

(Extraído del *Compendio Alfabético de Conceptos y Vocablos de aplicación en Procesos de Combustión* del Ing. Roberto Fernández Blanco).

CONCEPTO de MOL

Es Ley Natural que el volumen de un recipiente cualquiera, en tanto se opere a igual Presión y a igual Temperatura, contenga “la misma Cantidad de Moléculas” cualquiera sea el Gas (ideal o perfecto) con el que se lo llene.

Como consecuencia, “a igual volumen” (esto es “a igual cantidad de moléculas”), la Masa del Gas contenido dependerá directamente de la “Masa de cada una de sus Moléculas”, o sea, “la Masa de dicho volumen de Gas será directamente proporcional a la Masa Molecular del Gas contenido”.

La ecuación que refleja este comportamiento es

$$\rho \text{ (Masa/Volumen)} = \frac{\text{MM} \times \text{Pabs.}}{0.08205 \times \text{Tabs.}}$$

Donde:

ρ : Densidad expresada en Gramos-masa por Litro (Gramos/dm³)

MM: Masa Molecular del Gas (Gramos)

Pabs: Presión Absoluta en Atmósferas (Atm)

Tabs: Temperatura Absoluta (Grados Kelvin °K = 273 + t °Celsius)

t: Temperatura medida en Grados Celsius (Centígrados).

(Debe recordarse que **Masa y Peso** son dos conceptos diferentes relacionados a través del factor “g”, aceleración gravitatoria, que en nuestro planeta es g = 9.806 m/seg²).

Si escribimos la ecuación de esta manera :

$$\rho \text{ (Masa/Volumen)} = \frac{\text{MM}}{0.08205 \times \text{Tabs/ Pabs}} \cdot \frac{\text{(Masa Molecular)}}{\text{(Mol)}}$$

se percibe que hay “un Volumen **-que llamaremos MOL-** para el cual la Masa del Gas contenido es (-parte superior de la fórmula-) exactamente **igual** a su **Masa Molecular**.

Este específico volumen o MOL está dado por el denominador de la ecuación.

Si la medición se hace a Presión Atmosférica (Pabs = 1 Atm) y a Temperatura Ambiente (digamos 20°Celsius, que significan una Temperatura Absoluta de 273 + 20 = 293°K), ese Volumen Mol es igual a 0.08205x293/1= 24,04 dm³ (litros).

Si a iguales Presión y Temperatura tenemos un recipiente de Triple Capacidad (esto es de 3 x 24,04 dm³ = 72,12 dm³) el recipiente contendrá 3 MOLES del Gas elegido y la Masa (o el Peso) del Gas contenido será igual a tres veces la Masa (o el Peso) Molecular del mismo. (Masa Total de dicho Gas igual a 3 x MM).

Queda claro que si la Presión y/o la Temperatura cambian, cambiará el volumen del MOL.

A igual Presión de 1 Atm pero a temperatura t=15°C (Tabs de 288°K), el volumen que albergue la cantidad de Gas equivalente a su Masa Molecular será ahora de 0.08205 x 288/1= 23,63 dm³ o litros.

Puesto que si se opera siempre a la misma Presión y a la misma Temperatura el volumen del MOL es siempre el mismo, no se hace necesario recordar o calcular cual es ese volumen, simplemente es un MOL y así se usa.

“MOL es el volumen (y será siempre el “mismo volumen” -cualquiera sea el Gas utilizado- en tanto la Presión y la Temperatura sean siempre las mismas) en el cual “cualquier Gas contenido” en el mismo tiene una Masa igual a su Masa Molecular MM”.

Y esta regla vale para cualquier sistema de unidades, razón por la cual suele aclararse de qué “MOL” se trata cuando se lo expresa en masa o en peso (MOL-Gramo o MOL-libra, etc).

De aquí se desprenden dos corolarios.

(a)- El número Total de Moles de una mezcla de Gases Perfectos contenidos en un recipiente es igual a la suma de la cantidad de MOLES de cada Gas que compone la mezcla.

(b)- En consecuencia la Masa Total (o alternativamente el Peso Total) de esa mezcla contenida en el recipiente es igual a la suma de las Masas (o de los Pesos) de cada uno de sus componentes.

La figura volumétrica más adecuada para visualizar estos conceptos es la de “un cubo regular de 10 divisiones por lado (10x10x10=1000)” que permite expresar la composición de una mezcla en “partes por mil” resultando que cada “cubito interno de 1x1x1” represente el volumen de “1 mol” siendo el total 1000 moles.

Pero para un manejo gráfico más práctico conviene usar un cuadrado de 10x10 y expresar la composición de la mezcla en “partes por cien” (porcentuales).

Analicemos -como ejemplo- el Aire, compuesto por 21% de Oxígeno y 79% de Nitrógeno.

La Masa de una Molécula de Oxígeno (O2) es $2 \times 16 = 32$

Esto significa que un MOL-gramo de O2 contiene 32 gramos de Masa.

La Masa de una Molécula de Nitrógeno (N2) es $2 \times 14 = 28$

Esto significa que un MOL-gramo de N2 contiene 28 gramos de Masa.

Si tomamos un recipiente que contenga 21 MOLES de O2 más 79 MOLES de N2 tendremos 100 moles de AIRE (21% O2 + 79% N2= 100%Aire)

O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2

**-Hogar lleno con 100 moles de Aire-
(21 moles de O2 más 79 moles de N2)**

Este gráfico muestra el “Hogar de una Caldera” lleno de Aire (100% o 100 Moles) representado con los volúmenes ocupados por sus componentes (21 % del total son moléculas de Oxígeno y el resto 79 % son moléculas de Nitrógeno).

*La Masa de cada MOL de O2 es de $2 \times 16 = 32$ gramos por lo que 21 MOLES de O2 totalizan $21 \times 32 = 672$ gramos, y

*La Masa de cada MOL de N2 es de $2 \times 14 = 28$ gramos por lo que 79 MOLES de N2 totalizan $79 \times 28 = 2212$ gramos,

En consecuencia la **Masa Total del Aire (100% o 100 Moles de Aire)** será la resultante de la mezcla de 672 gramos de O₂ más 2212 gramos de N₂ = **2884 gramos de Aire**, por lo que cada uno de los 100 Moles de Aire tendrá una Masa de 28,84 Gramos.

Expresado en porcentuales esto indica que cada **100 gramos de Aire** contiene:

$$\begin{aligned} & * 672/2884 \times 100 = \underline{\underline{23,30 \text{ gramos de O}_2}} \\ \text{y} & * 2212/2884 \times 100 = \underline{\underline{76,70 \text{ gramos de N}_2}}. \end{aligned}$$

Resumiendo:

*Hablando en términos de Volúmenes,

“100 MOLES de Aire están compuestos por 21 MOLES de O₂ y por 79 MOLES de N₂”,

*y hablando en términos de Masas,

“100 Gramos de Aire están compuestos por 23,30 Gramos de O₂ y por 76,70 Gramos de N₂”.

RISK (RIESGO)

(Al hablar de RISK-Riesgo, estamos aceptando que existe un PELIGRO (Hazard) residente en el proceso que tiene cierta PROBABILIDAD de provocar CONSECUENCIAS dañinas).

El ejemplo arriba utilizado nos será útil para visualizar un aspecto muy relacionado con la **“prevención contra explosión” en una Caldera o en un Horno.**

Aceptemos que nuestro combustible sea **Metano puro CH₄**. (el Gas Natural está esencialmente compuesto por un 85% a un 95% de Metano según los casos).

La ecuación de su combustión es: **CH₄ + 2 . O₂ ==> CO₂ + 2 . H₂O**

1.MOL de CH₄ + 2.MOLES de O₂ (lado izquierdo de la ecuación) son los necesarios para la combustión completa del Metano con la justa cantidad necesaria (estequiométrica) de Oxígeno.

Puesto que 100 MOLES de Aire contienen 21 MOLES de O₂, para tener los 2 Moles de O₂ requeridos para la combustión completa del CH₄ serán necesarios (2/21) x 100 = 9,52 MOLES de Aire, dentro de los cuales están los 2 MOLES de O₂ requeridos más un arrastre de 7,52 MOLES de N₂.

Por lo tanto la Mezcla Inflamable de Gas Metano con Aire estará compuesta por:

1.MOL de CH₄ + 2.MOLES de O₂ + 7,52.MOLES de N₂,

lo que da un total de 10,52 MOLES de Mezcla Inflamable en condiciones estequiométricas.

Esta ecuación expresada en porcentuales de volumen da:

1/10,52 x 100 (CH₄) + 2/10,52 x 100 (O₂) + 7,52/10,52 x 100 (N₂) = 10,52/10,52 x 100=100% de Mezcla Inflamable, o sea:

9,506%(CH₄) + 19,012%(O₂) + 71,482%(N₂) = 100% de Mezcla Inflamable en condiciones ideales (estequiométricas) de inflamación.

El gráfico que sigue muestra como los componentes Gas y Aire comparten el interior del Hogar de una Caldera y da una clara idea de “la poca cantidad de Metano que hace falta” que se filtre dentro del Hogar de una Caldera (u Horno) para estar frente a un alto riesgo de explosión (alta probabilidad y alto poder destructivo).

(Usaremos la letra “G” para representar al Gas Metano y –por razones prácticas- graficaremos la ecuación última anterior usando números enteros para las proporciones).

O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
G	G	O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
G	G	G	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
G	G	G	O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2
G	G	O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2

-(Fotografía Lateral del interior del Hogar)-
Mezcla Inflamable en proporciones estequiométricas

Conviene también dibujar otros dos gráficos de gran importancia (solo incluiremos uno de ellos), uno con el valor porcentual de Metano en Aire que representa el LFL (Lower Flammability Limit o Lower Explosive Limit) o mínimo volumen de Gas en Aire suficiente para tener mezcla inflamable, que expresado en Volúmenes es del 5% de Metano en Aire:

O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
G	G	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
G	G	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
G	O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2
O2	O2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N2

Estado del Hogar con Gas Metano en
condición de LFL (5% en volumen de Aire)

y el otro con el del UFL (Upper Flammability Limit o Upper Explosive Limit) que es del orden del 15% (no incluido), para terminar de percibir cuan fácilmente puede una Caldera (u Horno) “estar danzando” dentro de esa zona de explosividad, pasando por encima del UFL y cayendo por debajo del LFL, hasta que en una transición entre ambos límites una fuente de ignición provoque la Explosión y convierta el Incidente en una Tragedia.

Este análisis del concepto de MOL pone en evidencia cuan fácilmente puede una válvula de bloqueo de combustible con algún nivel de pérdida o fuga a través de su obturador dar lugar a la formación y acumulación de mezcla explosiva en el Hogar (tanto con Caldera u Horno con todos sus quemadores apagados como operando con uno o algunos de los mismos apagados) y sirve para demostrar la vital importancia de prevenir dicha formación de mezcla explosiva mediante el uso de apropiadas válvulas Safety Shut Off de Alta Hermeticidad (Leakage Clase VI según ANSI/FCI 70-2 y Durabilidad que iguale o exceda el Standard FM 7400), de accionamiento SIL3 (que garantice alto nivel de confiabilidad operativa ante una demanda de bloqueo), en configuración según NFPA 85/86 y FM 7605 y con velocidad de cierre dentro de un (1) seg a partir de la orden de disparo, para asegurar el rápido y efectivo bloqueo de ingreso de combustibles.

Dicho tipo de válvulas Shut Off serán la principal barrera de prevención contra la formación de una mezcla explosiva en el Hogar (y su posible y probable explosión), haciendo necesaria y urgente su instalación porque de lo contrario, en algún inesperado momento, se llegarán a lamentar las consecuencias, los daños resultantes y el riesgo adicional de que algún Jefe, Gerente o Director podrá verse obligado a cargar con la responsabilidad -tanto ética como legal- de la tragedia.

Con las Normas y Leyes actualmente vigentes en Process Safety, cada vez más estrictas y rigurosas, se está haciendo cada vez más difícil la posibilidad de silenciar los siniestros y diluir y/o eludir las responsabilidades.

Y si en la protección de algún proceso no se ha procedido según NORMAS, CÓDIGOS, GUÍAS ESTANDARES y/o PRÁCTICAS RECOMENDADAS (tales como las PRESCRIPTIVAS NFPA 85, 86, FM 7605, etc y las de PERFORMANCE IEC 61511, ANSI/ISA S-84, etc y locales propias de cada país) y algo desagradable sucede, entonces en algún lugar del organigrama empresario puede llegar a posarse el dedo acusador de la justicia para drama y desgracia de algunos Gerentes y/o Directivos y con graves efectos para las empresas involucradas (usuario, contratistas y/o proveedores de los equipos).

Lo más prudente es empezar a escalar a la brevedad el organigrama empresario reclamando a los niveles superiores el apropiado y riguroso cumplimiento de los procedimientos de prevención y estos a autorizar las necesarias inversiones en protección para obtener la debida Reducción de los Riesgos.

Ing.ROBERTO FERNÁNDEZ BLANCO
(FSEE) FUNCTIONAL SAFETY EXPERT ENGINEER
rblanco@fibertel.com.ar

NOTA:** Se recomienda leer el Artículo SN-208/A en respuesta a preguntas respecto de la Ecuación de Estado de los Gases Perfectos.***

* SE INCLUYE AQUÍ EL ART. COMPLEMENTARIO SN-208/A

ACLARACIÓN SOLICITADA RESPECTO DEL ANTERIOR ARTÍCULO SN-208	Art SN-208 /A
DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN DE ESTADO DE LOS GASES PERFECTOS	05-FEB-07

Siendo muy conocida la Ecuación

$$P_{abs} \times V_{ol} = n \times R \times T_{abs}$$

se nos preguntó recientemente como se vincula esta ecuación con la de “Densidad” utilizada en el inicio del Artículo SN-208 de Junio 14-2005.

Para una más completa comprensión se incluye aquí la deducción de la Ecuación de Estado de los Gases y con ello la respuesta a la anterior pregunta.

1)- Encerrando una Cantidad cualquiera de Masa de un Gas en la cavidad de un cilindro con un pistón (esto es una misma “Cantidad Constante de Masa encerrada” durante todo el experimento), las investigaciones y experimentos de Boyle por un lado y de Gay-Lussac por otro permitieron determinar que los diferentes Estados de los Gases responden a la siguiente ecuación:

$\frac{P_{abs} \times V_{ol}}{T_{abs}} = \text{Constante}$, constante que fue bautizada con la letra “R”, por lo que:

$$P_{abs} \times V_{ol} = R \times T_{abs}$$

2)- El Volumen de un cubo de lados iguales de 10 x 10 x 10 es igual a 1.000 cubitos de 1 x 1 x 1, por lo que cualquier Volumen total “ V_t ” podrá ser representado por una cantidad “n” de cubitos unitarios.

3)- Usaremos como cubito unitario un “cubito elemental” cuya capacidad volumétrica sea la que le permite contener “exclusivamente” una Cantidad de Masa exactamente igual a la “Masa de una Molécula de dicho Gas”, esto es, una (1) Masa Molecular “MM”.

Llamaremos “ V_{mol} ” al volumen de este cubito elemental que solo contiene una única “MM”.

4)- Avogadro comprobó que “Volúmenes iguales de cualquier Gas (en “iguales condiciones” de Presión y Temperatura) contienen la misma cantidad numérica de moléculas”.

Puesto que estamos utilizando el “cubito elemental” de Volumen “ V_{mol} ”, “este volumen V_{mol} contendrá siempre la cantidad equivalente a una Masa Molecular “MM” del Gas “cualquiera sea” el Gas utilizado”, por lo que tanto en “Volúmenes” como en “Masas” se dan las siguientes proporciones:

*4(a)- El Volumen total “ V_t ” del Gas será igual a la suma de los “n” cubitos (o volúmenes elementales) “ V_{mol} ”:

$$V_t = n \times V_{mol}$$

*4(b)- y con esto la Masa total “ M_t ” del Gas encerrado en ese Volumen total “ V_t ” será “n” veces la Masa Molecular “MM” encerrada en cada “ V_{mol} ” de dicho Gas:

$$M_t = n \times MM$$

5)- Aplicando la ecuación inicial de Boyle y Gay-Lussac, utilizando además como Volumen el Volumen Elemental “V_{mol}” y multiplicando por “n” ambos lados de la ecuación (para mantener la igualdad), resulta:

$$P_{abs} \cdot n \cdot V_{mol} = n \cdot R \cdot T_{abs}$$

6)-Sustituyendo los componentes subrayados por sus equivalentes tomados de los puntos 4(a)- y 4(b)- la ecuación se convierte en:

$$P_{abs} \cdot V_t = (M_t / MM) \cdot R \cdot T_{abs}$$

7)- Reacomodando tendremos la ecuación usada en el artículo anterior SN-208:

$$\rho \text{ (Masa/Volumen)} = M_t / V_t = \frac{MM \cdot P_{abs}}{R \cdot T_{abs}} = \frac{MM}{R \cdot T_{abs} / P_{abs}}$$

8)- donde “R”, en el Sistema de Unidades y Medidas “S.I.” es:

$$R = 0.08205 \cdot \frac{\text{Atm} \cdot \text{dm}^3}{^\circ\text{K}}$$
, con la masa “MM” expresada en Gramos.

9)- O sea:

$$\rho \text{ (Masa/Volumen)} = \frac{MM \text{ (gramos)}}{0.08205 \cdot T_{abs} / P_{abs} \text{ (dm}^3)}$$

Ing.ROBERTO FERNÁNDEZ BLANCO
(FSEE) FUNCTIONAL SAFETY EXPERT ENGINEER
rfflanco@dacs.com.ar
