

PRACTICA 3

COMBUSTION

COMBUSTIBLE

Sustancia que posee una energía latente, la cual se puede aprovechar al mezclarla con O₂ produciendo una oxidación para liberarla.

COMBUSTIBLES

SOLIDOS, SON UNA MEZCLA DE:

C, H₂, O₂, N₂, S, HUMEDAD y CENIZA

LÍQUIDOS

GASEOSOS

C,H → HIDROCARBUROS

CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES

La clasificación de los combustibles convencionales puede realizarse de diferentes formas:

- Atendiendo a su origen, pueden ser fósiles o no fósiles, según procedan o no de restos fermentados de seres vivos.
- Según su grado de preparación se clasifican en naturales, su utilización es directa tal y como aparecen en origen, y elaborados o manufacturados, que deben ser sometidos a complejos tratamientos.
- Dependiendo de la fase en que se presenten: combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

COMBUSTIBLES

CLASIFICACIÓN DE COMBUSTIBLES INDUSTRIALES

SOLIDOS	NATURALES	MADERAS Y RESIDUOS VEGETALES
		TURBAS
		CARBÓN
		LIGNITOS
		HULLAS
		ANTRACITA
	ARTIFICIALES	COQUES(CARBÓN Y PETROLEO)
		AGLOMERADOS Y BRIQUETAS
		CARBON VEGETAL
	ALCOHOLES	NATURALES(FERMENTACIÓN HIDRÓLISIS)
		ARTIFICIALES
LIQUIDOS	RESIDUALES	LEJÍAS NEGRA
		GASEÓLOS
	DERIVADOS DEL PETROLEO	FUELEOLOS
		FUEL-GAS
GASEOSOS	GASES LICUADOS DEL PETROLEO (GLP)	DIFERENTES FAMILIAS
		PROPANOS Y BUTANOS
		GAS DE ALTO HORNO
	ARTIFICIALES O ELABORADOS	GAS DE COQUE
		GAS POBRE
		GAS DE AGUA
		GAS DE CIUDAD
		BIOGAS

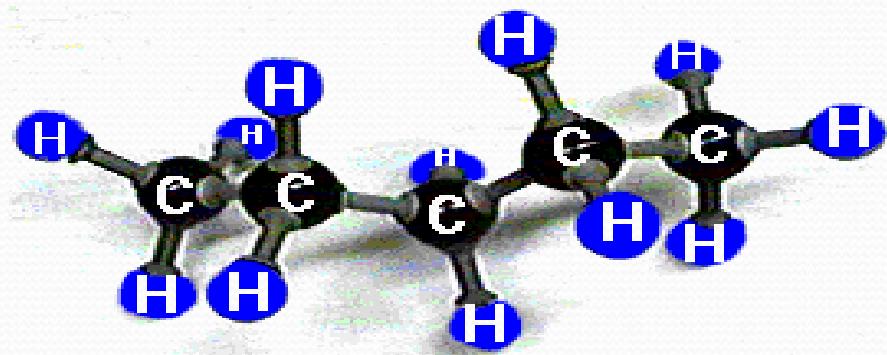
HIDROCARBUROS

El petróleo consta de una mezcla de hidrocarburos que varía del 50 al 98%; estos se pueden clasificar de la siguiente manera:

FAMILIA	FORMULA	ESTRUCTURA
Parafinas	$C_n H_{2n+2}$	cadena saturada
Olefinas	$C_n H_{2n}$	cadena no saturada
Diolefinas	$C_n H_{2n-2}$	cadena no saturada
Naftenos	$C_n H_{2n}$	anillo saturado
Aromáticos	$C_n H_{2n-6}$	anillo no saturado

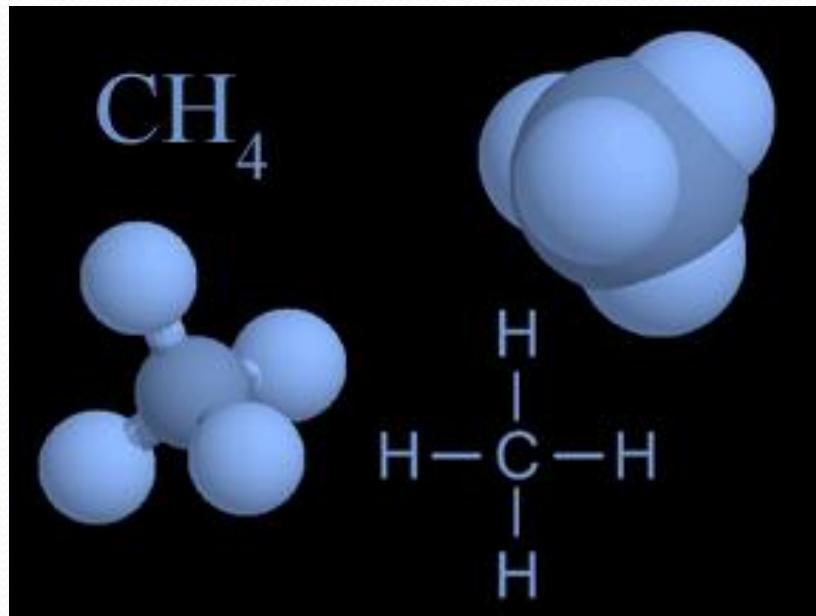
HIDROCARBUROS

- Se dice que un hidrocarburo está saturado cuando todos sus átomos de carbono están unidos por una simple ligadura. Un hidrocarburo se considera no saturado cuando los átomos de carbono están unidos por una doble o triple ligadura.
- Los hidrocarburos se caracterizan por tener un enlace covalente el cual consiste en compartir los electrones del último nivel energético a fin de alcanzar una estructura electrónica estable.



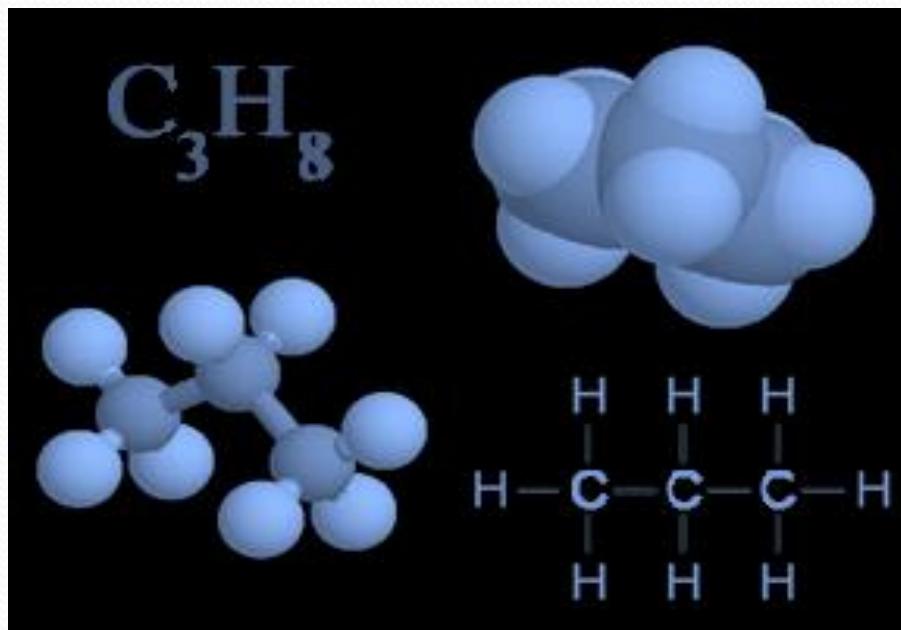
PARAFINAS

- La serie de hidrocarburos **PARAFÍNICOS** comienza con el metano (CH_4); el siguiente hidrocarburo de la serie tiene un átomo más de carbono y dos más de hidrógeno unidos a él. **FORMAN UNA CADENA SATURADA**



METANO CH₄

PARAFINAS



PROPANO C_3H_8

OLEFINAS

- Una **OLEFINA** es un compuesto que presenta al menos un doble enlace Carbono-Carbono

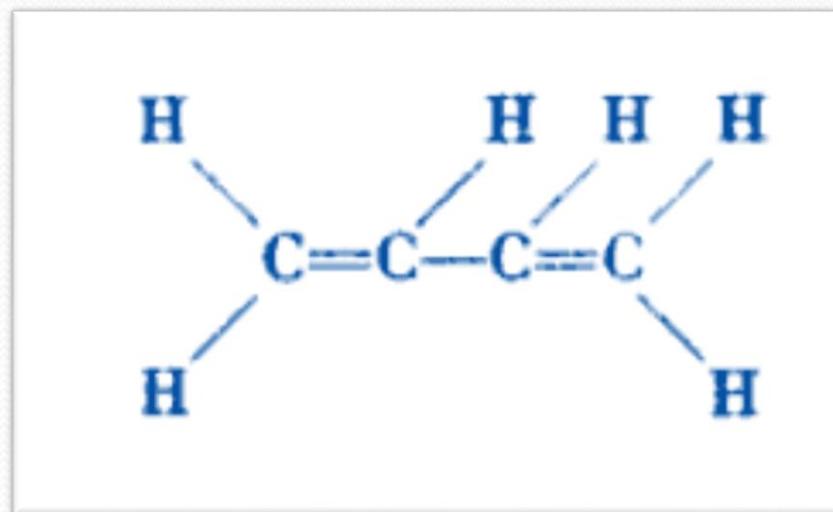


Eteno o etileno, $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$

Nombre	Fórmula semidesarrollada
Eteno	$\text{CH}_2 = \text{CH}_2$
Propeno	$\text{CH}_3 - \text{CH} = \text{CH}_2$
Buteno	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH}_2$
Penteno	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH}_2$
Hexeno	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH}_2$
2-metil-2-penteno	$\begin{array}{ccccc} & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ \text{CH}_3 & & & & \text{H} \\ & \backslash & & / & \\ & \text{C} = \text{C} & \\ & / & \backslash & & \\ \text{CH}_3 & & & \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ & 4 & & & 5 \end{array}$
3-etil-1,5-heptadieno	$\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_3$ $ $ $\text{CH}_2 - \text{CH}_3$

DIOLEFINAS

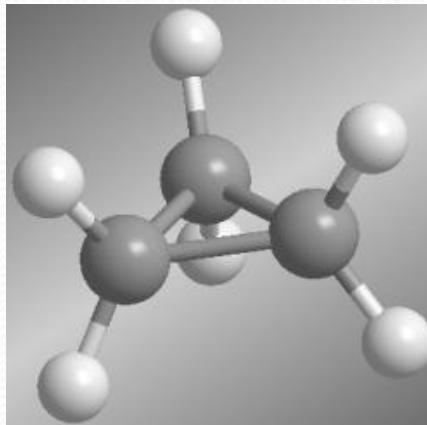
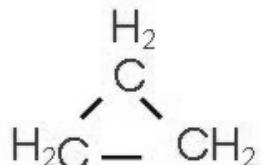
- Una **DIOLEFINA** es un compuesto que presenta al dos dobles enlaces Carbono-Carbono, que están separados por un enlace Carbono-Carbono sencillo



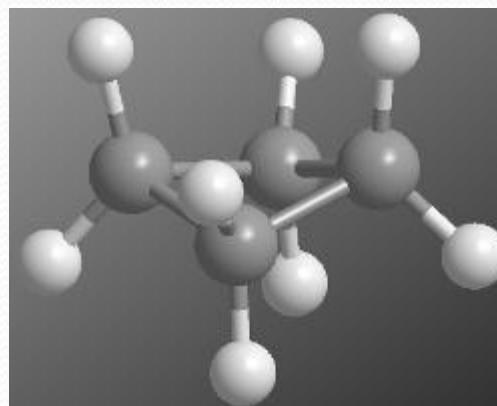
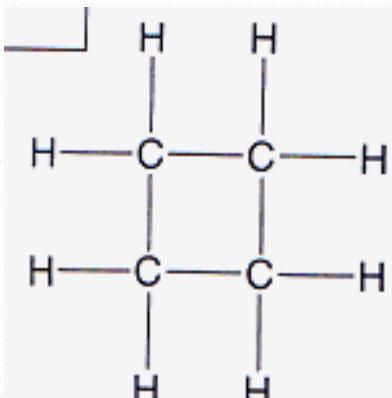
BUTADIENO
 $C_4 H_6$

NAFTENOS

- La serie **NAFTÉNICA** de los hidrocarburos tiene sus átomos de carbono unidos por enlaces simples, cada uno de ellos unido a los dos adyacentes, formando así una estructura de **ANILLO SATURADO**



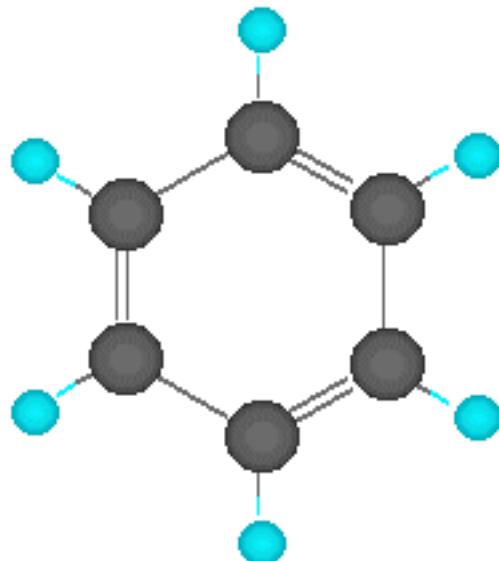
CICLOPROPANO C_3H_6



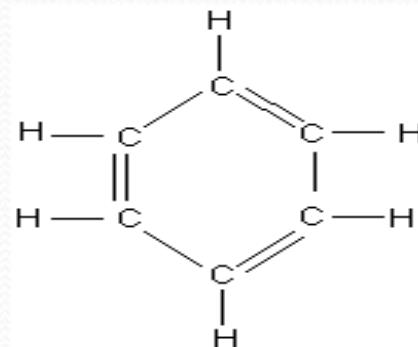
CICLOBUTANO C_4H_8

AROMATICOS

- La serie **AROMÁTICA** de hidrocarburos forma una estructura de anillo con tres dobles ligaduras, llamada anillo bencénico o **ANILLO NO SATURADO**



BENCENO C_6H_6



ANÁLISIS FÍSICO DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS

Se efectúa para determinar la humedad, las materias volátiles, las cenizas y el carbón fijo

- **ANÁLISIS A SOLIDOS**

- HUMEDAD
- MATERIAS VOLÁTILES
- CENIZAS
- CARBÓN FIJO



ANÁLISIS DE COMBUSTIBLES SOLIDOS

- HUMEDAD : Se pesan las muestras y después se colocan en crisoles planos en un horno a 378 K durante una hora, y después dentro de un secador para enfriarlas y volverlas a pesar. El secador es un recipiente cerrado que contiene sustancias que absorben la humedad de la atmósfera al enfriarse. El porciento de humedad es la pérdida de peso de la muestra dividida entre su peso neto original en el crisol.
- MATERIAS VOLÁTILES : Se pesan dos muestras las cuales se colocan en crisoles hondos con tapas dentro de un horno a 1,227 K durante 7 minutos, se sacan y se enfrián. En este caso, las pérdidas de peso se deben a la pérdida de agua y sustancias volátiles.

ANÁLISIS DE COMBUSTIBLES SOLIDOS

- **CENIZAS:** Las muestras se calientan en un horno hasta 1,033 K durante dos horas, se sacan y se enfrián en un secador para después volverlas a pesar, el proceso debe repetirse hasta que se obtenga un peso constante. El porcentaje de las cenizas contenidas es igual al peso residual de la muestra dividida entre el peso neto original.
- **CARBÓN FIJO:** Es la diferencia entre el 100% y la suma de todos los porcentajes determinados para los otros componentes.

ANÁLISIS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Con este tipo de análisis se obtienen todos los elementos que forman el combustible. Para clasificar los combustibles líquidos, las propiedades fundamentales son: densidad, viscosidad, volatilidad, ignición, punto de fusión, punto de encendido, color y pureza



ANÁLISIS DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS

- DENSIDAD
- VOLATILIDAD
- VISCOSIDAD
- IGNICIÓN
- PUNTO DE ENCENDIDO
- PUNTO DE FUSIÓN
- COLOR
- PUREZA



ANÁLISIS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

- **DENSIDAD:** Es la masa contenida por unidad de volumen; se mide en grados Baumé o grados API.
- **VOLATILIDAD:** Una muestra medida de combustible se calienta lentamente; conforme ésta alcanza los diferentes puntos de ebullición de sus componentes, éstos se destilan, se condensan y se miden obteniendo una curva de porcentaje de volatilidad contra temperatura.
- **VISCOSIDAD:** Es la resistencia que presenta un fluido para moverse. La unidad absoluta es el Poise (dinas/(s cm²)). Muchas veces se usa la viscosidad cinemática, que es la viscosidad absoluta dividida entre la densidad, a esta unidad se le llama Stokes(cm²/s)

ANÁLISIS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

- **IGNICIÓN**

- El índice de ignición depende de la naturaleza química del combustible.
- Dicho índice determina la capacidad del combustible para soportar altas presiones y temperaturas sin que exista auto-ignición o detonación.
- En el caso de las gasolinas se denomina índice de octano y del aceite diesel índice cetano.
- Para establecer la clasificación por octanos se utiliza un motor monocilíndrico en el cual la velocidad, temperatura y riqueza de la mezcla se mantienen constantes al probar los diferentes combustibles.

ANÁLISIS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Al iso-octano (C_8H_{18}) se le asigna el valor de 100 por ser el combustible que soportó mayor presión y temperatura, y al heptano normal (C_7H_{16}) el valor de cero puesto que en condiciones normales de presión y temperatura se incendia.

Los demás combustibles quedan en este rango. Por ejemplo, un combustible que se comporta como el iso-octano se dice que tiene 100 octanos.

ISO-OCTANO (C_8H_{18})

100 OCTANOS

HEPTANO (C_7H_{16})

0 OCTANOS

- **PUNTO DE ENCENDIDO:** Es la temperatura a la cual los vapores que se desprenden por encima del combustible
- **PUNTO DE FUSIÓN:** Es la temperatura a la cual el combustible se congela

ANÁLISIS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

- COLOR: Usualmente el color de los combustibles líquidos es translúcido y dependiendo de esta nitidez se puede observar el grado de volatilidad existente; el color se utiliza sólo para diferenciarlo de otros combustibles.
- PUREZA: Aunque los combustibles líquidos son relativamente puros, pueden contener sedimentos, cenizas, agua y azufre. Este último es un componente indeseable ya que resulta corrosivo cuando se encuentra en cantidades mayores al 2%. Por su parte, los combustibles gaseosos se pueden mezclar más fácilmente con el aire logrando una distribución homogénea tanto en los cilindros de un motor como en los quemadores de una turbina de gas o generador de vapor. Sin embargo, los combustibles líquidos proporcionan un poder calorífico mayor.

PODER CALORÍFICO DEL COMBUSTIBLE

Cantidad de calor que se obtiene de la oxidación completa de una unidad de masa o de volumen, de una substancia, la cual inicialmente se encuentra a presión atmosférica y temperatura estándar y después de la combustión los productos son puestos en las mismas condiciones de presión y temperatura.

El poder calorífico habitualmente se expresa en unidades del sistema internacional:

Combustibles sólidos: kJ/kg.

Combustibles líquidos: kJ/kg ó kJ/l.

Combustibles gaseosos: kJ/kg ó kJ/Nm³.

PODER CALORÍFICO SUPERIOR (pcs)

Es el calor liberado por unidad de masa o volumen considerando que se condensa el vapor producido por la combustión del hidrógeno.

Habitualmente el agua se evapora con los gases de escape en fase vapor, por lo que el poder calorífico más comúnmente utilizado es el inferior .

PODER CALORÍFICO INFERIOR (pci)

Es el calor liberado por unidad de masa o volumen después de deducir el necesario para vaporizar el agua formada por la combustión del hidrógeno que contiene el combustible mismo

COMBUSTIÓN

Es la oxidación rápida de una substancia, acompañada de una transformación de energía química en calorífica y de un aumento de temperatura.

**Por lo tanto es un
proceso exotérmico**

COMBUSTIÓN

Se produce entre dos elementos:

Combustible y Comburente

Combustible:

Material oxidable, que puede ser sólido (carbón, madera, etc.), líquido (gasolina, diesel, combustóleo, etc.) o gaseoso (natural, propano, butano, gas lp, etc.)

Comburente:

Generalmente el oxígeno tomado del aire, aunque también sustancias como el flúor al entrar en contacto con el hidrógeno reaccionan provocando un proceso de combustión.

CLASIFICACIÓN DE LA COMBUSTIÓN

POR LA VELOCIDAD DE OXIDACION

{
LENTA

RAPIDA S, DETONACIONES

POR EL GRADO DE OXIDACION

{
COMPLETA

INCOMPLETA

CAUSAS DE COMBUSTIÓN INCOMPLETA

Entendiéndose por combustión completa aquella en la que el combustible se oxida totalmente (cede toda su energía) e incompleta cuando parte de esta energía se pierde debido a la reacción deficiente del carbono que contiene el combustible, formando monóxido de carbono. Dicha deficiencia puede producirse por:

- Insuficiencia de oxígeno.
- Mezcla imperfecta del oxígeno y el combustible.
- Temperatura demasiado baja para mantener la combustión.
- Tiempo insuficiente para llevar a cabo la combustión.

COMPOSICIÓN DEL AIRE SECO

<u>COMPONENTE</u>	<u>FRACCIÓN EN MASA</u>	<u>FRACCIÓN EN VOLUMEN</u>
Oxígeno	0.23188	0.2099
Nitrógeno	0.75468	0.7803
Argón	0.01296	0.0094
CO ₂	0.00046	0.0003
Hidrógeno	0.00001	0.0001
Gases inertes	<u>0.00001</u>	<u>---</u>
	1.00000	1.0000

Propiedades físicas del aire

$$M = 28.97 \text{ kg/mol}$$

$$R = 287.08 \text{ (J/kg K)}$$

$$C_p = 1,011.94 \text{ J/kg K}$$

$$C_v = 722.223 \text{ J/kg K}$$

LEY DE AVOGADRO:

“Si se toman volúmenes iguales de dos gases cualesquiera a la misma presión y temperatura, ambos contienen el mismo número de moléculas y por lo tanto el mismo número de moles.”

NÚMERO DE AVOGADRO:

Establece que una mol contiene 6.025×10^{23} átomos



AIRE CON NITRÓGENO ATMOSFÉRICO

La mezcla de nitrógeno, argón, CO₂, hidrógeno y gases inertes que están normalmente presentes en el aire se denomina nitrógeno atmosférico. Debido a lo anterior, la composición del aire seco puede escribirse como:

COMPONENTE	FRACCIÓN MASA	FRACCIÓN VOLUMÉTRICA
Oxígeno	0.23188	kg de O ₂ /kg aire
Nitrógeno atmosférico	<u>0.76812</u>	kg de N ₂ /kg de aire
	1.00000	<u>0.7901</u>
		1.0000

Aplicando la ley de Avogadro se obtiene que **la relación molar entre el N₂ y el O₂ es la misma que su relación volumétrica** debido a que ambos son gases y se encuentran en condiciones atmosféricas, esto es a la misma presión y temperatura.

$$\frac{\# \text{ moles } N_2}{\# \text{ moles } O_2} = \frac{79\%}{21\%} = 3.76$$

Por cada mol de O₂ en el aire, se tienen 3.76 moles de N₂

CONCEPTOS BÁSICOS

PESO ATÓMICO:

Es el peso relativo de un átomo con respecto al oxígeno al cual se le asignó arbitrariamente un valor de 16 y representa la suma de protones y neutrones que contiene el átomo.

PESO MOLECULAR:

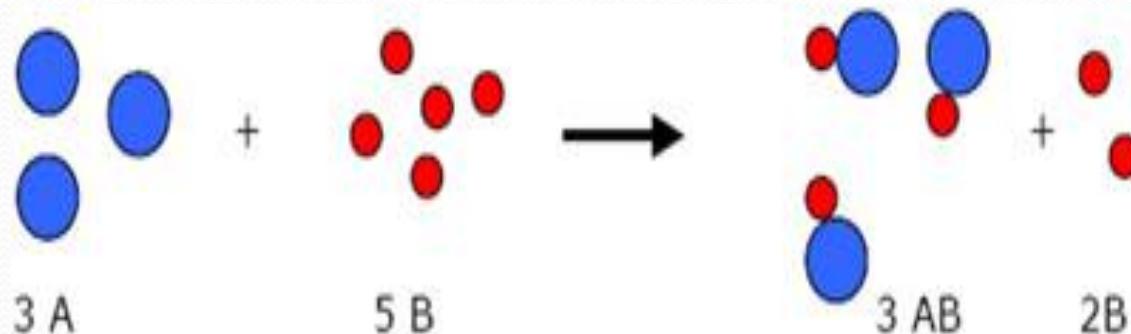
Es la suma de los pesos atómicos de los elementos que constituyen la molécula.

KILOGRAMO MOL:

Es el peso molecular de un compuesto expresado en kilogramos.

LEY DE GIBBS - DALTON:

En una mezcla de gases o vapores, cada gas o vapor ejerce la misma presión, como si la ejerciera el gas o vapor solo en el mismo espacio total a al misma temperatura de la mezcla; esto es, cualquier mezcla de gases ejerce una presión total igual a la suma de presiones parciales independientes de cada gas.



COMPOSICIÓN DEL DIESEL

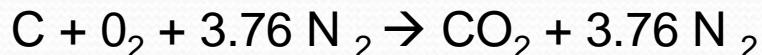
(C₁₆ H₃₄)

	C	H ₂	O ₂	N ₂	S	H ₂ O
En peso	80%	7%	3%	9%	0.2%	0.8%
Pesos moleculares	12	2	32	28	32	18

AIRE TEÓRICO

El aire teórico o aire estequiométrico (relación en peso que existe entre los elementos que intervienen en una reacción química) es la cantidad exacta de aire necesario para que haya el oxígeno preciso para la combustión teórica completa.

CALCULO DEL AIRE TEORICO PARA EL CARBONO



Expresado en moles:



En masa



Haciendo las operaciones y dividiendo entre 12:

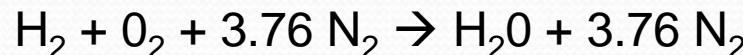


Por tanto:

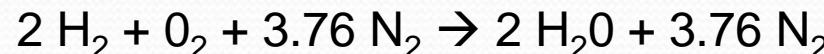
Para la combustión completa de 1 kg de C se necesitan:

11.5 kg de aire, o en otras palabras, 2.667 kg de O_2 .

CALCULO DEL AIRE TEORICO PARA EL H₂



Balanceando la ecuación:



Expresando en Moles y en Masa:



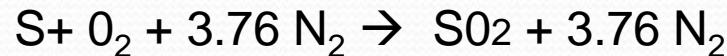
Haciendo las operaciones y dividiendo entre 4:



Por tanto, para la combustión completa de 1 kg de H₂ se necesitan:
8 + 26.5 = 34.5 kg de aire, o en otras palabras:

1 kg de H₂ necesita 8 kg de O₂ para formar 9 kg de agua

CALCULO DEL AIRE TEORICO PARA EL S



Moles:

$$1 + 1 + 3.76 \rightarrow 1 + 3.76$$

En peso:

$$1 * 32 + 1 * 32 + 3.76 * 28.2 \rightarrow 1 * 64 + 3.76 * 28.2$$

Haciendo las operaciones y dividiendo entre 32:

$$1 + 1 + 3.32 \rightarrow 2 + 3.32$$

Por tanto:

Para la combustión completa de 1 kg de S se necesitan:

$$1 + 3.32 = 4.32 \text{ kg de aire.}$$

De lo anterior se obtiene el aire teórico:

$$\text{Aire teórico} = 11.5 \text{ C} + 34.5 \left(\text{H}_2 - \frac{\text{O}_2}{8} \right) + 4.32 \text{ S}$$

[kg de aire / kg de combustible]

	C	H ₂	O ₂	N ₂	S	H ₂ O
En peso	80%	7%	3%	9%	0.2%	0.8%
Pesos moleculares	12	2	32	28	32	18

EXCESO DE AIRE

$$\% E_A = \frac{A_r - A_t}{A_t} \times 100$$

Donde:

E_A - Exceso de aire en % del aire teórico

A_r - Aire real utilizado en la combustión

A_t - Aire teórico requerido para la combustión estequiométrica

EXCESO DE AIRE, VALORES CARACTERÍSTICOS

Carbón pulverizado 15- 20%

Carbón con alimentador inferior 20- 50%

Aceite combustible 5- 20%

Gas natural 5- 12%

Se pueden utilizar las concentraciones de nitrógeno, ya que al no mezclarse éste permanece constante, por lo que :

$$\% E_A = \% E_N = \frac{N_r - N_t}{N_t} \times 100$$

Donde:

E_N - Exceso de nitrógeno, en % del nitrógeno teórico

N_r - Nitrógeno real utilizado en la combustión

N_t - Nitrógeno teórico utilizado en la combustión

El porcentaje de nitrógeno real estará dado por:

$$\% N_r = 100 - (\%CO_2 + \%CO + \%O_2)$$

Donde:

CO_2 , CO y O_2 son los gases producto de la combustión y se expresan en % en volumen.

El nitrógeno teórico será:

$$\% N_t = \% N_r - \% N_{exceso}$$

Donde:

$\% N_{exceso}$ - Nitrógeno en exceso que se maneja en la combustión.

El N_{exceso} se puede obtener en función del O_{exceso} :

$$\% O_{exceso} = \% O_2 - \frac{1}{2} \% CO$$

Debido a la relación molar entre el nitrógeno y el oxígeno en el aire, se puede obtener el nitrógeno en exceso como sigue:

$$\% N_{exceso} = 3.76 (\% O_2 - 1/2 \% CO)$$

Al sustituir valores en la expresión que se obtuvo para el exceso de aire (E_A) , se tiene:

$$\% E_A = \frac{N_r - N_t}{N_t} \times 100 = \frac{3.76(\% O_2 - \frac{1}{2} \% CO)}{\% N_r - 3.76(\% O_2 - \frac{1}{2} \% CO)} \times 100$$

GASTO DE AIRE

$$G_a = r_{a/c} * C * G_C$$

G_a = gasto de aire (kga/s)

$r_{a/c}$ = relación en peso del aire y el carbono (kg de aire/ kg de C)

C = es el porcentaje de carbono que hay en el combustible; este porcentaje varía para cada combustible. (kg carbono / kg de combustible) .

C = 0.8 aproximación para aceite diesel (kg C/ kg de diesel).

C = 0.85 aproximación para gasolinas (kg C/ kg de gasolina).

G_C - es el gasto de combustible (kg/s).

GASTO DE COMBUSTIBLE

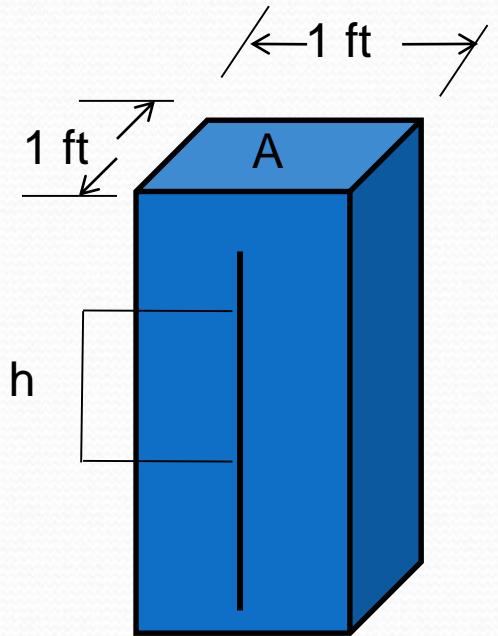
$$G_c = (Vol * \rho) / t \quad [kg/s]$$

$$Vol = A * h \quad [m^3]$$

$$t \quad [s]$$

$$\rho_{diesel} = 800 \quad [kg/m^3]$$

$$\rho_{gasolina} = 750 \quad [kg/m^3]$$



Tanque de Combustible

Debido a que 1 kg de aire contiene 0.76812 kg de nitrógeno atmosférico y a que el peso molecular de este último es de 28.2, el peso del aire será:

$$\text{Peso de aire} = 28.2 \% \text{N}_2 / 0.76812 \quad [\text{kg de aire}] \rightarrow *$$

En donde N_2 , es el nitrógeno real

$$\text{N}_2 = \text{N}_r$$

Por otra parte, el carbono presente en los gases que resultan de la combustión se encuentra como CO_2 y CO, que multiplicados por el peso molecular del carbono dan el peso de este último, es decir:

$$\text{Peso del C} = 12 (\% \text{CO}_2 + \% \text{CO}) \quad [\text{kg de C}]$$

COMPOSICIÓN DEL AIRE

La mezcla de nitrógeno, argón, CO₂, hidrógeno y gases inertes que están normalmente presentes en el aire se denomina nitrógeno atmosférico. Debido a lo anterior, la composición del aire seco puede escribirse como:

COMPONENTE	FRACCIÓN MASA	
Oxígeno	0.23188	kg de O ₂ /kg aire
Nitrógeno atmosférico	<u>0.76812</u>	kg de N ₂ /kg de aire
	1.00000	

Entonces la relación aire / carbono estará dada por:

$$r \frac{\text{aire}}{\text{carbono}} = \frac{28.2 \% N_r (\text{Nitrogeno real})}{12(\% CO + \% CO_2) 0.76812}$$

Sustituyendo en la expresión del gasto de aire:

$$G_A = \frac{28.2 \% N_r}{12(\% CO_2 + \% CO) \times 0.76812} x C x G_C$$

N_r , CO_2 y CO expresados como %.

GASTO DE GASES SECOS

$$G_{gs} = r_{gs/c} * C * G_c$$

En donde:

G_{gs} - Gasto de gases secos (kg de gases secos/s)

$r_{gs/c}$ - Relación en peso, entre el total de gases secos y el carbono
(kg_{gs} / kg C)

G_c - Gasto de combustible (kg de comb/s)

El peso del carbono presente en estos gases secos es:

$$\text{Peso del C} = 12 \ (\%CO_2 + \%CO)$$

El peso de los gases secos es la suma de los pesos moleculares de cada gas que lo forman multiplicándolo por su porcentaje en volumen.

$$\text{Gases secos} = 44 \%CO_2 + 32 \%O_2 + 28 \%CO + 28.2 \%Nr$$

Debido a que el $N_2 = 100 - (CO_2 + CO + O_2)$ se tiene que:

$$r_{gs/c} = \frac{44\% CO_2 + 32\% O_2 + 28\% CO + 28.2\% (100 - (\% CO_2 + \% CO + \% O_2))}{12(\% CO + \% CO_2)}$$

Simplificando se obtiene:

$$r_{gs/c} = \frac{44 \% CO_2 + \% O_2 + 700}{3(\% CO + \% CO_2)}$$

Entonces la fórmula que se busca queda:

$$G_{gs} = \frac{44 \% CO_2 + \% O_2 + 700}{3(\ \% CO_2 + \% CO)} x C x G_C$$

GASTO DE COMBUSTIBLE NO QUEMADO

$$G_{CNQ} = \frac{\% \text{ CO}}{\% \text{ CO}_2 + \% \text{ CO}} * C * G_C$$

Donde:

G_{cnq}

- Gasto de combustible no quemado (kg/s)

$\frac{CO}{CO_2 + CO}$

- Cantidad de carbono parcialmente quemado del total presente en los gases de combustión, (kg de CO/kg de C)

C

- Carbono contenido en el combustible, (kg de C/kg combustible)

G_C

- Gasto de combustible (kg/s)

CO₂ y CO - Porcentaje en volumen en los gases de combustión.

AIRE TEORICO PARA LA GASOLINA

Aire teórico para la gasolina (Iso Octano) C₈H₁₈



- 1.- Completar la reacción
- 2 .- Balancear la ecuación
- 3.- Expresar en Mol
- 4 .- Expresar en masa
- 5.- Concluir como en los análisis anteriores del C, H₂ y S, para quemar un kg de gasolina se necesitan X kg de aire.

AIRE TEORICO PARA LA GASOLINA SOLUCION

Aire teórico para la gasolina (Iso Octano) C₈H₁₈



- 1.- Completar la reacción
- 2 .- Balancear la ecuación
- 3.- Expresar en Mol
- 4 .- Expresar en masa
- 5.- Concluir como en los análisis anteriores del C, H₂ y S, para quemar un kg de Iso-Octano se necesitan X kg de aire.

CALCULOS

Para diesel y gasolina, (Iso- Octano):

1. Aire teórico

Para el diesel:

1. Exceso de aire
2. Gasto de aire
3. Gasto de gases secos
4. Gasto de combustible no quemado

TIPS PARA HACER SU REPORTE

1. Combustibles, combustión y su clasificación.
2. Poder calorífico alto y bajo y calorímetros para su medición.
3. Temperatura de flama adiabática y factores que la afectan.
4. Entalpía de formación y su relación con el poder calorífico.
5. Normas que restringen las emisiones a la atmósfera.
6. Formación de NOx y SOx.
7. Analizadores de gases, (Orsat, Bacharach, etc.)
8. Cálculos.
9. Comentarios y conclusiones.
10. Bibliografía.

MEDICIONES EN LA CALDERA

1. CO₂ = %

1. CO = 1.0 %

2. O₂ = %

3. h = 5 cm

4. t = s

EQUIPO:

1. Cronómetro
2. Flexómetro
3. Analizador de gases

RELACIÓN AIRE Y COMBUSTIBLE

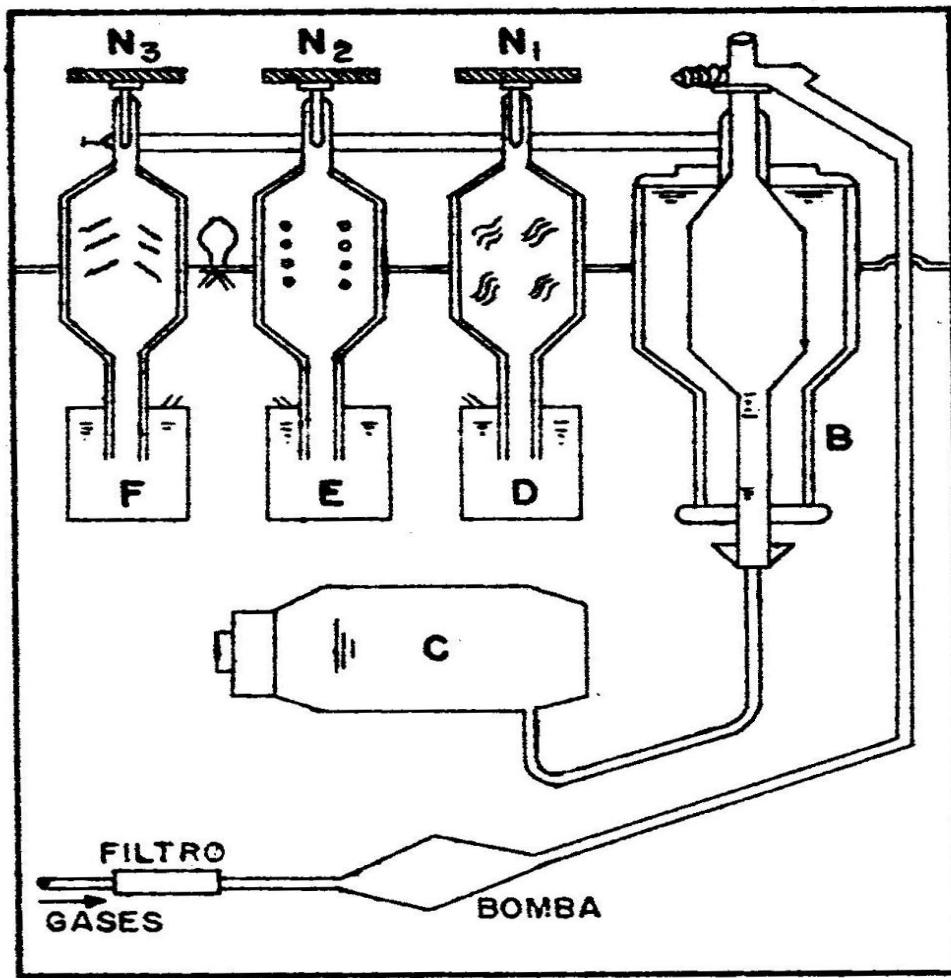
Dos conceptos importantes del proceso de la combustión indican la proporción entre el aire y el combustible que intervienen; se trata de las llamadas *relación aire-combustible*, $r_{a/c}$ y su recíproco, la relación *combustible-aire* $r_{c/a}$.

Ambas pueden expresarse en términos de las masas (o número de moles) del combustible y del aire presentes.

APARATOS PARA EL ANÁLISIS DE GASES QUEMADOS

Analizador de gases “ORSAT”

Es un aparato que se utiliza para determinar los porcentajes en volumen de CO, CO₂ y O₂ presentes en los gases producto de la combustión. Con la válvula N1 abierta, se obliga a la muestra de gases de la bureta a entrar en el recipiente D levantando la botella C. En D, E y F hay una solución de potasa cáustica, ácido pirogálico y cloruro cuproso, que absorben el anhídrido carbónico de los gases (CO₂), el O₂ y el CO, dejando pasar sin alterar los otros constituyentes. El gas restante se retorna a la bureta B bajando la botella C y se anota la pérdida de volumen.



Medidor de CO₂

El medidor de CO₂ es un aparato formado por un paralelogramo de plástico transparente en el interior del cual se encuentran dos cilindros de diferente diámetro comunicados entre si por un sifón. El cilindro de mayor diámetro sirve para almacenar el líquido que absorbe el CO₂ y el de menor diámetro para medir el % de CO₂ absorbido.



Calorímetro de bomba

Es un calorímetro patrón de combustible, el cual mide el calor desprendido del combustible absorbiéndolo en agua; lo que se obtiene es el poder calorífico superior del combustible.

Calorímetro para combustibles sólidos

Se determina por medio del calorímetro de bomba de oxígeno o de peróxido de sodio. Para hacer la prueba , el combustible se muele hasta tener un polvo fino. La muestra se pon en la capsula y se pesa. La bomba se carga con oxígeno a una presión de 1 373 400 Pa aproximadamente. La bomba se pone dentro de un receptáculo con una cantidad de agua a 276 k. Se conecta la corriente y la muestra se quema. El calor generado por la combustión lo absorbe el agua, la bomba y el recipiente.



Calorímetro para gases

El combustible se quema en una llama permanente usando aire como oxidante. El calor que se desprende se absorbe en el agua cuando esta circula en los tubos que rodean la cámara de combustión. El calorímetro esta equipado con termómetros en sus cápsulas para medir la elevación de temperatura en el agua y de los productos de la combustión.

Bibliografía

- Burghardt, David.
Ingeniería termodinámica.
- W.H. Severns ; H.E. Degler
Energía mediante vapor, aire o gas
- Kenneth Wark
Termodinámica
- **PRACTICAS DE LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS**
Facultad de Ingeniería. UNAM
- <http://www.ages-biomass.com/biomass-dust-burner.htm>

MEDICIONES EN LA CALDERA

1. CO₂ = 7.5 %

1. CO = 1.0 %

2. O₂ = 11.0 %

3. h = 5 cm

4. t = 204 s

MEDICIONES EN EL MOTOR DIESEL

1. CO₂ = 3 %

1. CO = 2.8 %

2. O₂ = 11.2 %

3. h = 1 cm

4. t = 56 s

MEDICIONES EN EL MOTOR DE GASOLINA

1. CO₂ = 11 %

1. CO = 0.8 %

2. O₂ = 4.8 %

3. h = 1 cm

4. t = 65 s

ENTALPÍAS

- h_3 Con T_3 y c_p

$$h_3 = c_p \cdot T_3 [^{\circ}C]$$

- h_4 en Tablas de Vapor Sobrecalentado con:

$$\left. \begin{array}{l} P_{AMB} [\text{bars}] \\ T_4 [^{\circ}C] \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ h_4 [\text{kJ/kg}] \right.$$

- h_g' con T_{amb} en Tablas de vapor saturado se saca P_{sat}

$$\left. \begin{array}{l} P_{SAT}[\text{bars}] \\ T_{amb}[^\circ\text{C}] \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} h_g' [\text{kJ/kg}] \end{array} \right.$$

- h_4' en Tablas de Vapor Sobrecalentado con:

$$\left. \begin{array}{l} P_{SAT}[\text{bars}] \\ T_4[^\circ\text{C}] \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} h_4' [\text{kJ/kg}] \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}\Delta h &= h_4 - h_3 \\ \Delta h' &= h_4' - h_g'\end{aligned}$$

BALANCE TÉRMICO

•ENERGÍA SUMINISTRADA

$$E_1 = G_C \cdot PC \text{ [kJ/s]}$$

Donde:

G_C - gasto de combustible (kg/s)

PC - poder calorífico del combustible (kJ/kg)

•ENERGÍA APROVECHADA

$$E_2 = G_v(h_2 - h_1) \text{ [kJ/s]}$$

Donde:

G_v - gasto de vapor en(kg/s)

h_1 - entalpía inicial o a la entrada de la caldera (kJ/kg)

h_2 - entalpía final o de vapor(kJ/kg)

•PÉRDIDA POR HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE

Donde:

μ_c - humedad del combustible($\text{kg}_a / \text{kg}_c$)

$$E_3 = \mu_c G_c \Delta h [\text{kJ/s}] \quad G_c - \text{gasto de combustible}(\text{kg/s})$$

$$\Delta h = c(373 - T) + 2,256.25 + C_{pv}(T_g - 373)(\text{kJ/kg})$$

c- calor específico del agua (kJ/kg K)

C_{pv} – calor específico del vapor de agua (kJ/kg K)

T_c - temperatura del combustible en(K)

T_g - temperatura de los gases de escape en(K)

•PERDIDA POR LA HUMEDAD PRODUCTO DE LA COMBUSTIÓN DEL HIDROGENO DEL COMBUSTIBLE

$$E_4 = 9 (H_2 - O_2/8) G_C \Delta h [kJ/s]$$

Donde:

G_C - gasto de combustible (kg/s)

Δh - es la misma que en el inciso 3.17.3

H_2 - es el porcentaje en masa de hidrógeno en el combustible

O_2 - es el porcentaje en masa de oxígeno en el combustible

9 - indica que por cada hidrógeno que se quema se forman 9 unidades de agua

•PÉRDIDA POR LA HUMEDAD DEL AIRE

$$E_5 = W G_A C_{pv} \Delta T \text{ [kJ/s]}$$

Donde:

W - humedad específica del aire [$\text{kg}_v / \text{kg}_a$]

Gasto de aire:

$$G_A = \frac{28.2N_2}{12(CO + CO_2)0.76812} \left[\frac{G_c C_f - G_r C_r}{100G_c} \right] G_c \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right]$$

N_2 , CO_2 , son los porcientos en volumen en los productos de la combustión obtenidos con el Orsat.

Donde:

G_c - gasto de combustible (kg/s)

C_f - porcentaje en masa de carbono en el combustible

G_r - gasto de cenizas (kg/s)

C_r - porcentaje en masa de combustible en las cenizas

EFICIENCIA

$$\eta = \frac{E_2}{E_1}$$

RELACIÓN AIRE / COMBUSTIBLE (vol)

$$r_{\frac{a}{c}(\text{vol})} = a_{t(\text{vol})} * \left(\frac{\lambda}{100} + 1 \right)$$

Donde:

$r_{\frac{a}{c}(\text{vol})}$ - relación aire combustible (vol)

$a_{t(\text{vol})}$ - aire teórico (vol)

λ - Exceso de aire

•GASTO DE AIRE (vol)

$$G_{a(vol)} = G_c * r_{\frac{a}{c}(vol)}$$

Donde:

$G_{a(vol)}$ - Gasto de aire (vol)

•CALOR SUMINISTRADO

$$Q_s = G_{c(masa)} * PCS_{comb}$$

Donde:

Q_s – Calor suministrado [kW]

PCS_{comb} – Poder Calorífico Superior del combustible [kJ/kg]

•RELACIÓN AIRE / COMBUSTIBLE (masa)

$$r_{\frac{a}{c}(\text{masa})} = a_{t(\text{masa})} * \left(\frac{\lambda}{100} + 1 \right)$$

Donde:

$r_{\frac{a}{c}(\text{masa})}$ - relación aire combustible (masa)

$a_{t(\text{masa})}$ - aire teórico (masa)

EQUIPO DE LA PRÁCTICA



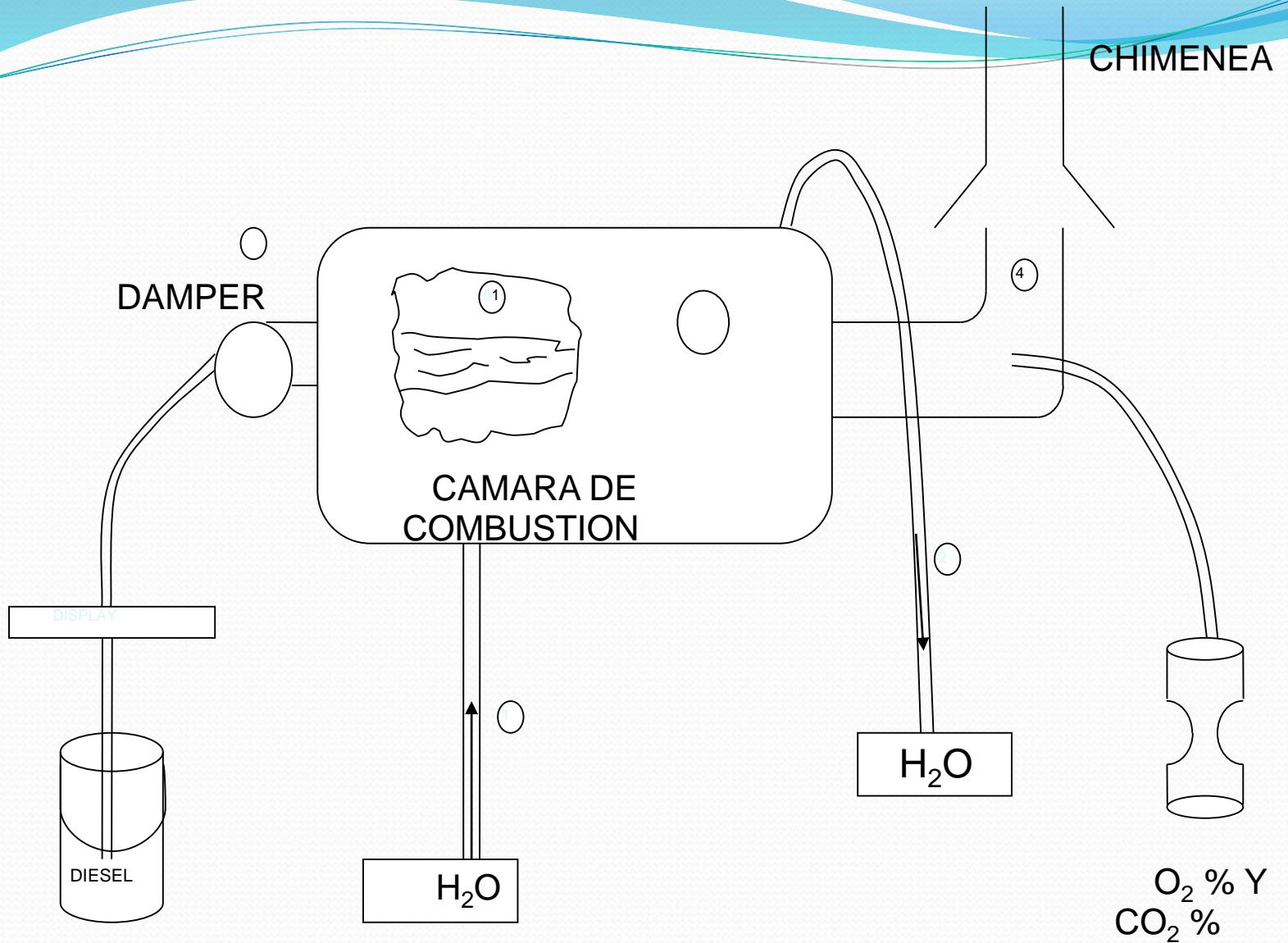


Diagrama de la Instalación en el Laboratorio

TABLA DE LECTURAS

Prueba No	1	2	3	4
$T_1 \text{H}_2\text{O ent}$ [°C]				
$T_2 \text{H}_2\text{O sal}$ [°C]				
$T_3 \text{AIRE ent}$ [°C]				
$T_4 \text{Aire sal}$ [°C]				
T_5 flama [°C]				
V_c [lt/h]				
$m \text{ H}_2\text{O}$ [g/s]				
CO_2 %				
O_2 %				
Color de flama				
Abertura				

EVENTO	1	2	3	4
Presión Atmosférica [bar]				
Temperatura Ambiente [°C]				
Apertura				
Gasto de combustible [L/hr]				
Flujo de agua de enfriamiento [g/s]				
Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada T1 [°C]				
Temperatura del agua de enfriamiento a la salida T2 [°C]				
Temperatura del aire a la entrada T3 [°C]				
Temperatura de los gases a la salida T4 [°C]				
Temperatura de la flama T5 [°C]				
O2 [%]				
CO2 [%]				
Humedad Relativa (ϕ) [%]				

TABLA DE RESULTADOS

Prueba No	1	2	3	4
G_{comb} [m ³ /s]				
Rel A/C (vol) (st)				
Rel A/C (masa)(st)				
Rel A/C (vol)(real)				
Rel A/C (masa) (real)				
Q suministrado [kW]				
E_1 [kJ/s]				
E_2				
E_3				
Eficiencia[%]				

Carta Psicrométrica

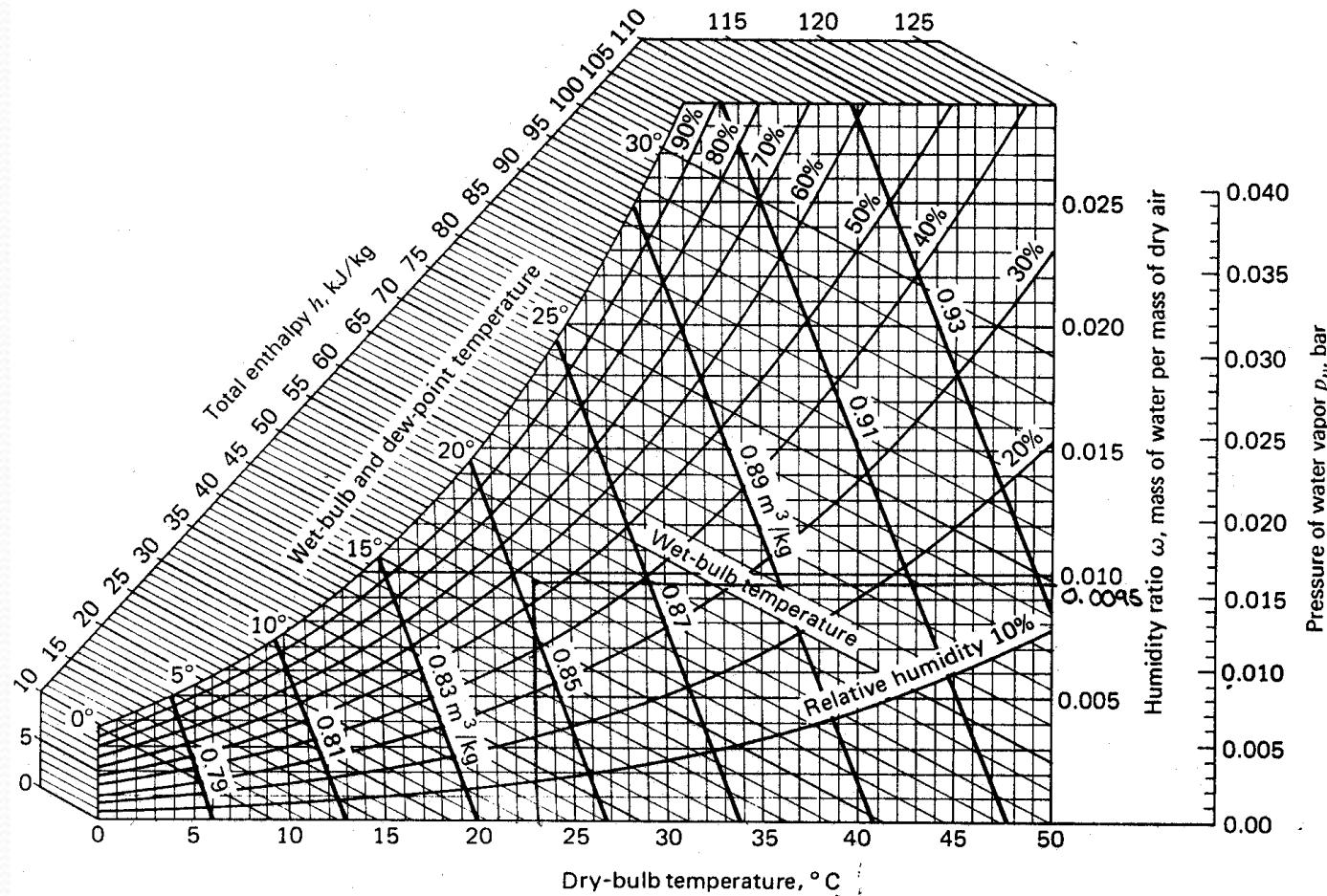


FIGURE A-25M

Psychrometric chart, metric units, barometric pressure 1.01 bars.