustancias que intervienen y la energía liberada, describiendo los estados iniciales y finales del proceso. Es decir, no se tiene en cuenta como se realiza el mismo. Los dinámicos por el contrario, de estudian el desarrollo del proceso en el tiempo y el espacio, complicando el problema. Por tal motivo, la determinación de la energía liberada se resuelve desde el punto de vista estático, ya que los resultados que se obtienen con esta simplificación, responden a las necesidades de la práctica con suficiente exactitud.



Desde el punto de vista económico el combustible al combustible debe cumplir las siguientes condiciones:

- a) Que sus componentes se oxiden al máximo grado.
- b) Que queme totalmente.

Por ejemplo si la oxidación del carbono (uno de los componentes principales de todo combustible), es máxima, se forma CO_2 liberándose $\pm 340,000$ KJ/kg. Si la oxidación produce únicamente CO se liberaran ± 9.200 KJ/kg lo que indica pérdida de energía para el segundo caso. A su vez, si el combustible no se quema por completamente hay pérdida de calor no generado.

Cuando la oxidación de los componentes del combustible es máxima y arde completamente se dice que la combustión es “perfecta y completa”. Caso contrario será Imperfecta e Incompleta “, pudiendo presentarse situaciones intermedias: perfectas- incompleta; Imperfecta-completa. Una combustión imperfecta es normalmente consecuencia de insuficiencia cuantitativa de aire (falta de oxígeno). La incompleta por insuficiencia cualitativa, es decir falta de tiempo para que el combustible queme completamente; baja temperatura en el hogar donde se produce la combustión o la preparación insuficiente del combustible.

2-8-1) CALCULO DEL AIRE MINIMO O TEORICO NECESARIO PARA UNA COMBUSTION PERFECTA

Se realiza en base a las reacciones estequiometrias de oxidación perfecta (Máxima) de los componentes del combustible y teniendo en cuenta:

a) que el aire atmosférico (comburente) está constituido principalmente por oxígeno y nitrógeno en las siguientes proporciones:

En volumen: (Composición Volumétrica: 21% de oxígeno; 79% de nitrógeno)

En peso: (Composición gravimétrica 23% de oxígeno 77% de nitrógeno volumétrico)

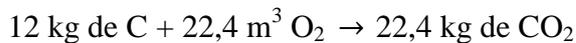
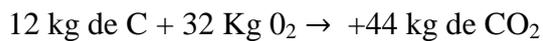
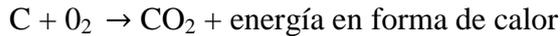
b) que 1 (un) Kmol de cualquier elemento es el peso molecular del mismo expresado en Kg y que al estado gaseoso ocupa un volumen de $22,4 \text{ m}^3$.

Como ejemplo de cálculo consideraremos un combustible sólido, cuyo análisis elemental indica la siguiente composición gravimétrica: g_c % de Carbono; g_h % de Hidrogeno; g_s % Azufre; g_o % de Oxigeno y g_w % de agua de humedad o higroscópica.



Las correspondientes ecuaciones estequiometrias de la reacción de oxidación exotérmica, indica lo siguiente:

1) Para el carbono:



En base a las ecuaciones anteriores podemos establecer las siguientes relaciones:

1-1) kg de O_2 / kg de combustible.

12 kg de carbono necesitan 32 kg de oxígeno.

1 kg de carbono necesitará $32 \text{ kg } O_2 / 12 \text{ kg C} = 2,67 \text{ kg } O_2 / \text{kg C}$.

g_c kg de carbono necesitará $2,67 \text{ kg } O_2 / \text{kg C}$. $g_c \text{ kg C} / \text{kg de combustible}$.

$2,67 \cdot g_c$ kg de O_2 / kg combustible.

1-2) m^3 de O_2 / kg de combustible

12 kg de carbono necesitan $22,4 \text{ m}^3$ de oxígeno

1 kg de carbono necesitará $22,4 / 12 \text{ m}^3$ de O_2 / kg de carbono

g_c kg de carbono necesitará $22,4 / 12 \text{ kg } O_2 / \text{kg C}$. $g_c \text{ kg C} / \text{kg combustible}$.

$1,867 \cdot g_c \text{ m}^3 O_2 / \text{kg de combustible}$

1-3) kg CO_2 / kg combustible:

12 kg de carbón produce 44 kg de CO_2

1 kg de carbono produce $44/12 \text{ kg } CO_2/\text{kg C}$

$G_c \text{ kg C/kg Comb. Produce } 44/12 \text{ kg } CO_2/\text{kgC}$. $g_c \text{ kg C/kg Combustible}$,

Se obtendrá.... $3,67 \cdot g_c \text{ kg } CO_2/\text{kg combustible}$.

1-4) $m^3 CO_2/\text{kg combustible}$.



12 kg de carbono produce 22,4 m³ de CO₂

1 kg de carbono produce 22,4/12 m³ de CO₂/ kg de carbono.

g_c kg C/kg combustible producen 22,4/12 m³ de CO₂/ kgC .g_c kg C/kg combustible.

Se obtendrá: 1,867 g_c m³ CO₂/ kg Combustible.

1-5) Kg CO₂/ kg O₂

32 kg O₂ produce 44 kg de CO₂

1 kg O₂ produce 44/32 kg de CO₂/kg de O₂

g_{O2} kg O₂/ kg combustible producirá 1 m³ CO₂/ kg combustible

Se obtendrá: 1,375 g_{O2} kg CO₂/ kg combustible

1-6) m³ CO₂/ m³ O₂

22,4 m³ O₂ produce 22,4 m³ de CO₂

1 m³ O₂ produce 22,4/22,4 m³ CO₂/ m³ O₂

g_{O2} kg O₂/ kg combustible producirá 1 m³ CO₂/ m³ O₂. g_{O2} kg O₂/ kg combustible

Se obtendrá: 1 g_{O2} kg CO₂/ kg combustible.

1-7) Kg de aire / kg combustible

2,67. g_c Kg O₂/kg Combustible 1/0,23 kg O₂/Kg de aire.

Se necesitará: 11,6. g_c Kg aire / kg combustible.

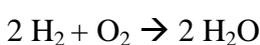
1-8) m³ de aire / kg de combustible

1,867. g_c m³ O₂/kg combustible. 1/0,21 m³ O₂/ m³ de aire.

Se necesitará: 8,89 g_c m³ de aire / kg de combustible.

Procediendo de la misma manera con las ecuaciones químicas estequiométricas del hidrógeno, Azufre y/o cualquier otro elemento que indique el análisis elemental del combustible, tendremos:

Para el Hidrógeno:





Se necesitará: $8 \text{ g}_h \text{ kg}$ de oxígeno/ kg de combustible

Se necesitará: $5,6 \text{ g}_h \text{ m}^3$ de oxígeno/ kg de combustible

Se obtendrá: $9 \text{ g}_h \text{ kg}$ de Agua/ kg de combustible

Se obtendrá: $11,2 \text{ g}_h \text{ m}^3$ de agua / kg de combustible

Se necesitará: $34,78 \text{ g}_h \text{ kg}$ de aire / kg de combustible

Se necesitará: $26,67 \text{ g}_h \text{ m}^3$ de aire / kg de combustible

Nota: si el análisis elemental indica la existencia de Oxígeno, el mismo proviene del agua de composición, es decir, el que se encuentra combinada con Hidrogeno en la estructura del combustible. Por lo tanto, el Hidrogeno que se combinara con el oxígeno del aire será menor que el que indica el análisis, y su valor resulta de:



16 kg O_2 se combina con 2 kg H_2

$\text{g}_{\text{O}_2} \text{ kg } \text{O}_2 / \text{kg combustible}$ se combinará con $2 / 16 \text{ g}_{\text{O}_2} \text{ kg } \text{H}_2 / \text{kg}$

combustible; luego cada Oxígeno estará combinado con $\text{g}_{\text{O}_2} / 8 \text{ kg } \text{H}_2 / \text{kg combustible}$.

Es decir que el hidrogeno que se combinará con el Oxígeno del aire será:

$\text{g}_h - \text{g}_{\text{O}_2} / 8 = \text{g}_{\text{hd}} = \text{Hidrogeno disponible}$.

Lo anterior indica que en las ecuaciones vistas anteriormente se debe trabajar con el hidrogeno disponible. Ahora bien, si el % de O_2 que indica el análisis es de cierta importancia se deberá tener en cuenta el % de agua de composición química, que también pasara a los gases de combustión o humos. La correspondiente ecuación estequiométrica indica:

16 kg O_2 produce 18 kg H_2O

1 kg de O_2 producirá $18/16 = 1,125 \text{ kg } \text{H}_2\text{O} / \text{kg } \text{O}_2$

$\text{g}_{\text{O}_2} \text{ kg } \text{O}_2 / \text{kg combustible}$ producirá $1,125 \text{ g}_{\text{O}_2} \text{ kg } \text{H}_2\text{O} / \text{kg combustible}$.

En este caso, en los cálculos respectivos se deberá considerar el agua de composición química más el de humedad (higroscópica)

$$\text{g}_{\text{wt}} = \text{g}_{\text{whum}} + \text{g}_{\text{wc.qui}} = \text{g}_w + 1,125 \text{ g}_{\text{O}_2}$$

En bibliografía existente sobre el tema, algunos autores trabajan con lo que denominan “composición corregida”, que consiste en convertir el oxígeno de composición química en “agua de humedad”, y trabajar con el hidrogeno disponible. Supongamos por ejemplo, que el análisis elemental indica la siguiente composición gravimétrica:



$$g_c = 74,5 \%$$

$$g_h = 7 \%$$

$$g_{O_2} = 12 \%$$

$$g_s = 0,5 \%$$

$$g_w = 6 \%$$

El agua de composición será:

$$g_{wc,qui} = 1,125 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg combustible} \times 12 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg combustible}$$

$$= 13,5 \% \text{ de H}_2\text{O} / \text{kg combustible}$$

Luego $g_{wt} = 6 \% + 13,5 \% = 19,5 \%$

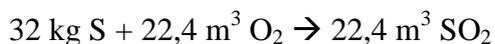
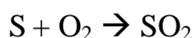
El Hidrogeno disponible que se combinara con el oxígeno del aire será:

$$g_{hd} = g_h - g_{O_2} / 8 = 7 - 12/8 = 5,5 \%$$

Con estos valores la composición gravimétrica corregida será:

COMPOSICIÓN SEGÚN ANÁLISIS	COMPOSICIÓN CORREGIDA
$g_c = 74,5 \%$	$g_c = 74,5 \%$
$g_h = 7 \%$	$g_h = 5,5 \%$
$g_{O_2} = 12 \%$	$g_{O_2} = --$
$g_s = 0,5 \%$	$g_s = 0,5 \%$
$g_w = 6 \%$	$g_w = 19,5 \%$
$= 100 \%$	$= 100 \%$

Para el Azufre:



Se necesitará: g_s kg de oxígeno/ kg de combustible

Se necesitará: $0,7 g_s m^3$ de oxígeno/ kg de combustible

Se obtendrá: $2 g_s$ kg SO_2 / kg de combustible

Se obtendrá: $0,7 g_s m^3$ SO_2 / kg de combustible



Se necesitará: 4,35 g_s kg de aire / kg de combustible

Se necesitará: 3,34 g_s m³ de aire / kg de combustible

La cantidad teórica o mínima de aire a suministrar resultara de la sumatoria de la necesaria para cada elemento que constituya el combustible, indicado por el análisis elemental. Si en el cálculo se utilizan fórmulas que trabajan con el total de hidrogeno, se deberá restar el correspondiente al del oxígeno. Por tal motivo, siempre es preferible utilizar la que trabaja con el hidrogeno disponible, sustituyendo:

$$g_h \text{ por } g_{hd} = g_h - g_{O2} / 8$$

Con ésta aclaración tendremos:

$$G_{t \text{ aire}} = 11,6 g_c + 34,78 g_{hd} + 4,35 g_s \text{ (kg de aire / kg de combustible)}$$

$$V_{t \text{ aire}} = 8,89 g_c + 26,27 g_{hd} + 3,34 g_s \text{ (m}^3 \text{ de aire / kg de combustible)}$$

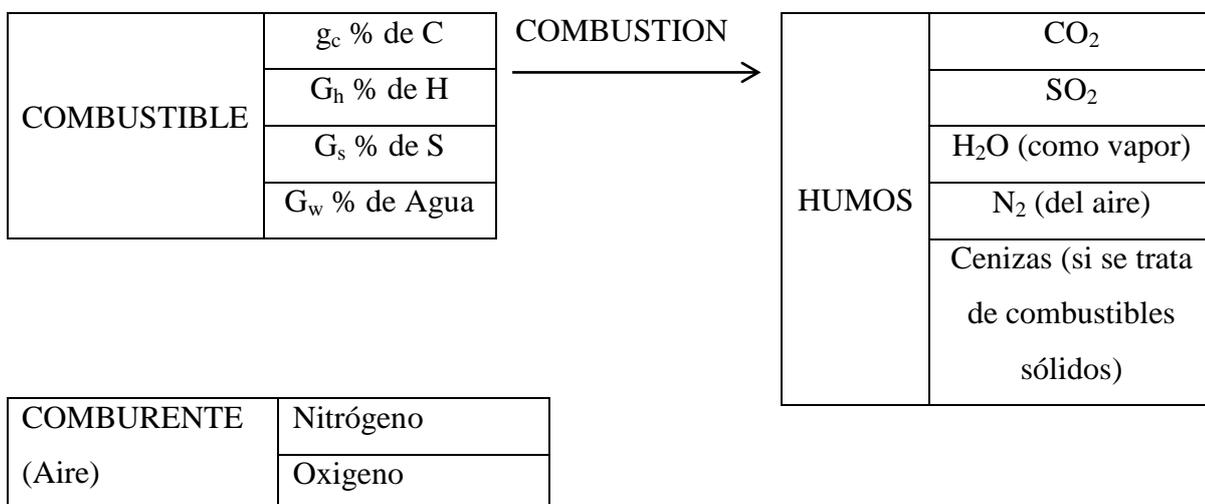
En la práctica para asegurar que la combustión sea lo más perfecta posible, se trabaja con un exeso de aire, es decir que será:

$$V_{R \text{ aire}} = V_{t \text{ aire}} + e. V_{t \text{ aire}} = (1 + e) V_{t \text{ aire}} \text{ (m}^3 \text{ aire / kg de combustible)}$$

2-8-2) GASES DE COMBUSTION O HUMOS

Están formados por los productos de oxidación de los distintos elementos que constituyen el combustible más vapor de agua, proveniente del agua de composición química e higroscópica (agua de humedad).

Supongamos que tenemos un combustible que posee carbono, hidrogeno, azufre, y se encuentra al estado húmedo. El análisis elemental indicará:





Tendremos:

a) kg de humos / kg de combustible:

$$g_h \text{ (kg humos / kg de combustible)} = g_{CO_2} + g_{H_2O} + g_{SO_2} + g_{N_2} + g_w =$$

$$g_h = 3,67 g_c + 9 g_{hd} + 2 g_s + 3,35 g_{ot} + g_w \text{ (kg humo / kg de combustible)} =$$

$$g_h = (3,67 g_c + 9 g_{hd} + 2 g_s) + 3,35 (2,67 g_c + 8 g_{hd} + g_s) + g_w \text{ (kg humo / kg de combustible)}$$

b) m³ humos / kg de combustible

$$V_h \text{ (m}^3 \text{ humos / kg de combustible)} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_w$$

Ahora bien:

18 kg de H₂O ocupan 22,4 m³

g_w kg de H₂O ocuparán $22,4/18$ (m³/kg H₂O). g_w (kg H₂O/kg combustible)

Luego:

$$V_w \text{ (m}^3 \text{ H}_2\text{O / kg de combustible)} = 22,4/18 \text{ (m}^3 \text{ H}_2\text{O / kg H}_2\text{O)} \cdot g_w \text{ (kg H}_2\text{O/kg combustible)} = 1,24 \cdot g_w \text{ (m}^3 \text{ H}_2\text{O / kg combustible)}$$

A su vez:

$$V_{N_2} = 79 \text{ m}^3 \text{ de N}_2/21 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \cdot V_{OT} \text{ (m}^3 \text{ O}_2 \text{ / kg combustible)}$$

$$= 3,76 \cdot V_{OT} \text{ (m}^3 \text{ N}_2 \text{ / kg combustible)}$$

Resulta:

$$V_h \text{ (m}^3 \text{ humos/ kg Combustible)} = (V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2}) + 3,76 V_{OT} + 1,24 g_w$$

$$V_h \text{ (m}^3 \text{ humos/ kg Combustible)} = (1,867 g_c + 11,2 g_{hd} + 0,7 g_s) + 3,76 (1,867 g_c + 5,6 g_{hd} + 0,7 g_s) + 1,24 g_w$$



El peso de combustible también se puede calcular en base a la siguiente relación:

$$\text{COMBUASTIBLE} + \text{AIRE} = \text{HUMOS} + \text{CENIZAS}$$

De donde:

$$\text{HUMOS} = \text{COMBUSTIBLE} + \text{AIRE} - \text{CENIZAS}$$

que da valores concordante con lo que ocurre en la practica

2-8-3) DETERMINACION DEL COEFICIENTE DEL EXESO DE AIRE EN DETERMINADOS MOMENTOS DE LA COMBUSTION

El coeficiente de exceso de aire en determinado momento de la combustión se puede determinar en base a un análisis de los humos. Esta determinación tiene su importancia ya que si el exceso de aire es excesivo, se perderá energía en forma de calor para calentar el excedente. El análisis lo podemos realizar utilizando por ejemplo el APARATO DE ORSAT. Al efecto del cálculo designaremos:

g_h (kg de gases húmedos/ kg de combustible)	G_{AT} (kg de aire teórico / kg de combustible)
e (coeficiente de exceso de aire)	g_s (kg gases secos/ kg de combustible)
g'_s (kg gases secos / kg carbono)	g_c kg de carbono / kg de combustible)
g''_s (kg gases secos / kmol combustible)	g'_c (kg carbono / kmol combustible)
μ (masa molecular) (kg/kmol)	r = composición volumentrica

Podemos establecer las siguientes relaciones:

$$g_h \left(\frac{\text{kg gases humedos}}{\text{kg de combustible}} \right) = 1 \left(\frac{\text{kg productos}}{\text{kg de combustible}} \right) + e \cdot G_{AT} \left(\frac{\text{kg de aire teorico}}{\text{kg de combustible}} \right)$$



De donde: $e = \frac{g_h^{-1}}{G_{AT}}$

Podemos establecer así las siguientes relaciones

$$g_h \left(\frac{\text{kg de gases humedos}}{\text{kg de combustible}} \right) = g_s \left(\frac{\text{kg humos secos}}{\text{kg de combustible}} \right) + g_w \left(\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de combustible}} \right)$$

$$g_s \left(\frac{\text{kg de humos secos}}{\text{kg de combustible}} \right) = g'_s \left(\frac{\text{kg humos secos}}{\text{kg de carbono}} \right) \cdot g_c \left(\frac{\text{kg de carbono}}{\text{kg de combustible}} \right)$$

$$g'_s \left(\frac{\text{kg de humos secos}}{\text{kg de carbono}} \right) = g''_s \left(\frac{\text{kg humos secos}}{\text{kg de combustible}} \right) \cdot \frac{1}{g'_c \left(\frac{\text{kg de carbono}}{\text{kg de combustible}} \right)}$$

Teniendo en cuenta que un kmol, en igualdad de condiciones de cualquier gas ocupa el mismo volume (22,4 m³) será también:

$$g_i = \mu_i \cdot r_i \quad (\text{kg de componente} / \text{kmol})$$

Podemos considerar que:

$$g''_s \left(\frac{\text{kg de humos secos}}{\text{kg de combustible}} \right) = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot r_i \left(\frac{\text{kg de humos secos}}{\text{kmol de combustible}} \right)$$

y

$$g'_c \left(\frac{\text{kg de carbono}}{\text{kg de combustible}} \right) = \sum_{i=1}^n \mu_c \cdot r_{ic} \left(\frac{\text{kg de carbono}}{\text{kmol de combustible}} \right)$$

Reemplazando y operando en las ecuaciones anteriores, será:



$$g'_s \left(\frac{\text{kg de humos secos}}{\text{kg de carbono}} \right) = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot r_i}{\sum_{i=1}^n \mu_c \cdot r_{ic}}$$

Resultando finalmente:

$$g_h \left(\frac{\text{kg de gases humedos}}{\text{kg de combustible}} \right) = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot r_i}{\sum_{i=1}^n \mu_c \cdot r_{ic}} \cdot \left(\frac{\text{kg de humos secos}}{\text{kg de combustible}} \right) \cdot g_c \left(\frac{\text{kg de carbono}}{\text{kg de combustible}} \right) + g_w \cdot \left(\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de combustible}} \right)$$

A su vez:

$$\sum_{i=1}^n \mu_c \cdot r_{ic} = \mu_c (r_{CO_2} + r_{CO})$$

$$g_w = 9 \cdot \left(\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg hidrogeno}} \right) \cdot g_{eh} \left(\frac{\text{kg de hidrogeno}}{\text{kg de combustible}} \right)$$

$$G_{at} = 11,6 g_c + 37,38 g_{hd} + 4,35 g_s$$

En las ecuaciones anteriores, r_i indica la composición volumétrica de los distintos componentes obtenidos en el análisis de los gases de combustión o humos.

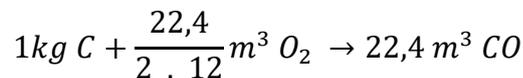
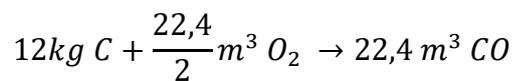
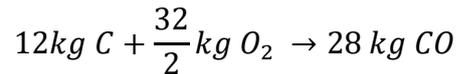
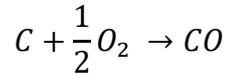
2-8-4) VOLUMEN DE LOS HUMOS EN LA COMBUSTION IMPERFECTA

En la práctica, principalmente cuando se utiliza un combustible sólido, la oxidación del total de carbono indicado por el análisis no llega al máximo, y como consecuencia de ello se forma CO (óxido ácido de carbono) que también pasa a los humos. En este caso el volumen total de humos secos vendrá dado por:

$$V_{ht} = V_{CO_2} + V_{CO} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V'_{O_2}$$

Donde V'_{O_2} = volumen de oxígeno no consumido (excedente) por trabajar con un exceso de aire.

De la ecuación de formación del CO tenemos:



Si designamos por "x" el % de CO₂ formado por kg de carbono será:

$$1 kg \text{ carbono} \left\{ \begin{array}{l} "x" kg \text{ de } CO_2 \\ (1-x) kg \text{ de } CO \end{array} \right\}$$

Luego si:

$$12 kg \text{ de carbono} \rightarrow 22,4m^3 \text{ de } CO$$

$$1 kg \text{ de carbono} \rightarrow \frac{22,4m^3 CO}{12 kg C} \cdot 1 kg C$$

$$(1-x) \cdot g_c \frac{kg C}{kg \text{ combustible}} \rightarrow \frac{22,4 m^3 CO}{12kg C} \cdot (1-x) \cdot g_c \left(\frac{kg C}{kg \text{ combustible}} \right)$$

Resulta:

$$V_{CO} \left(\frac{m^3 CO}{kg \text{ combustible}} \right) = 1,867 (1-x) \cdot g_c \left(\frac{m^3 CO}{kg \text{ combustible}} \right)$$

Al ser la combustión imperfecta, el volumen de oxígeno teórico o mínimos, se calculará por:

$$V_{ot} = 1,867x g_c + 0,7g_s + 5,6 g_{hd} + 0,93 (1-x)g_c$$



El volumen de oxígeno en exceso será igual al suministrado menos el consumido:

$$V'_{O_2} = V_{Osum} - V_{Ocons} = e \cdot V_{ot} - V_{Ocons}$$

El nitrógeno que no interviene en la reacción de oxidación, pasará a los humos en la proporción

$$V_{N_2} = \frac{79}{21} V_{Osum} = 3,76 V_{Osum}$$

Para una forma más genérica designaremos: $V_{ot} = a$ y $V_{ocons} = a'$

Luego el volumen total de los humos al estado seco será:

$$V_h \left(\frac{m^3 \text{ humos secos}}{kg \text{ de combustible}} \right) = 1,867 \cdot x \cdot g_c + 1,867 (1 - x) g_c + 3,76 V_{Osum} + e \cdot a - a'$$

El análisis de los humos indica su composición volumétrica $r_i = \frac{V_i}{V_t} \cdot \frac{m^3 \text{ comp}}{1 m^3 \text{ humos}}$

Por lo tanto:

$$r_{CO_2} + r_{CO} + r_{SO_2} + r'_{O_2} + r_{N_2} = 1 m^3 \text{ humos} = \frac{V_{CO_2}}{V_{ht}} + \frac{V_{CO}}{V_{ht}} + \frac{V_{SO_2}}{V_{ht}} + \frac{V_{O_2}}{V_{ht}} + \frac{V_{N_2}}{V_{ht}}$$

De la relación anterior podemos establecer:

$$\frac{r'_{O_2}}{r_{N_2}} = \frac{\frac{V'_{O_2}}{V_{ht}}}{\frac{V_{N_2}}{V_{ht}}} = \frac{V'_{O_2}}{V_{N_2}} \text{ y de la misma manera } \frac{r'_{O_2}}{r'_{CO}} = \frac{V'_{O_2}}{V_{CO}}$$

Reemplazando en las relaciones anteriores el valor de los volúmenes determinados por las ecuaciones deducidas anteriormente, y operando, se llega a la siguiente expresión:



$$e = \frac{1}{\left(1 - \frac{79}{21}\right) \left(\frac{r'_{O_2} - \frac{1}{2}r_{CO}}{r_{N_2}}\right)}$$

Si la oxidación es máxima se formara únicamente CO₂ y será el máximo posible de obtener.

$$[r_{CO_2}]_{max} = [\%_{CO_2}]_{max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{ht}}$$

Reemplazando valores y operando se llega a:

$$[r_{CO_2}]_{max} = [\%_{CO_2}]_{max} = \frac{1}{\left(100 + 79 \cdot \frac{3hd}{g_c}\right)}$$

Cuando ello ocurre el oxígeno consumido será también el máximo:

$$[\%_{O_2}]_{max} = \frac{1}{2 \left(100 + 79 \cdot \frac{3hd}{g_c}\right)}$$

Cuando la oxidación no es máxima quedara oxígeno no consumido del mínimo o teórico suministrado, es decir, el CO₂ producido será menor al máximo y su valor viene dado por:

$$r_{CO_2} = [\%_{CO_2}]_h = \frac{21}{(100 \cdot e - 21) \left(1 + \frac{3hd}{g_c}\right) + 21}$$

2-8-5) DIAGRAMA TRIANGULAR O DE OSWALD.

En la práctica es de suma importancia determinar en forma rápida el exceso de aire en un determinado momento de proceso de combustión, a fin de establecer si su valor no es incorrecto de acuerdo al combustible utilizado, características del hogar, etc. Ello se puede realizar en base a los datos obtenidos en un análisis de humos y recurriendo al denominado diagrama triangular o de Oswald. Este diagrama lleva



acotado en sus ordenadas el % de CO₂, en abscisas el oxígeno O₂ y en el plano rectas inclinadas de exceso de aire. Para su trazado se procede de la siguiente manera:

- 1) Se toma en ordenada (en una determinada escala) un valor máximo del 21%, que se considera es el disponible en el aire atmosférico (comburente).
- 2) Se calcula el CO₂ MAX que corresponde a todo el anhídrido el formado cuando la combustión es completa, por la ecuación:

$$[r_{CO_2}]_{max} = [\%_{CO_2}]_{max} = \frac{1}{\left(100 + 79 \cdot \frac{3hd}{g_c}\right)}$$

El valor obtenido se toma en ordenadas y luego se une con el representativo del 21% O₂ obteniendo de esta manera el triángulo de OSTWALD.

- 3) Se calcula los valores de CO₂ para distintos valores del coeficiente de exceso de aire, utilizando:

$$r_{CO_2} = [\%_{CO_2}]_h = \frac{21}{(100 \cdot e - 21) \left(1 + \frac{3hd}{g_c}\right) + 21}$$

- 4) Se determina el máximo de O₂ utilizado para obtener el máximo de CO₂, por

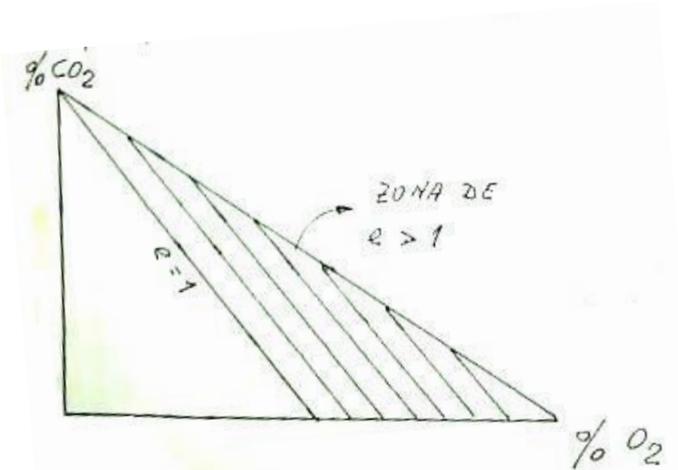
$$[\%_{O_2}]_{max} = \frac{1}{2 \left(100 + 79 \cdot \frac{3hd}{g_c}\right)}$$

5) Se toma el valor del $[\%_{O_2}]_{max}$ en la abscisa y se lo une con el correspondiente a $[\%_{CO_2}]_{max}$, obteniéndose la llamada LINEA de aire e = 1

6) Se toma sobre la hipotenusa del triángulo los valores calculados en 3), y por los mismos se trazan rectas paralelas a las línea de aire (e = 1)



Trazando el diagrama, el valor de "e" se obtiene en base a los de CO₂ y de O₂, obtenidos en el análisis de humos.



2-8-6) PODER CALORÍFICO DE UN COMBUSTIBLE INDUSTRIAL:

Se define como PODER CALORIFICO SUPERIOR, de una sustancia, a la cantidad de energía en forma de calor que se desprende en la combustión completa de la unidad de peso o de volumen de la misma, cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- 1) Cuando la temperatura es de 20 ° C. antes y después de la combustión.
- 2) Cuando los productos de la combinación del carbono y del azufre se encuentran por completo al estado gaseoso y en forma de anhídrido carbónico y sulfuroso respectivamente, y sin que el nitrógeno se haya oxidado.
- 3) Cuando el agua que posea el combustible antes de la combustión (agua de composición química y de humedad) y la forma durante la combustión se encuentran al estado líquido, después de la combustión.

Se denomina PODER CALORIFICO INFERIOR de una sustancia a la cantidad de energía en forma de calor que se desprende en la combustión completa de la unidad de peso o de volumen de la misma, cuando se cumplen las condiciones 1) y 2) indicadas anteriormente y además cuando el agua que posea el combustible antes de la combustión (agua de composición química y de humedad) y la formada durante la combustión se encuentra al estado vapor modificación durante la combustión se encuentra al estado de vapor una vez finalizada la misma.



Durante el proceso de combustión (oxidación exotérmica) se produce agua debido a la oxidación del hidrogeno que posee el combustible, que pasa a los gases de combustión o humos como vapor de agua. A la cantidad resultante debe agregarse el vapor proveniente del agua de composición química y de humedad (higroscópica) del combustible. El proceso de vaporización del total resultante (agua de composición química + agua de humedad + agua modificada durante la combustión) requiere una cierta cantidad de energía en forma de calor, que se toma del producido durante la combustión (600 Kcal / Kg). Como consecuencia de ello el calor utilizable para otros fines es el indicado por el poder calorífico superior menos el necesario para vaporizar el total de agua indicado anteriormente, y que constituye el poder calorífico inferior, y es el que realmente interesa. Su valor resultante de:

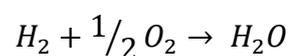
$$H_i = H_s \text{ (Kcal / kg)} - 600 \text{ (kcal / kg) de agua} \cdot g_{wt} \text{ kg de agua / kg de combustible}$$

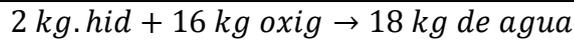
Siendo g_{wt} = el total de agua que pasa a los humos como vapor. Por lo tanto $600 \cdot g_{wt}$ representa la energía en forma de calor que se pierde. Esta situación debe tenerse presente al analizar el valor del poder calorífico superior, ya que por definición del mismo, todo el agua debe encontrarse al estado líquido, es decir, el vapor se ha condensado cediendo las 600 Kcal / Kg de un combustible indica el porcentaje de sus componentes, incluido el oxígeno del agua de composición química y eventualmente el oxígeno libre que pudiera contener el combustible. Este porcentual de oxígeno presente en el combustible antes de la combustión, se combina con la parte del hidrógeno indicado por el análisis. Por lo tanto, el hidrógeno que interviene en la reacción química de oxidación con el oxígeno del aire es menor. Esta circunstancia debe tenerse presente, no solo para calcular el Poder Calorífico Superior, sino también para determinar el aire mínimo o teórico para el proceso de combustión. Ello puede realizarse de dos maneras:

- restando el porcentual indicado en el análisis en las formulas respectivas.
- O, trabajando con el llamado "hidrogeno disponible" que se obtiene por:

$$g_{hd} \text{ (kg de hid. disp/kg de combust)} = g_h - \frac{g_{ox}}{8}$$

Donde g_h = porcentual de hidrogeno y g_{ox} = porcentual de oxigeno indicado por el análisis elemental, y que resulta de lo siguiente:





Ello indica que si:

16 kg de oxig. $\xrightarrow{\text{Necesitan}}$ 2 kg de hidrog.

$$g_{OX} \text{ kg de } \frac{O_2}{g_k} \text{ comb.} \xrightarrow{\text{Necesitaran}} g_{OX} \cdot 2/16 = \frac{g_{OX}/8 \text{ kg de hid}}{kg} \text{ de combustible}$$

Todo lo mencionado anteriormente, lleva a que existan diversas expresiones matemáticas para calcular el Poder Calorífico Superior. Así, algunos autores utilizarán el total del hidrógeno porcentual indicado por el análisis y restan el porcentual de oxígeno. Otros en cambio operan con el hidrógeno disponible. En general podemos establecer que el Poder Calorífico Superior es la sumatoria de los productos del calor de reacción exotérmica por la composición gravimétrica de cada uno de los componentes / componentes indicados por el análisis elemental:

$$H_S \left(\frac{kcal}{kg} \text{ de comb} \right) = \sum_{i=1}^n g_i \cdot q_{ri}$$

Dónde:

g_i = Composición gravimétrica de cada componente indicada por el análisis.

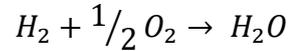
q_{ri} = Calor de reacción exotérmica de cada componente.

También tener en cuenta que algunos autores consideran que toda el agua indicada posteriormente se encuentra al estado líquido (condensada) y otros como vapor, por lo tanto antes de aplicar una fórmula, se deberá aclarar en qué estado se considera al agua.

Así por ejemplo, la expresión indicada por la Asociación de Técnicos Alemanes (V.D.I.) es la siguiente:

$$H_S = 8080 \cdot C + 29000 \left(h - \frac{O}{8} \right) + 2500 S$$

Pero aclaro que toda el agua se encuentra al estado de vapor. El valor 29000 resulta de lo siguiente:



$$2 \text{ kg. hid} + 16 \text{ kg oxig} \rightarrow 18 \text{ kg de agua}$$

Luego si:

$$2 \text{ kg. hidro.} \rightarrow 18 \text{ kg de agua}$$

$$1 \text{ kg. hidro.} \rightarrow \frac{18}{2} = 9 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de hidrogeno}}$$

La cantidad de calor necesaria para vaporizar esta cantidad de agua será:

$$Q_v \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \text{ de agua} \right) = 600 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \text{ de agua} \cdot 9 \text{ kg de agua} / \text{kg de hidrog.} = 5400 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \text{ de hidrog.}$$

El calor de reacción liberado por la oxidación del hidrogeno, con el agua formada al estado líquido es 34400 kcal/ kg de hidrogeno. Como en la fórmula del VID, se considera el agua formada al estado de vapor, gastándose 600 Kcal/kg de agua, resulta:

$$29000 = 34400 - 5400$$

Es decir dicha fórmula indica directamente el Poder Calorífico Inferior. Si el análisis indica un porcentual de humedad, la expresión mencionada indica el Poder Calorífico Superior y se le debe restar el 600 g_w, siendo g_w el porcentual de humedad. Es decir, será:

$$H_I \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \text{ de combustible} \right) = H_S - 600 g_w$$



Por tal motivo y para evitar cometer errores, si se omite las consideraciones anteriores, puede ser conveniente utilizar las siguientes expresiones para determinar el Poder calorífico superior e inferior:

$$H_S = 8080 \frac{\text{kcal}}{\text{kg C}} \cdot g_C \frac{\text{kg C}}{\text{kg comb}} + 34400 \frac{\text{kcal}}{\text{kg H}} \cdot g_H \frac{\text{kg } h_a}{\text{kg comb}} + 2500 \frac{\text{kcal}}{\text{kg S}} \cdot g_S \frac{\text{kg S}}{\text{kg comb}}$$

$$H_I = H_S - 600 \frac{\text{kcal}}{\text{kg Agua}} \cdot \left(g_w \frac{\text{kg Agua}}{\text{kg comb}} + 9 \frac{\text{kg Agua}}{\text{kg H}} \cdot g_H \frac{\text{kg } h_a}{\text{kg comb}} \right)$$

Valores más exactos del PODER CALORÍFICO de un combustible industrial se obtienen por ensayos cuya forma de realizarlos, según se trate de un combustible sólido, líquido o gaseoso, y los dispositivos a utilizar están establecidos por normas, utilizándose a tal efecto en nuestro país las NORMAS IRAM.

2-8-7) ANALISIS Y CONTROL DE LA COMBUSTION

Desde el punto de vista económico, el proceso de combustión debe realizarse en la forma lo más perfecta (máximo de oxidación) y completa (queme todo el combustible) posible. En la práctica esto no ocurre, incluso cuando se trabaja con exceso de aire, que también tiene su límite. En efecto un exceso de aire demasiado elevado provoca disminución de los humos (1) (se debe gastar energía en forma de calor para calentarlo), que reduce la transmisión de calor por unidad de superficie de intercambio calórico. de la energía en forma de calor... Por tal motivo el proceso de combustión se debe regular actuando sobre otros factores que concurren al proceso (estado físico del combustible, humedad, temperatura del aire insuflado al hogar, etc.). Para actuar sobre los mismos es necesario determinar la composición de los humos en porcentaje volumétricos de CO₂; O₂ y CO.

Si bien en la actualidad existen instrumentos de medición portátiles, que indican en forma rápida el porcentaje de CO₂ ; O₂ ; CO e inclusive exceso de aire y eficacia de la combustión, todavía es de uso el ANALIZADOR DE GASES DE ORSAT, que es en términos generales consistente (se estudiara con más detalle en la parte práctica) en una bureta de medición, con camisas de agua y escala graduada de



medición y tres pipetas de absorción de 50 cm³ de capacidad que de derecha a izquierda contienen: las dos primeras virutas de acero donde se retiene el CO y O₂ respectivamente y la tercera viruta de cobre para la absorción del CO. Durante el ensayo se observa primero el CO₂ luego el O₂ y finalmente el CO.

Si la bureta de medición, después de cada absorción indica respectivamente:

Anhídrido carbónico (CO₂)....18 %

Oxígeno (O₂).....22 %

Oxido de Carbono (CO).....22,8 %

El resultado del análisis será:

CO₂.....18 %

O₂..... (22-18) 4 %

CO..... (22,8-22) 0,8 %

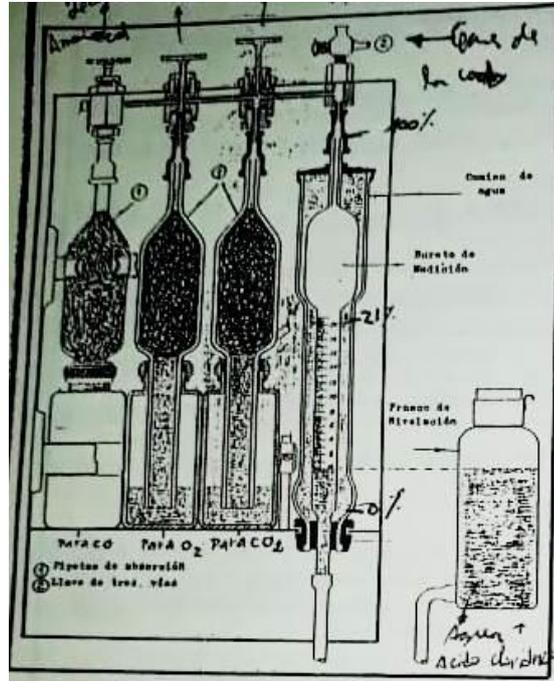
2-8-8) PUNTO DE ROCÍO:

Si los humos húmedos, se enfrían manteniéndose constante la presión parcial del vapor de agua presente en el mismo, llega un determinado momento (temperatura de saturación función de la presión de trabajo), en que el vapor se condensa. La temperatura a la que ello ocurre se denomina TEMPERATURA O PUNTO DE ROCIO.

La condensación del vapor puede producir algunos o todos, de los siguientes efectos negativos, sobre todo en los recuperadores de calor:

- a) Oxidación del materia (principalmente los tubos) constitutivos de los mismos.
- b) Efectos corrosivos, por acción de los ácidos que forman los anhídridos sulfuroso y sulfúrico, presente en los humanos al disolverse en el agua depositada sobre las superficies metálicas.
- c) Depósito y solidificación de cenizas sobre las paredes de los tubos, disminuyen el coeficiente total de transmisión de calor y consecuentemente el efecto de enfriamiento, con la consiguiente oxidación y rotura posterior (picaduras de los tubos de la superficie de calefacción) del material.

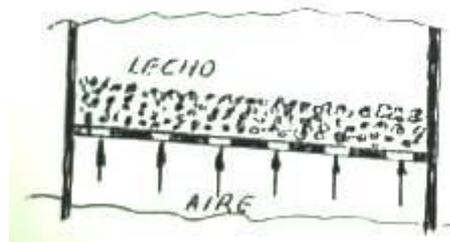
Esta situación debe ser tenida en cuenta a fin de arbitrar las medias necesarias para que la temperatura de los humos no sea inferior a la correspondiente al "punto de rocío" de vapor de agua en las condiciones de trabajo.



2-8-9) COMBUSTION FLUIDIFICADA:

Si sobre un soporte metálico (plancha perforada o barras separadas convenientemente) depositamos un material sólido pulverizado a determinada granulometría, y hasta alcanzar una cierta altura preestablecida, se obtiene lo que técnicamente se denomina LECHO.

Si una vez formado el mismo, insuflamos un gas (normalmente aire) por su parte inferior, cuya velocidad de desplazamiento se aumenta en forma progresiva, se llegará a un estado en el cual las partículas de material depositado son empujadas hacia arriba por el flujo ascendente del gas.



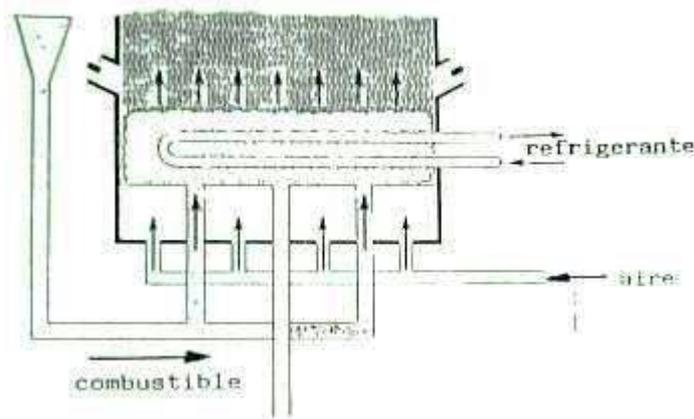
Como consecuencia de ello se forman burbujas gas-material, similar a lo que ocurre en un líquido en ebullición. Cuando se llega a estas condiciones se dice que el lecho está "fluidificado o fluidizado", que en



general se comporta como un líquido buscando su nivel de equilibrio y correspondiente altura hidrostática.

El proceso descrito anteriormente constituye el principio de la denominación "COMBUSTION FLUIDIFICADA". El lecho en este caso se forma con un material Inerte (que permanece estable, es decir, no varía sus características), utilizándose normalmente piedra calizada (carbonato de calcio) de una determinada granulometría, que tiene la propiedad de absorber el anhídrido sulfuroso (SO_2), que se forma en la combustión.

Una vez formado el lecho, se comienza el proceso inyectando aire por debajo del mismo, a fin de elevar las partículas del material inerte y aportando calor a través de quemadores de un combustible líquido. Cuando la temperatura de las partículas llega a $\approx 450\text{ }^\circ\text{C}$, se inyecta el combustible a utilizar (sólido pulverizado; líquido o gaseoso). A medida que aumenta la temperatura del lecho, se incrementa la velocidad de inyección del combustible en el lecho fluidizado incandescente. El combustible es bombardeado por las partículas inertes produciendo su inflamación y posterior combustión. Cuando la temperatura llega a $700\text{-}750\text{ }^\circ\text{C}$, se apagan los quemadores. La masa del lecho actúa, por lo tanto, como un acumulador térmico cuya temperatura de régimen se regula entre $750\text{ a }950\text{ }^\circ\text{C}$, dependiendo su valor de las características del combustible utilizado. La regulación de la temperatura dentro de los valores indicados tiene por finalidad: eliminar al máximo la formación de escoria, reducir la volatilización de las sales alcalinas y favorecer la reacción del dióxido de azufre (SO_2) con el carbonato de la piedra caliza.



Para mantener la temperatura dentro del rango indicado se coloca en el interior del lecho tubos por el interior de los cuales se hace circular un refrigerante, pudiendo utilizar a tal efecto, agua, aire o vapor.



Como alternativa se puede trabajar con un exceso de aire mayor que el requerido por la combustión. El lecho puede trabajar a presión atmosférica (lechos atmosféricos) o un valor mayor (lecho presurizado).

Entre las ventajas que se pueden obtener con un "lecho fluidificado", podemos mencionar las siguientes:

- a) Se logra una mayor eficiencia, que trabajando con los equipos convencionales (soportes de parrilla o quemadores)
- b) Permite utilizar combustibles sólidos de bajo poder calorífico y mucho porcentaje de cenizas.
- c) Se lo puede utilizar como una unidad de "doble combustión" quemando si fuera necesario, por ejemplo un combustible sólido (carbón pulverizado) o líquido (fuel oil).
- d) puede utilizarse combustibles con elevados porcentajes de azufre, ya que se retiene el SO_2 formado en la piedra caliza, y luego son eliminados a la atmósfera como sulfato de calcio.

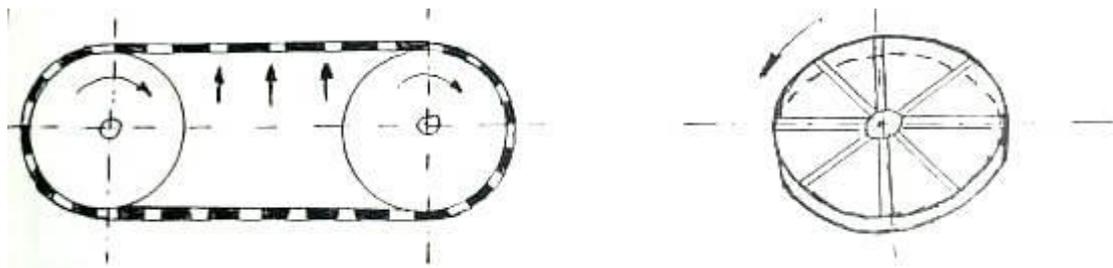
2-8-10) EQUIPOS DE COMBUSTION:

Como ya mencionamos anteriormente se deben arbitrar los medios necesarios, sobre todo teniendo en cuenta el aspecto económico, para que el combustible lo más perfecto y completo posible. Para esto no solo es necesario trabajar con la cantidad de aire necesaria, sino lograr una mezcla íntima entre combustible y comburente. Para la combustión de combustibles industriales sólidos, es necesario además de su preparación previa (granulometría, % de humedad, etc) disponer en el hogar (lugar donde se realiza la combustión) soportes del combustible denominados comúnmente parrillas o emparrillados, que exige un determinado tipo de construcción. Desde este punto de vista es menos complicada la combustión de líquidos y gases, ya que directamente utilizan equipos compactos denominados quemadores.

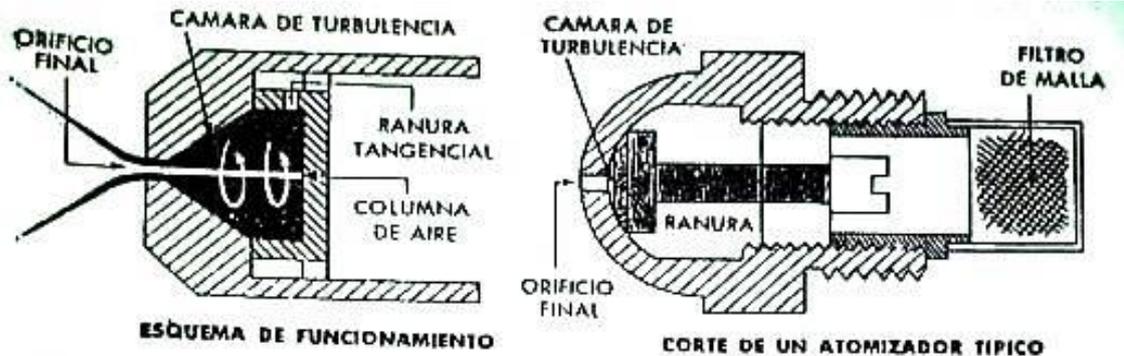
10-a) Combustión de sólidos: El emparrillado para la combustión de sólidos, puede ser fijo o móvil, accionados mecánicamente. Las parrillas fijas, en su forma más simple están constituidas por soportes transversales de suficiente robustez, sobre los cuales se apoyan longitudinalmente planchas o barras dominadas comúnmente barrotes. Las mismas se construyen normalmente, por su menor costo en fundición, resistente al calor, y son de sección trapezoidal, es decir de menor espesor en su parte inferior, para facilitar la salida de las cenizas. En sus extremos superiores tiene a uno o ambos lados salientes, que se los denomina cabeza de parrilla, cuya finalidad es que al colocarlas sobre los soportes dejen un cierto espacio libre que además de dejar salir las cenizas, permite la entrada de aire necesario para la combustión.



Las parrillas mecánicas pueden ser giratorias o estar constituidas por una cinta horizontal móvil. Cualquiera sea el tipo de parrilla, se limita el extremo opuesto a la carga con una pared de material refractario denominado ALTAR.



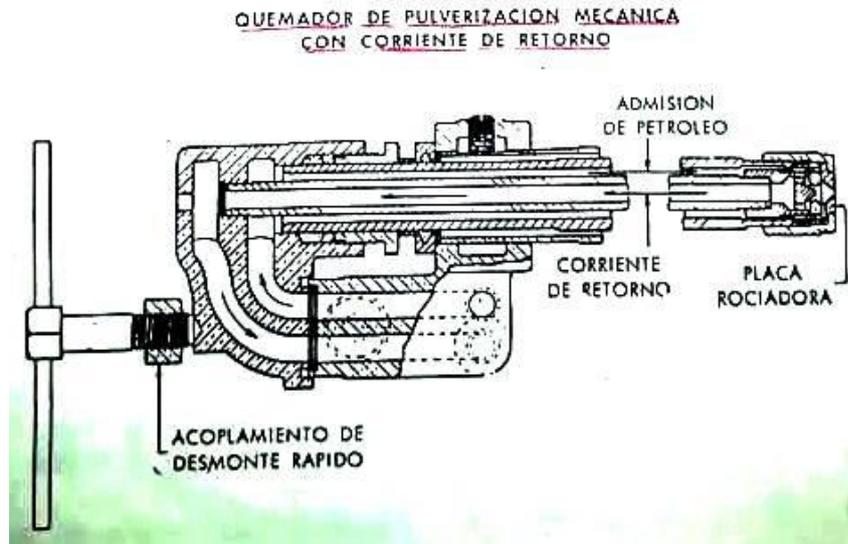
10-b) Combustión de líquidos: Los combustibles líquidos (al igual que los gaseosos ofrecen, en lo que equipo de combustión se refiere, menor dificultad que los sólidos, para su combustión, ya que su preparación se reduce a un calentamiento para lograr una viscosidad adecuada y luego lograr íntimo contacto entre combustible y comburente. Los dispositivos que se utilizan para lograr esta última acción se denominan quemadores. Los mismos pulverizan o atomizan el combustible, dividiéndolo en numerosas gotitas (la suma de sus superficies de contacto, es más o menos 2000 veces mayor que el estado líquido, para lograr íntimo contacto con el comburente (aire), a efectos que primero se producen su calentamiento, luego su inflamación y combustión, y prosiga esta última sin inconvenientes. Es condición que las partículas del combustible subdividido sean de igual tamaño, ya que si esto no ocurre, las gotas de tamaño mayor, no se vaporizan completamente, y no queman en forma completa. Cualquiera sea el tipo de quemador utilizado, atomizan el líquido a una presión mayor que la atmosférica y lo inyectan al hogar en forma turbulenta con un envoltura del comburente.



En términos generales, los elementos básicos que especifican un quemador de un combustible líquido son los siguientes:

1) Atomizador o pulverizador: que divide a la masa líquida en pequeñas partículas formando una neblina que se inyecta a la cámara de combustión, de tal manera que se adopte a su contorno, sin dejar espacios muertos o inactivos, pero sin chocar con las paredes, ya que si esto ocurre se producirá su condensación, y no se combustiona. Según como se logra la atomización, se los clasifica en mecánicos y de mezcla.

1-a) Mecánicos: El combustible a presión atraviesa un pequeño orificio, liberando energía que provoca una expansión brusca de la vena líquida pulverizándola. La parte fundamental de un pulverizador mecánico, lo que constituye el pico pastilla o placa rociadora, que posee ranuras helicoidales (2 a 6), por las cuales circula el combustible a presión adquiriendo un movimiento giratorio, a medida que se desplaza en el interior de una cámara de forma cónica, adquiriendo una velocidad creciente a medida que disminuye la sección de pasaje para salir finalmente por un orificio central. Y por estar sometido a una fuerza de inercia axial y otra radial, se pulveriza en forma cónica en la cámara de combustión. El cuerpo donde se coloca la pastilla pulverizadora se denomina "langa" y puede ser sin o con retorno de líquido, permitiendo esta última una mejor regulación del flujo de líquido.



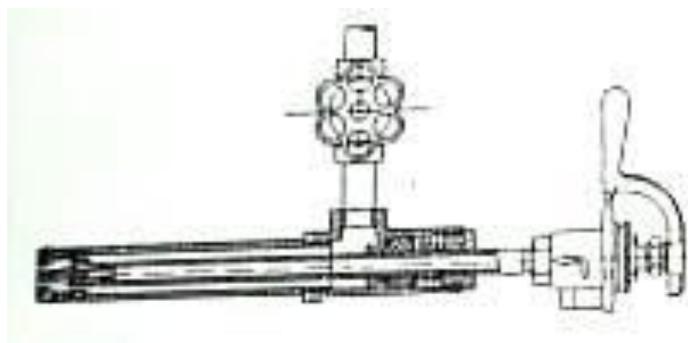
El cono de dispersión del combustible depende del tipo de pastilla rociadora, y puede tener ángulos de 30°: 45 °; 60 ° y 80 °, con presiones de trabajo variables entre 7 a 10 kg/cm². El buen funcionamiento de un atomizador mecánico depende del estado y dimensiones del orificio de salida de la pastilla, que varía de acuerdo a la presión de trabajo y el tipo de combustible utilizado. Cualquier daño que experimente el orificio de salida, o que no hubiere sido elegido de acuerdo a las condiciones de trabajo, se traducirá en una deficiente atomización y por lo tanto una mala combinación (incompleta). Su limpieza debe realizarse periódicamente con sumo cuidado, utilizando un solvente adecuado, y si existe depósito sólido en el orificio de salida o en las ranuras, se lo debe remover con un palito de madera. Nunca utilizar un alambre, que puede provocar la variación de las dimensiones (calibre) del orificio. Como el costo de la pastilla no es elevado en comparación con el desperdicio de combustible por una combustión incompleta, no debe dudarse en efectuar su recambio ni bien se note un funcionamiento deficiente de la misma.

1-b) De mezcla: En este tipo de quemadores, la atomización del líquido se logra por acción de un fluido auxiliar que puede ser aire comprimido (para poco caudal) o vapor (para grandes caudales). La mezcla de combustible, agente pulverizador, puede realizarse en forma interna o externa a la lanza.

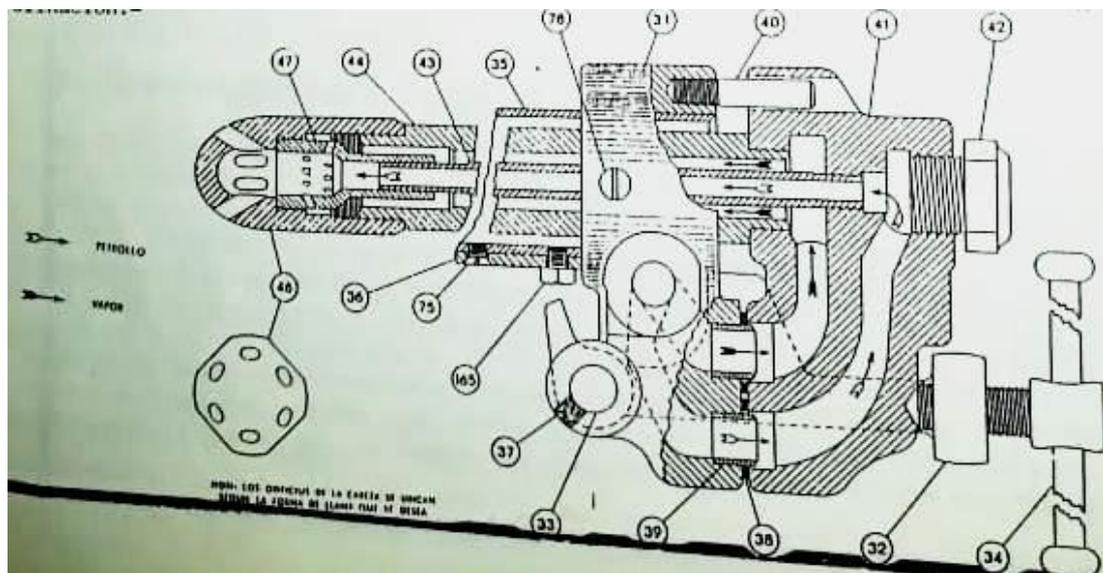
1-b-1) Pulverización con aire comprimido: En este caso el aire comprimido utilizado forma parte del necesario para la combustión (aire primario) y puede ser suministrado a baja o alta presión. Si bien siempre es más conveniente trabajar con aire a presión alta porque se logra una mejor



pulverización, su uso se realizara teniendo en cuenta su costo de producción. Normalmente el aire comprimido penetra a la lanza en forma concéntrica con el combustible y por un canal exterior al del combustible, y tangencialmente al conducto, adquiriendo por tal motivo un movimiento de rotación que alcanza su máxima velocidad al encontrarse con el combustible que sale del conducto interior. El impacto pulveriza al combustible. La mezcla sale formando un cono divergente, que al encontrarse con el aire secundario, se atomiza aún más. En los de mezcla exterior, si bien el aire circula también por conducto concéntrico exterior, la mezcla aire-combustible se produce fuera de la boquilla.



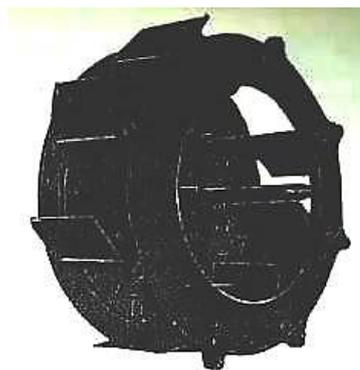
1-b-2) Pulverización con vapor: sus elementos constitutivos son similares a los de aire comprimido, diferenciando únicamente en la forma del pico pulverizador, que posee canales de salida con distintos grados de inclinación.





Nº	DENOMINACION
31	CULATA DE LA VAINA
32	HORQUILLA
33	PASADOR DE LA HORQUILLA
34	TORNILLO DE FIJACION DE LA HORQUILLA
35	VAINA
36	CHAVETA DE LA VAINA
37	TORNILLO DEL PASADOR DE LA HORQUILLA
38	ARANDELA DE COBRE
39	ANILLO DE ACOPLAMIENTO
40	GUIA DE ACOPLAMIENTO
41	CULATA DE LA LANZA
42	TAPON DE LA LANZA
43	TUBO INTERIOR
44	BARRAL
46	PICO
47	FILTRO
75	TORNILLO DE FIJACION DE LA CHAVETA
78	PRISIONERO DE LA VAINA
85	TOPE DE LA CHAVETA

2) Distribuidor o registro de aire: su finalidad es lograr el íntimo contacto entre aire y combustible, operación que debe realizarse lo más rápido posible, ya que si ello no ocurre el combustible se condensa en pequeñas gotas, que lógicamente no combustiona. Para que la corriente de aire se adapte al cono de dispersión del combustible, el registro de aire posee aletas de inclinación variable para adoptar la posición más conveniente a sus fines.

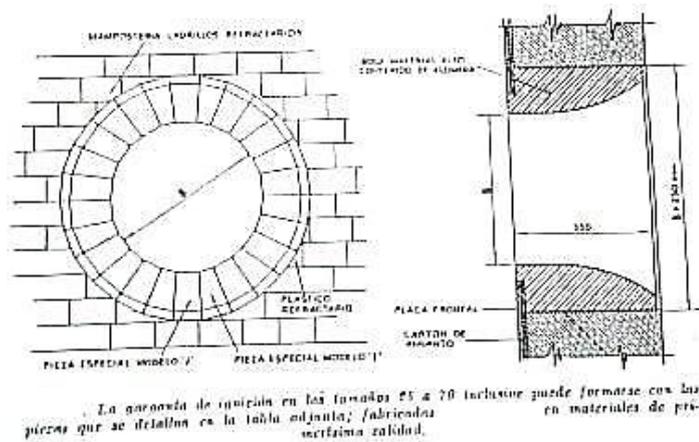


Distribuidor o registro de aire

3) Boca o garganta de ignición: tiene la forma de un difusor y su finalidad es orientar convenientemente la neblina de aire, líquido atomizado y gases, y principalmente recibir calor por radiación de la llama formada en la combustión y reflejarlo sobre la mezcla aire-combustible que entra suministrando el calor necesario para evaporar el combustible pulverizado y llevar la mezcla a la



temperatura de ignición. Es decir, aporta la energía en forma de calor necesario en el período endotérmico que antecede a la combustión.



4) Tobera de alimentación de gas: este accesorio se utiliza en los quemadores donde además de la mezcla aire-combustible se inyecta gas (quemadores combinados gas-petróleo). Su finalidad es producir una mezcla rápida aire-gas sin interferir en el proceso de mezcla aire-combustible líquido que se realiza en forma simultánea.

En el esquema siguiente se podrá observar un quemador combinado, que muestra los distintos elementos mencionados anteriormente.



La diferencia de masa se la denomina “defecto de masa”. Las teorías modernas de la constitución de la materia indican que es posible convertir la masa de una sustancia en energía y a la inversa. Según EINSTEIN la ley que rige esta transformación se expresa por:

$$E = m \cdot c^2, \text{ donde:}$$

E = energía

m = masa

c = velocidad de la luz

De ello se deduce, que el “defecto de masa” debe liberar una cantidad equivalente de energía, que se la denomina “energía de enlace o de formación”, y que se produce la unión de dos átomos livianos para formar uno pesado. Por ejemplo, en la unión de dos átomos de hidrógeno para formar uno de helio, se producirá una liberación de energía. Este fenómeno de unión de dos átomos con defecto de masa se denomina FUSIÓN. De la misma manera si un átomo pesado se fragmenta, se producirá un defecto de masa con liberación de energía. Este proceso se denomina FISIÓN.

A la materia de una sustancia simple cuyas moléculas están constituidas por átomos de una misma composición química, se denominan nucleidos. La mayor parte de los existentes en la naturaleza (± 300) o los artificiales (± 1600) son inestables y tienden a estabilizarse variando su composición nuclear. A este fenómeno de estabilización se lo denomina RADIOACTIVIDAD. Es decir, todos los nucleidos son radioactivos. Al proceso de estabilización se lo denomina “DESINTEGRACIÓN NUCLEAR”. Este se realiza con liberación de partículas que son β o electrón; β^+ o positrón; α de alta velocidad formada por pérdida de dos protones y dos neutrones del núcleo. Los nucleidos que emiten partículas α recién se estabilizan luego de muchas desintegraciones sucesivas, y por tal motivo las mismas son altamente radioactivas y consecuentemente las que más afectan al ser humano.

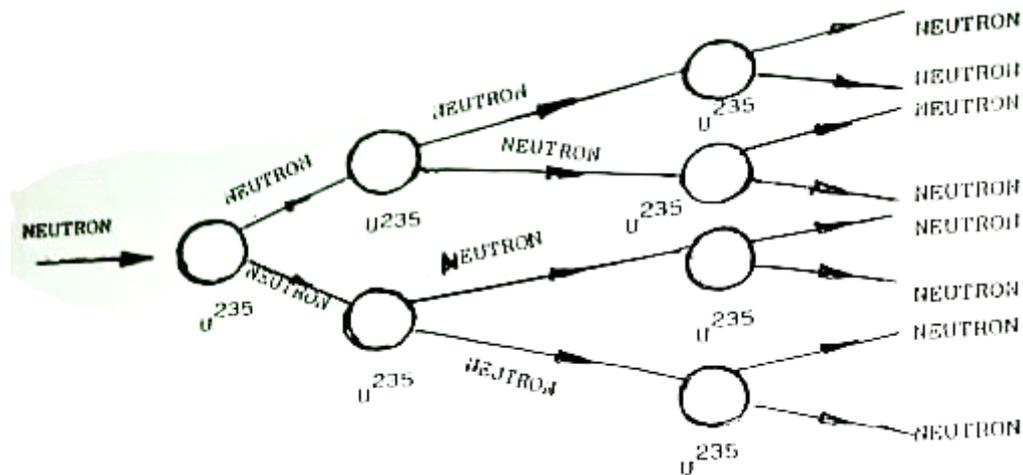
Las partículas radioactivas presentan la propiedad que cuando inciden sobre una sustancia pueden ser absorbidas, dispersadas o transmitidas según las características que presenten estas últimas, y el tipo de partícula emitida. Por sus propiedades las partículas α son las que interaccionan con mayor facilidad.

En la generación de energía a partir de los combustibles nucleares por el proceso físico de fusión, las partículas que se utilizan son los neutrones, por su capacidad de interacción con el Uranio con respecto a las que poseen otras partículas. Ello es consecuencia que no tienen carga eléctrica y es uno de los integrantes atómicos.



La energía inicial de activación se logra por un bombardeo artificial de neutrones que produce la fragmentación del núcleo del isótopo del uranio correspondiente en:

- Productos de fisión
- Neutrones
- Gran energía en formación de calor



Los neutrones que se generan por el bombardeo, tienen altas velocidades de desplazamientos y por tal motivo se los denominan “neutrones rápidos”. Si la emisión de los mismos no es controlada, continúan bombardeando otro núcleo en forma desordenada, produciéndose la desintegración total de núcleo bombardeado y se produce lo que se denomina explosión atómica.

Por ello, para poder utilizar el proceso físico de fisión en la producción de energía en forma de calor utilizable, es necesario controlar la desintegración nuclear, lo cual puede conseguirse disminuyendo la velocidad de los neutrones, transformándolos en neutrones lentos o térmicos, o bien, absorbiendo neutrones.

La absorción de neutrones se logra con barras de cobalto o cadmio.

La energía que se genera en la fisión es utilizada posteriormente para obtener vapor de agua. La sustancia que se utiliza a tal efecto se denomina REFRIGERANTE, porque además de actuar como transporte de calor hasta la caldera, refrigera el reactor. Por tal motivo debe tener alto coeficiente de transmisión térmica y alta capacidad calorífica, para que no sea necesario utilizar un gran caudal. Tampoco debe activarse ni descomponerse. Se puede utilizar agua liviana (común), anhídrido carbónico, metales



fundidos (sodio, potasio) y agua pesada. El agua liviana tiene el inconveniente que puede liberar oxígeno, que tiene un efecto corrosivo. Los más comunes son el agua pesada y el anhídrido carbónico.

2-10) REACTORES NUCLEARES:

Es el dispositivo donde se provoca el proceso físico de fusión, se lo regula y se absorbe la energía en forma de calor generado.

2-10-1) Tipo de reactores: hasta la fecha la clasificación de los reactores es convencional, lo cual no significa que una excluya a la otra, pudiendo ser inclusive complementarias. De esta manera tenemos:

- 1) Según su finalidad:
 - a) Reactores de potencia para obtener energía eléctrica.
 - b) Reactores de investigación para estudios nucleares.
 - c) Reactores reproductores para obtener otro elemento (Ejemplo: plutonio)
- 2) Según la velocidad de los neutrones:
 - a) De neutrones rápidos.
 - b) De neutrones lentos o térmicos.
- 3) Según la disposición del combustible con respecto al moderador:
 - a) Heterogéneos: cuando el combustible está separado del moderador.
 - b) Homogéneos: cuando el combustible está disuelto en el moderador.
- 4) Según el tipo de refrigerante:
 - a) Gaseosos: cuando se utiliza anhídrido carbónico.
 - b) Líquidos: cuando se utiliza agua pesada.
 - c) Sólidos: cuando se emplea metal fundido.

Independientemente de la clasificación anterior existen cuatro tipos de reactores:

- 1) Reactor de agua a presión: (PWR – Pressurized Water Reactor). En este tipo de reactor se utiliza un ciclo de agua a alta presión que actúa como moderador y refrigerante a la vez. La presión de trabajo es de 140 km/cm^2 alcanzando el agua, $315 \text{ }^\circ\text{C}$ sin hervir. En estas condiciones pasa a la caldera por donde circula en el interior de los tubos rodeados por agua a baja presión, que se vaporiza a una temperatura de $260 \text{ }^\circ\text{C}$. La alta presión de trabajo exige un



espesor considerable de las paredes del reactor (200 a 300 mm), con el costo que ello significa. El otro inconveniente es que se debe utilizar uranio enriquecido también de alto costo y que para retirar las barras de combustible agotadas, se debe parar el reactor aumentando el costo de operación.

- 2) Reactor de agua hirviente: (BWR – Boiling Water Reactor). La presión de trabajo en este tipo de reactor es de 70 km/cm^2 observándose, vapor a una temperatura de 280 °C. Tiene como ventaja, con respecto al anterior, la menor presión de trabajo y por lo tanto, menor costo del reactor. Tiene la desventaja de la posibilidad de contaminación, que se puede eliminar utilizando doble circuito, pero lógicamente con mayor costo de instalación.
- 3) Reactor enfriado por gas: (GCR- Gas Cooled Reactor). En este reactor se utiliza anhídrido carbónico como refrigerante y grafito como moderador, que va colocado en bloque entre los elementos combustibles. Se obtiene vapor a una temperatura de 540 °C, como ventaja que se puede utilizar uranio natural. Tiene el inconveniente de las dimensiones del reactor.
- 4) Reactor de agua pesada: (HWR – Heavy Water Reactor). Se utiliza agua pesada como moderador y refrigerante. Tiene la ventaja que los elementos combustibles se alojan en el interior de los tubos estando el conjunto sumergido en agua pesada, lo que le confiere mayor seguridad al sistema.

VARIANTES: con ligeras modificaciones de los anteriores, tenemos:

- a) Reactor PHWR, que es también un reactor de agua a presión, con la diferencia que en éste caso se utiliza uranio natural como combustible, y como moderador y refrigerante se utiliza agua pesada.
- b) Reactor HTGR, que constituye una variante del GCR utilizando helio como refrigerante y grafitos en bloque como moderador.
- c) Reactor SGR (Sodio-Grafito Reactor). En este caso se utiliza grafito en bloques como moderador, y sodio fundido como refrigerante, pero a las bajas presiones se utiliza uranio enriquecido como combustible.



BIBLIOGRAFIA

- Combustión y Generación de Vapor. Torreguitar Weiss. Ed. M. Goodwin-1968
- Generación del Vapor. Marcelo Mesny. Ed. Marimar-1976
- Fundamentos de Termotecnia. F. Gascón Latasa. Ed. Tecnos-1976
- Problemas de Ingeniería Química. Ocom Tojo. Tomo I-II- .Aguilar-1980
- Termotecnia. L. Del Arco Vicente. Ed. Mitre- 1984
- Termotecnia. Ignacio Lira C. Ed. Universidad Católica de Chile - 1991
- Manual de Ingeniero Químico. Perry. Ed. Mc Graw Hill - 1992
- Centrales Térmicas de ciclo combinado- S. Sabugal García, F.Gomez Monux-Ed.Endesa 2006
- Thermodynamics with Chemical Application. Abbott- Van Ness- Mc Graw Hill-1989