



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS**

**L**as autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

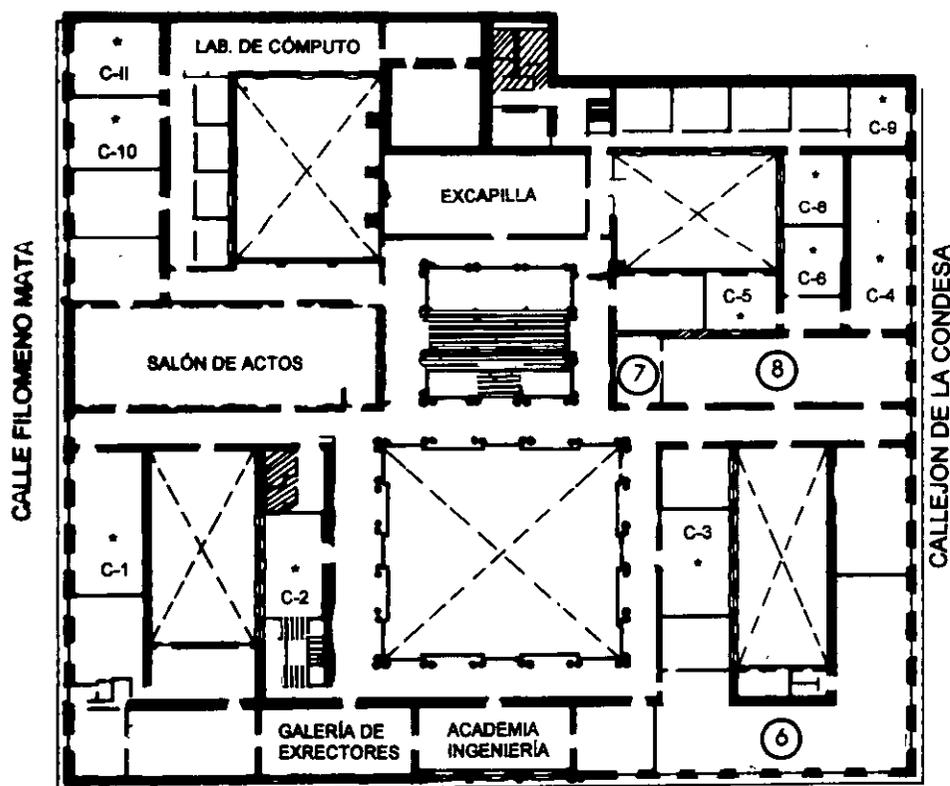
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

**Atentamente  
División de Educación Continua.**



# PALACIO DE MINERIA



**1er. PISO**

## GUÍA DE LOCALIZACIÓN

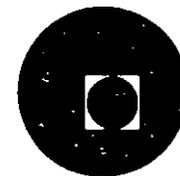
1. ACCESO
2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
3. LIBRERÍA UNAM
4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
6. OFICINAS GENERALES
7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
8. SALA DE DESCANSO

SANITARIOS

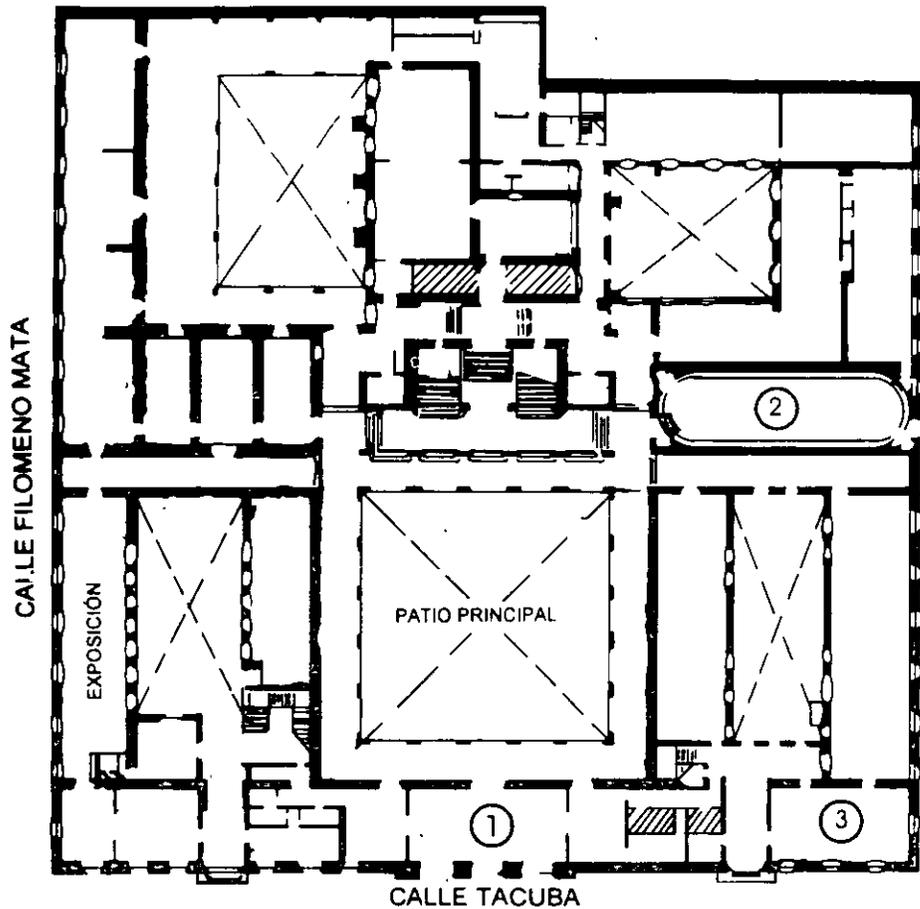
\* AULAS



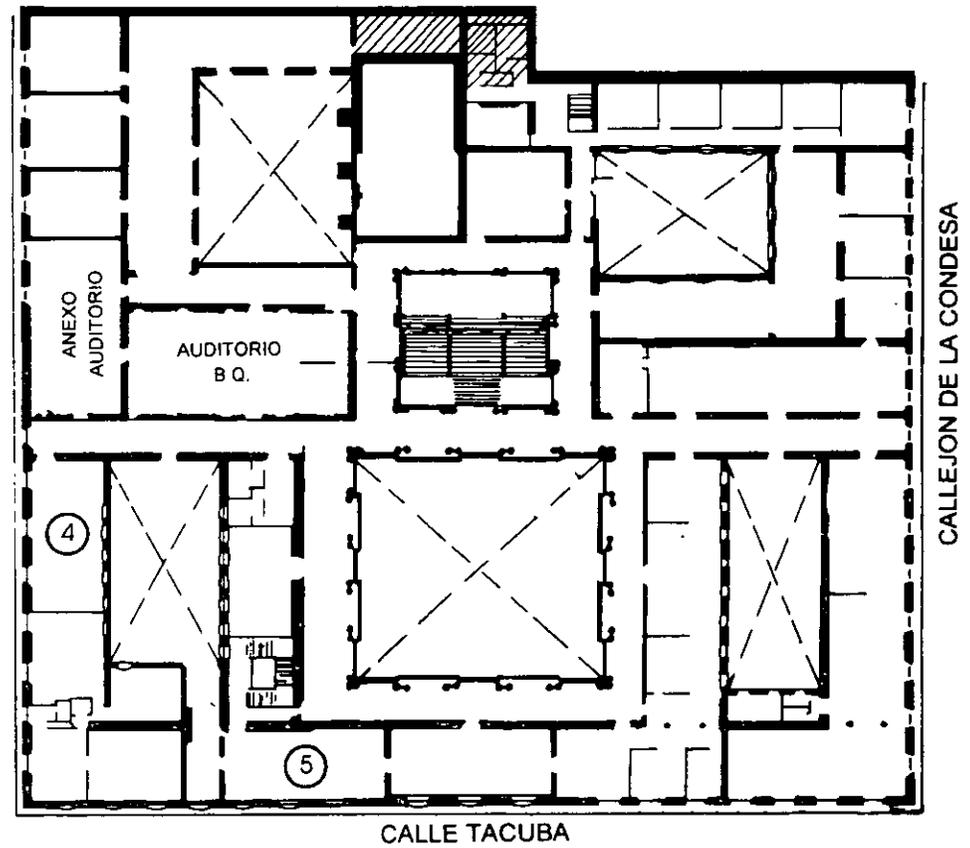
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA  
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.  
CURSOS ABIERTOS



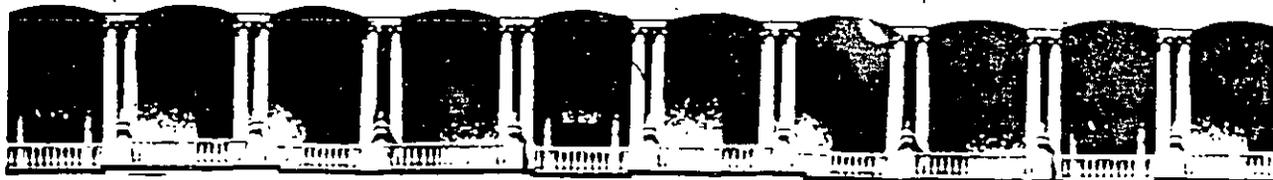
# PALACIO DE MINERIA



**PLANTA BAJA**



**MEZZANINNE**



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**DIPLOMADO EN INGENIERÍA DE CALDERAS Y  
RECIPIENTES SUJETOS A PRESIÓN**

**MODULO IV: INGENIERÍA DE COMBUSTIÓN  
E INSTALACIONES**

**TEMA:**

**COMBUSTIÓN, EMISIÓN Y REGLAMENTACIÓN**

**EXPOSITORES: ING. VICENTE LÓPEZ FERNÁNDEZ  
ING. ALFREDO SÁNCHEZ FLORES**

**PALACIO DE MINERÍA  
1997**



# **Combustión, Emisión y Reglamentación**

*Expositores:* **Ing. Vicente López Fernández**  
**Ing. Alfredo Sánchez Flores**

# COMBUSTION, EMISION Y REGLAMENTACION

ING. ALFREDO SÁNCHEZ FLORES

## CAPITULO 1 Combustibles, Clasificación y Características

### 1.1 Introducción a los combustibles

El desarrollo tecnológico del mundo ha dado pasos agigantados con la ayuda directa e indirecta de la quema de combustible de procedencia fósil, fundamentalmente. Han pasado alrededor de 100 años de la explotación del petróleo y tal parece que existe una urgencia para acabar con él. No obstante que existen otros combustibles como la biomasa y los carbones, los ojos de todos están concentrados hacia el petróleo y los gases naturales.

La sustancia denominada petróleo es un combustible líquido repartido en la envoltura sedimentaria de la Tierra. Su composición es una mezcla compleja de hidrocarburos y otros compuestos; es decir, de carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno.

Desde el punto de vista de su aspecto exterior es un líquido fluorescente y, en general, el color del petróleo es función de su contenido. El petróleo tiene un calor de combustión mayor que otros combustibles.

El origen del petróleo ha sido interpretado desde su procedencia orgánica hasta su procedencia inorgánica. Hoy en día, se discute de forma polémica tal cuestión y hasta se ha planteado la idea que el petróleo tiene origen cósmico o volcánico.

Actualmente, en todas partes del orbe, las prospectivas y explotación de yacimientos petrolíferos han tenido grandes éxitos. En forma intensiva se realiza la prospección de yacimientos en el mar, y, en particular, en la plataforma continental.

Las reservas mundiales de petróleo se estiman de 90 a 95 mil millones de toneladas, y las pronosticadas de 250 a 280 mil millones de toneladas. No obstante, algunos expertos proporcionan alrededor de 500 mil millones de toneladas.

Los yacimientos más grandes del mundo son: Arabia Saudita (15.7 mil millones de Toneladas); Kuwait (9.9 mil millones de Toneladas); Venezuela (5.9 mil millones de Toneladas); Irak (4.9 mil millones de Toneladas); Irán (2 mil millones de Toneladas); Chicontepec (1.6 mil millones de Toneladas); en Argelia y Estados Unidos de Norteamérica.

La explotación industrial del petróleo de las entrañas de la Tierra comienza en el Siglo XX. Su extracción tuvo un incremento sustancial de los años 1950 a 1975; sin embargo, en el período siguiente su ritmo de crecimiento bajó considerablemente.

México ocupa el 4º lugar del mundo en cuanto a extracción del petróleo, el cual se destina tanto a exportación como a consumo.

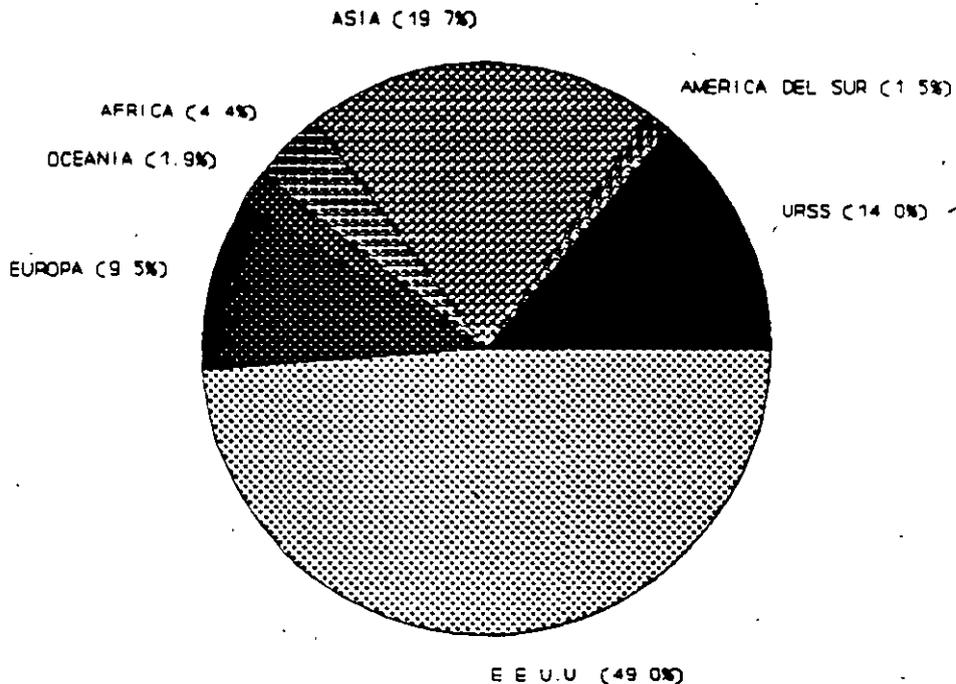


Figura 1.1

De las explotaciones de petróleo, 59% corresponde a los E.E.U.U.; 16% a España; 12% a Europa; 9% al lejano Oriente; el 3% a América y 1% a otros países.

De esta forma la importancia del petróleo en el ámbito energético, el transporte y las diferentes ramas industriales es preponderantemente enorme. Del petróleo se producen casi todos los tipos de combustibles líquidos (gasolina, diesel, turbina de gas y generadores de vapor), aceites lubricantes y combustóleo y otros productos comerciales.

Los gases combustibles naturales se componen generalmente de metano, etano, propano y butano e impurezas de hidrocarburos líquidos.

Las reservas probadas mundiales de gas natural se estiman de 86 billones de metros cúbicos y se pronostican en 120 billones de metros cúbicos.

El gas natural se ocupa ampliamente como combustible en centrales termoeléctricas, en la industria metalúrgica, del cemento y vidrio y para usos varios y domésticos.

Los carbones combustibles se ocupan de una forma muy limitada no obstante que representan un enorme potencial, ya que sus reservas probadas son mucho más abundantes que cualesquier otro energético convencional. Las objeciones principales para su consumo a gran escala son su alto contenido de cenizas y azufre, sumado a su complicado proceso de preparación. Además, bien se sabe que un combustible sólido proporciona una combustión ineficiente.

En México opera escasamente una Central Eléctrica que quema carbón combustible.

Por su parte, los componentes principales del petróleo son el carbono y el hidrógeno. Sus porcentajes másicos promedio corresponden del orden de 85% para el carbono y 12.5% para el hidrógeno. El petróleo en sí, por su alto contenido de hidrógeno ocupa un sitio importante entre los minerales combustibles.

Todos los petróleos contienen además azufre, oxígeno y nitrógeno. La fracción másica de nitrógeno anda entre 0.001 a 0.3% y el oxígeno oscila dentro de los límites de 0.1 a 1.0%.

Por otro lado, los petróleos varían de forma considerable en cuanto a contenido de azufre. Abundan los petróleos con un contenido de azufre superior a 2%. El petróleo mexicano figura mundialmente entre los más azufrados (del 3.65 al 5.3%).

Aunque en cantidades muy pequeñas, los petróleos tienen algunos metales como: vanadio, níquel, hierro, mangnesio, cromo, titanio, cobalto, potasio, calcio, sodio y otros. También contienen fósforo y silicio. En algunos derivados del petróleo se han encontrado germanio del orden de 0.17 g/t.

## **1.2 Definiciones y propiedades de combustibles**

### **1.2.1 Definición de combustible**

Se da el nombre de combustible a una sustancia que se quema intencionalmente para obtener energía calorífica. Su aprovechamiento debe ser tecnológico y económicamente racional.

En particular el combustible tradicional (conformado por carbono e hidrógeno) debe ser capaz de experimentar el proceso de combustión, es decir, de combinarse con oxígeno en reacciones químicas exotérmicas.

Los combustibles que se usan regularmente en calderas y generadores de vapor son el carbón (en casos muy limitados), el gas natural y gases y líquidos derivados del petróleo.

Los combustibles derivados del petróleo se pueden clasificar en:

- a) Productos destilados: Gas natural, Gas L.P. y diesel
- b) Productos residuales: Combustóleo

### 1.2.2 Características de los combustibles

Con fundamentos en las características de los combustibles es posible tener la elección más apropiada para ciertos tipos de aplicaciones. Las características son, entre otras: composición química, poder calorífico, viscosidad, calor específico, temperatura de inflamación, escurrimiento y de flama.

La composición química de los combustibles sólidos y líquidos se mide en fracciones másicas. Entonces, de acuerdo a su composición elemental se cumple:

$$c + h + o + s + n + w + z = 1 \text{ (ó 100\%)} \quad (1.1)$$

donde:

$c, h, o, s, n, w$  y  $z$  representan las fracciones másicas de carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre, nitrógeno, humedad y cenizas respectivamente.

La Tabla 1.1 proporciona datos sobre la composición y características de combustibles sólidos y la Tabla 1.2 trata sobre combustibles líquidos.

Por ejemplo, la composición elemental para el combustible diesel es de  $c = 0.80$  y  $h = 0.20$  (aproximadamente).

En el caso de gases combustibles, se ocupan las fracciones molares o fracciones volumétricas para describir su composición. Es decir, un cierto gas natural, por ejemplo, se especifica por:

$$r_{CH_4} + r_{C_2H_6} + r_{H_2} + r_{N_2} = 1 \text{ (ó 100\%)} \quad (1.2)$$

donde:

$r_{CH_4}, r_{C_2H_6}, r_{H_2}, r_{N_2}$  son las fracciones molares del metano, etano, hidrógeno y nitrógeno (respectivamente).

En ocasiones se suele manejar las fracciones másicas  $x$ , para los gases combustibles. En el apéndice 2 vienen los formularios para la determinación de características de mezclas gaseosas inertes. La Tabla 1.3 indica algunas características de gases combustibles simples.

**Tabla 1.1 Composición y poderes Caloríficos de combustibles Sólidos**

Combustible	z*	w*	**Combustible Seco y sin cenizas					Poder calorífico en (kJ/kg)	
			C	H <sub>2</sub>	S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Superior	Inferior
Madera	< 0.5	10-20	50-60	6	0	43.9	0.1	15817-17910	14654-16747
Leña	< 15	15-35	50-60	4.5-6	0.3-2.5	30-40	1-4	13723-16282	11630-15119
	2-8	50-60		5-8	0.5-4	15-26	0.5-2	10463-13026	8374-11397
Leña de piquetas	4-10	12-18	65-75	5-8	0.5-4	15-26	0.5-2	20934-21399	19771-20236
Carbón	3-12	0-10	80-90	4-6	0.7-1.4	4-12	0.6-2	29308-35123	27214-34192
Antracita	2-6	0-5	90-94	3-4	0.7-1	0.5-4	1-1	33494-34657	32564-33959
Coque	8-10	1-7	97	0.4-0.7	0.6-1	0.5-1	1-1.5	28145-30471	27912-30471

\*Valores en % en masa de cenizas (z) y humedad (w)

\*\*Valores en % en masa de carbono (C), hidrógeno (H<sub>2</sub>), azufre (S), oxígeno (O<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>)

Tabla 1.2 Combustibles Líquidos y Combustión

Combustible	M (kg/kmol)	% en masa		$\sigma$	$\rho$ 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	$t_{\text{mli}}$ (°C)	Poder calorífico (kJ/kg)		Combustión completa (Nm <sup>3</sup> /kg)		Gases de combustión (Nm <sup>3</sup> /kg)	
		C	H <sub>2</sub>				Superior	Inferior	O <sub>min</sub>	X <sub>min</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Alcohol etílico C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	46.1	52	13	1.50	796	78.5	29889	26958	1.45	6.90	0.97	1.46
Alcohol etílico al 95%	-----	-----	-----	1.50	809	78.6	28214	25284	1.38	6.57	0.92	1.45
Alcohol etílico al 90%	-----	-----	-----	1.50	823	78.7	26749	23865	1.31	6.23	0.87	1.44
Alcohol etílico al 85%	-----	-----	-----	1.50	836	78.9	25237	22353	1.24	5.90	0.83	1.42
Benceno (puro) C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.1	92.2	7.8	1.25	884	80.2	41868	40147	2.16	10.28	1.72	0.87
Tolueno (puro) C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.1	91.2	8.8	1.285	891	110.8	42752	40821	2.20	10.47	1.70	0.99
Xileno (puro) C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106	90.5	9.5	1.313	870	139	43008	40779	2.22	10.57	1.69	1.06
Benceno comercial I'	-----	92.1	7.9	1.26	883	-----	41868	40193	2.16	10.28	1.72	0.89
Benceno comercial II''	-----	91.6	8.4	1.30	876	-----	42287	40403	2.18	10.38	1.71	0.94
Naftaleno puro C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> (temp. fusión 80 °C)	128	93.7	6.3	1.20	***	218	40356	38937	2.10	10.00	1.75	0.71
Tetralina (pura) C <sub>10</sub> H <sub>12</sub>	132	90.8	9.2	1.30	975	205	42868	40821	2.20	10.47	1.70	1.03
Pentano C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.1	83.2	16.8	1.60	626	36	49195	45427	2.49	11.86	1.55	1.88
Hexano C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.1	83.6	16.4	1.584	658	68.7	48358	44659	2.48	11.81	1.56	1.84
Heptano C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100	83.9	16.1	1.571	682	98.4	47985	44380	2.47	11.76	1.56	1.79
Octano C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114	84.1	15.9	1.562	702	125	48148	44589	2.46	11.71	1.57	1.78
Petróleo (promedio)	-----	85	15	1.53	700 a 740	60 a 120	46055	42705	2.43	11.57	1.59	1.68

0.84 de benceno, 0.13 de tolueno y 0.03 de xileno

0.41 de benceno, 0.46 de tolueno y 0.11 de xileno

977 a 10 °C y 1152 a 15 °C

φ se conoce también como tetrahidronaftaleno.

**Tabla 1.3 Combustión de gases simples**

Gas	Símbolo	M <sub>m</sub> Molecular [kg/kmol]	σ	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>		Poder calorífico [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	
				O <sub>min</sub>	X <sub>min</sub>	Superior	Inferior
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	2.016	0	0.5	2.38	12798	10788
Monóxido de carbono	CO	28.00	0.50	0.5	2.38	12626	12626
Metano	CH <sub>4</sub>	16.03	2.00	2.0	9.52	39682	35662
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.05	1.75	3.5	16.7	69679	63649
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.06	1.67	5.0	23.8	106755	98715
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.08	1.625	6.5	31.0	128180	118130
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.03	1.50	3.0	14.3	64463	60443
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.05	1.50	4.5	21.4	93228	87198
Butileno o Buteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.06	1.50	6.0	28.6	121846	113806
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.02	1.25	2.5	11.9	67183	67173

Reacciones Químicas	
$CH_4 + 2O_2 - CO_2 + 2H_2O$	$C_2H_4 + 3O_2 - 2CO_2 + 2H_2O$
$C_2H_6 + 3\frac{1}{2}O_2 - 2CO_2 + 3H_2O$	$C_3H_8 + 4\frac{1}{2}O_2 - 3CO_2 + 4H_2O$
$C_3H_8 + 5O_2 - 3CO_2 + 4H_2O$	$C_4H_8 + 6O_2 - 4CO_2 + 4H_2O$
$C_4H_{10} + 6\frac{1}{2}O_2 - 4CO_2 + 5H_2O$	$C_2H_2 + 2\frac{1}{2}O_2 - 2CO_2 + H_2O$

Para convertir a [kg/m<sup>3</sup>] multiplíquese por (22.41/M)  
 donde: M es la masa molecular y  
 22.41 es el volumen normal molar

## Poder calorífico

Se denomina *poder calorífico* a la cantidad de energía calorífica que se desprende al quemar totalmente 1 kg de combustible sólido, líquido o gaseoso. En forma práctica el poder calorífico se da para la unidad de masa, o, en el caso de gases combustibles se expresa para un metro cúbico llevado a condiciones normales de operación (1.01325 bar de presión y 0 °C).

Generalmete, los poderes caloríficos de los combustibles refieren a una combustión sometida a presión atmosférica normal y a una temperatura de todas las sustancias a 0 °C, antes y después de la combustión.

Debido a que después de la combustión existe vapor de agua, se puede definir *Poder Calorífico Superior (PCS)* a aquel calor de combustión que incluye el calor de condensación de dicho vapor de agua. En el *Poder Calorífico inferior (PCI)* se considera al agua en forma de vapor. Entonces para 1 kmol de H<sub>2</sub>, resulta:

$$PCS - PCI = M_{H_2O} \cdot r_o = 45040 \text{ [kJ/kmol]} \quad (1.3)$$

donde:

$M_{H_2O}$  es la masa molecular del agua que numéricamente es 18 [kJ/kmol]

$r_o$  es el calor latente de vaporización del agua a 0 °C

En la Tabla 1.4 se proporcionan los poderes caloríficos del carbono, hidrógeno, azufre y monóxido de carbono expresado en diferentes versiones.

En el caso de combustibles que contienen humedad, la diferencia entre los Poderes Caloríficos Superior e Inferior debe incluir el Calor Latente de esta humedad así como la formada por la combustión. Por tanto, se puede usar la relación siguiente:

$$PCI = PCS - 2500(9h + w) \text{ [kJ/kg]} \quad (1.4)$$

donde:

$h$  y  $w$  son los porcentajes o fracciones másicas del hidrógeno y la humedad de la composición elemental del combustible, respectivamente.

El poder calorífico de mezclas combustibles se obtiene determinando el calor que libera cada componente como si se quemara separadamente y sumando los resultados parciales. Esto no puede aplicarse al caso de compuestos químicos debido a que están en juego los calores de formación. En el caso de la mayoría de los combustibles sólidos y líquidos comúnmente usados en la práctica dicha cantidad es despreciable por lo que el Poder Calorífico puede estimarse mediante fórmulas empíricas.

**Tabla 1.4 Poderes caloríficos en [ ] a 0 °C y 101325 Pa**

	C*	H <sub>2</sub>		CO	S
		Superior	Inferior		
por kmol	406957	286796	241756	282944	296677
por kg.	33913	142260	119919	10105	9271
por Nm <sup>3</sup>	18160	12798	10788	12626	13239

\* Combustión completa

Si se conoce la composición del combustible se puede determinar el Poder Calorífico para sólidos y líquidos según la expresión de Dulong & Petit y la Asociación de Ingenieros Alemanes (VDI).

$$PCI = 34.013c + 125.6h - 10.9(o-s) - 2.5(9h + w) \quad (1.5)$$

donde:

PCI se expresa en [MJ/kg] y *c*, *h*, *o* y *s* son las fracciones máxicas de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre, respectivamente.

Para el caso de gases combustibles el poder calorífico se encuentra por la relación:

$$PC_m = \sum_{i=1}^n PC_i \cdot r_i \quad (1.6)$$

donde:

*PC<sub>m</sub>* es el Poder Calorífico de la mezcla y se expresado en [MJ/Nm<sup>3</sup>];  
*PC<sub>i</sub>* es el Poder Calorífico del *i*ésimo gas combustible expresado en [MJ/Nm<sup>3</sup>] y

*r<sub>i</sub>* es la fracción molar correspondiente al *i*ésimo componente.

\* quiere decir = por metro cúbico normal

La temperatura de escurimiento es aquella a la cual el combustible empieza a fluir; en cambio; la temperatura de inflamación es aquella en que el combustible desprende suficiente cantidad de vapores que al mezclarse con el aire forman una mezcla inflamable.

La temperatura adiabática de flama es aquella a la cual se manifiesta teóricamente la flama. Resulta importante conocer este valor para poder establecer los balances térmicos en cada parte componente de las calderas y generadores de vapor

Otras características de combustibles lo son: el contenido de azufre, cenizas y humedad.

El contenido de azufre es un valor determinante ya que los combustibles mexicanos tienen altos contenido de azufre. Con ello, se está perjudicando el ámbito ecológico y, en un caso dado, al equipo.

A mayor contenido de cenizas de un combustible más de éste no se ha aprovechado. Este es el caso palpable del carbón-combustible de Coahuila.

Mientras más humedad contenga un combustible mayor manejo de gases de combustión se presenta y se desperdicia combustible.

Otra última característica de un combustible es su calor específico, ya que conocerlo facilita el dimensionamiento de equipos de precalentamiento.

Por ejemplo, el calor específico del combustible diesel anda del orden de 2.09 kJ/kgK, mientras que para los combustibles son de aproximadamente del rango de 1.67 a 2.51 kJ/kgK.

### **1.3 Tipos de combustibles**

Los combustibles usados en México en calderas y generadores de vapor son: combustóleo, diesel, gas natural, gas L.P. y carbón combustible.

#### **1.3.1 Combustóleo**

El combustóleo es un combustible pesado que procede de los residuos obtenidos de la refinación del petróleo crudo.

Este combustible es probablemente el de mayor uso en calderas y generadores de vapor en México, tanto en industria en general como en el sector eléctrico y petrolero. Sus desventajas importantes son su alto contenido de azufre y vanadio, los cuales son dañinos desde los puntos de vista del deterioro de equipo y del medio ambiente. En las denominadas zonas metropolitanas del país se ha prohibido su uso por cuestiones de tipo ecológico y ha sido substituido el combustóleo por otros combustibles de muy poca oferta, como el gas natural.

Debe entenderse que la composición del combustóleo varía de región a región, razón por la cual debe de llevarse un registro local de sus características. Con ello, los equipos deben cambiar su comportamiento termodinámico al operar con diferentes composiciones. En la Tabla 1.5 se dan algunos datos de laboratorio de combustóleo

**Tabla 1.5 Propiedades del Combustóleo (composición)**

Composición másica	
Azacapotzalco (benigno)	Minatitlán
C = 85.73%	C = 82.80%
H <sub>2</sub> = 10.72%	H <sub>2</sub> = 10.40%
S = 3.50%	N <sub>2</sub> = 2.97%
H <sub>2</sub> O = 0.03%	O <sub>2</sub> = 0.20%
O <sub>2</sub> = 0.02%	S = 2.93%
	Z = 0.40%
	w = 0.30%

PCI = 46298 kJ/kg

Valores estadísticos de propiedades del combustóleo según PEMEX

C = 84.9% ± 1.1	Z = 0.05 ± 0.01
H <sub>2</sub> = 10.9% ± 0.7	Vanadio ppm = 184
N <sub>2</sub> = 0.41% ± 0.10	PCI = 42412 kJ/kg
S = 3.4% ± 0.40	Temperatura de inflamación = 95°C ± 12

### 1.3.2 Diesel combustible

Este combustible es ampliamente usado en calderas de pequeña y mediana capacidad. Dadas sus características el combustible diesel es de fácil manejo y proceso de quema (combustión) resulta muy controlable, respecto del combustible combustóleo.

En su composición estadística media se puede observar su bajo contenido de azufre y su mayor contenido de humedad. Sin embargo difiere y levemente, respecto del combustóleo, su poder calorífico. Seguramente por ello se ha adoptado el uso de una mezcla de combustibles denominada Gas-oil, la cual tiene su proporción másica de:

80 % diesel  
20 % combustóleo

Con ello se propicia una mejor combustión que prueba los estándares ecológicos. Además del ser un combustible barato. En la Tabla 1.6 se ilustra la composición de un diesel típico.

**Tabla 1.6 Características del diesel combustible**  
**Composición másica**

**C = 84.60%**  
**H<sub>2</sub> = 9.70%**  
**S = 2.70%**  
**N<sub>2</sub> = 1.00%**  
**w = 1.50%**  
**O<sub>2</sub> = 0.0%**  
**Z = 0.50%**  
 Temperatura de escurimiento:  
 0 °C Nov. a Feb.  
 5 °C Mar. a Oct.  
 Temperatura de inflamación = 52 °C  
 PCI (medio) = 44790 kJ/kg

### 1.3.3 Gas natural

Este combustible gaseoso es muy bien estimado en el ámbito de calderas y generadores de vapor debido a que propicia una correcta combustión al no poseer azufre ni cenizas.

El motivo por el cual no se hace extensivo su uso es porque su oferta es muy limitada y se expende solamente en determinadas zonas del país.

El gas natural está compuesto básicamente por metano, etano y bióxido de carbono y otros gases. Es obvio que sus composición varían en función del yacimiento. En seguida se dan en la Tabla 1.7 datos precisos de composición de gas natural de diferentes zonas.

**Tabla 1.7 Características del Gas Natural**  
**Composición molar**

Cadereyta, N.L.	Petroquímica Camargo
H <sub>2</sub> = 10.80%	CH <sub>4</sub> = 83.32%
CH <sub>4</sub> = 76.30%	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> = 9.40%
CO <sub>2</sub> = 0.60%	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> = 2.30%
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> = 6.00%	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> = 0.40%
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> = 2.30%	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> = 0.30%
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> = 0.10%	CO <sub>2</sub> = 0.69%
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> = 0.70%	N <sub>2</sub> + Ar = 3.59%
otros = 3.20%	

**Datos adicionales:**

$H_2S = 17 \text{ ppm}$

$PCI = 35755 \text{ kJ/Nm}^3 \text{ (promedio)}$

### 1.3.4 Combustible Gas L.P.

Este gas combustible tiene su mayor uso para aplicaciones domésticas, aunque algunas industrias ya lo ocupan para calderas y generadores de vapor. Su uso resulta también atractivo debido a su alta eficiencia de combustión y su poder calorífico alto.

Se compone básicamente de gases simples como propano y butano. Su composición exacta la proporciona la planta que lo de a.

La Tabla 3.8 indica un análisis cromatográfico un gas L.P. a la Zona Metropolitana de la Cd. de México.

**Tabla 3.8 composición detallada de gas L.P**  
**Composición másicas**

Etano $CH_4$	0.02%
Etano + etileno $C_2H_6$	0.44%
Propano $C_3H_8$	45.57%
Propileno $C_3H_6$	0.05%
iso-Butano $C_4H_{10}$	14.11%
n-Butano $C_4H_{10}$	34.25%
1-Buteno $C_4H_8$	0.37%
iso-Buteno $C_5H_{10}$	0.06%
iso-Pentano $C_5H_{12}$	2.82%
otros	2.31%

## **CAPITULO 2 Combustión estequiométrica y aire para la combustión**

### **2.1 Definiciones**

En cualquier instante y lugar el oxígeno se combina con otros elementos. Este es un proceso clásico de oxidación. Interesa estudiar aquí a fondo un proceso muy particular de oxidación; esto es, la combustión.

#### **COMBUSTION**

Se define como combustión a aquél proceso de oxidación rápida, en el cual el oxígeno reacciona con materiales combustibles para producir energía calorífica, generalmente en forma de gases de alta temperatura.

La gran mayoría de la energía calorífica utilizada por la humanidad, se produce por la ignición de combustibles sólidos, líquidos ó gaseosos con oxígeno contenido en el aire atmosférico, formando productos gaseosos durante el proceso. Los explosivos y ciertos combustibles no requieren aire para realizar la combustión, ya que el oxígeno necesario se encuentra químicamente ligado a ellos.

#### **Combustión Teórica ó Estequiométrica**

La combustión se denomina teórica o estequiométrica -conocida como completa- cuando todo el combustible se ha oxidado al máximo para producir  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{SO}_2$ .

Si la combustión es incompleta, los productos de la combustión poseen sustancias todavía capaces de ser oxidados como cenizas, hollín ó gases combustibles como el  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y otros hidrocarburos. En este caso, no queda oxígeno libre. El propósito que se persigue en una buena combustión es evitar que ésta sea incompleta, ya que se relaciona a las pérdidas de combustible, energía y contaminación ambiental.

#### **Combustión con Exceso de Oxígeno**

La combustión real exige un exceso de oxígeno para llevar a cabo en forma completa la química de la combustión. Esto es, el combustible requiere una cantidad extra de oxígeno de la calculada en forma estequiométrica. En el uso cotidiano se suele manejar con el calificativo de "exceso de aire".

El exceso de aire se justifica por existir dificultad para lograr el contacto perfecto entre las moléculas de oxígeno, del aire, y los elementos constitutivos del

combustible a ser oxidados. Se dice también que el exceso de aire sirve para incrementar la probabilidad de choque de ambos participantes.

Esto quiere decir que el exceso de aire asegura una combustión completa y, por ende, evita la generación de productos indeseables característicos de la combustión incompleta.

Más sin embargo, los exagerados excesos de aire en Generadores de Vapor motivan deterioros en las eficiencias Termodinámicas, sumados a otras consecuencias importantes de orden ecológico.

En términos reales, y estrictamente hablando, es obvio aclarar que no existen combustiones estequiométricas aun con excesos de aire apropiados. Siempre se presentan como productos de combustión algunos compuestos gaseosos semioxidados; claro está, en pequeñas proporciones. Véase Figura(2.1).

Oxígeno		Carbono		CO <sub>2</sub>
				CO
				SO <sub>x</sub>
				O <sub>2</sub>
Nitrógeno	+	Hidrógeno	=	NO <sub>x</sub>
		Azufre		
		Oxígeno		
Vapor de agua		Nitrógeno		H <sub>2</sub> O
		Cenizas		Cenizas
		Agua		Desechos
				C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>

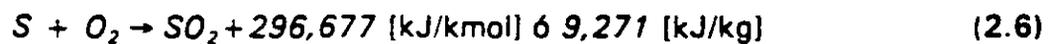
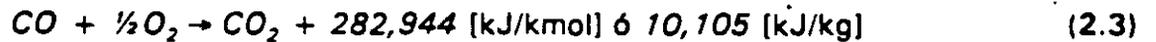
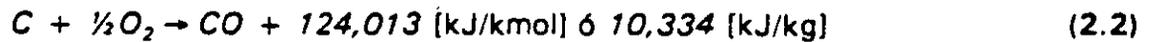
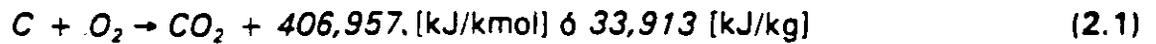
Aire suministrado	+	Combustible	=	Productos
-------------------	---	-------------	---	-----------

Figura 2.1

## 2.2 Ecuaciones Estequiométricas de combustión

De acuerdo a los conceptos de análisis químico es posible establecer las ecuaciones estequiométricas de mayor interés aplicado a un cierto combustible. En estas ecuaciones, el primer miembro contiene los reactantes, representados por el componente sujeto a oxidación más el oxidante, ambos dispuestos para la combustión, y el segundo miembro, los productos o gases generados, formados por la combustión más los poderes caloríficos.

Los principales componentes de todo combustible orgánico ó hidrocarburo son: carbono (C) e hidrógeno ( $H_2$ ); además, el azufre (S) puede estar presente en pequeñas cantidades. Entonces, la mayor parte de los procesos de combustión se pueden circunscribir a las siguientes ecuaciones básicas:



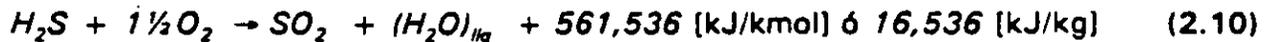
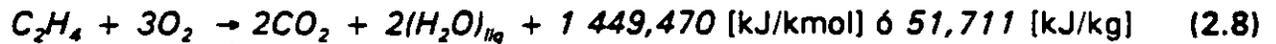
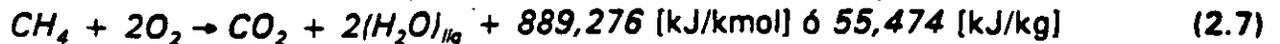
en dichas ecuaciones:

- $O_2$  representa 32 kg de oxígeno;
- $CO_2$  representa 44 kg de bióxido de carbono;
- $H_2$  representa 2 kg de hidrógeno y
- S representa 32 kg de azufre.

En los casos del carbono (C) y el azufre (S), que evidentemente son sólidos, se ocupan los pesos atómicos ya que el número de átomos en la molécula resulta incierto. Cuando se forma agua en la combustión, su estado final, ya sea líquido o vapor, se han indicado con un subíndice.

Debido a que un kilomol [kmol] (por ejemplo) de cualquier gas ocupa el mismo volumen a las mismas condiciones de temperatura y presión, el volumen de  $CO_2$  producido por la combustión de carbono es igual al volumen del oxígeno consumido bajo las mismas condiciones. Si se desprecia el volumen de carbono sólido, entonces no ocurre variación en el volumen durante el proceso de combustión. Lo mismo pasa para otros combustibles sólidos como azufre, por ejemplo. Entonces, la combustión del carbono en monóxido de carbono (CO) da un incremento de volumen en 0.5; en cambio, la combustión del CO y  $H_2$  experimentan un decremento en el volumen de 1.5 kmol de reactantes a 1 kmol de productos de combustión.

Si se analizan, para el caso de algunos gases, las ecuaciones:



Se puede observar que, por ejemplo, en los casos del metano ( $\text{CH}_4$ ) y del etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) no existe cambio en el volumen después de la combustión. En el caso del etano y todos los hidrocarburos con más de cuatro átomos de hidrógeno, se presenta un incremento de volumen en sus productos.

Las cantidades indicadas en las ecuaciones anteriores consideran los reactantes (combustible y comburente) inicialmente a  $0^\circ\text{C}$  y los productos de la combustión finalmente enfriados hasta  $0^\circ\text{C}$ .

### 2.3 Oxígeno y aire necesario para la combustión y sus productos, caso combustibles sólidos y líquidos.

Generalmente en textos tradicionales y en manuales de ingeniería se presentan ecuaciones para el cálculo del oxígeno y aire necesario para la combustión, cuya procedencia se ignora y hasta parecen fórmulas empíricas. En esta sección se deducirán las ecuaciones correspondientes, paso por paso, por los cálculos másicos y molares.

#### 2.3.1 Análisis másico

Para este análisis se requiere, obviamente, conocer la composición másica del combustible, en cuanto a carbono (C), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y azufre (S).

Tomando el caso de combustión completa, la ecuación para el carbono resulta:



Lo cual expresado en términos de sus masas moleculares queda:

$$12 \text{ kg de C} + (2 \times 16) \text{ kg de O}_2 = 44 \text{ kg de CO}_2$$

o también para 1 kg de carbono da:

$$1 \text{ kg de C} + (2 \times 16) / (12) \text{ kg de O}_2 = 44 / 12 \text{ kg de CO}_2$$

o es lo mismo:

$$1 \text{ kg de C} + 8 / 3 \text{ kg de O}_2 = 11 / 3 \text{ kg de CO}_2 \quad (2.12a)$$

ó

$$1 \text{ kg de C} + 2.67 \text{ kg de O}_2 = 3.67 \text{ kg de CO}_2 \quad (2.12b)$$

Para el caso de combustión incompleta aplicada al carbono:



en términos de masas moleculares:

$$(2 \times 12) \text{ kg de C} + (2 \times 16) \text{ kg de O}_2 = (2 \times 28) \text{ kg de CO}$$

también:

$$1 \text{ kg de C} + (2 \times 16) / 24 \text{ kg de O}_2 = (2 \times 28) / 24 \text{ kg de CO}$$

ó

$$1 \text{ kg de C} + 4 / 3 \text{ kg de O}_2 = 7 / 3 \text{ kg de CO} \quad (2.14a)$$

y

$$1 \text{ kg de C} + 1.33 \text{ kg de O}_2 = 2.33 \text{ kg de CO} \quad (2.14b)$$

la oxidación posterior para el CO resulta:



o bien

$$(2 \times 28) \text{ kg de CO} + (2 \times 16) \text{ kg de O}_2 = (2 \times 44) \text{ kg de CO}_2$$

seguido de lo anterior

$$1 \text{ kg de CO} + 4 / 7 \text{ kg de O}_2 = 11 / 7 \text{ kg de CO}_2 \quad (2.15b)$$

ó

$$1 \text{ kg de CO} + 0.57 \text{ kg de O}_2 = 1.57 \text{ kg de CO}_2 \quad (2.15c)$$

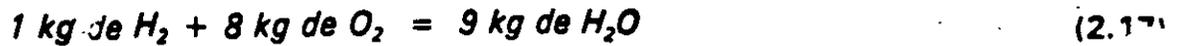
El hidrógeno, como componente importante, forma agua según su ecuación estequiométrica.



o bien:

$$(2 \times 2) \text{ kg de H}_2 + (2 \times 16) \text{ kg de O}_2 = (2 \times 18) \text{ kg de H}_2O$$

o sea:



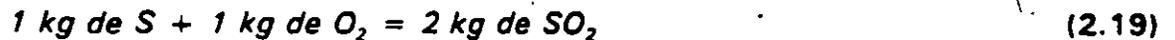
Por último, para el azufre, contenido en el combustible, queda la ecuación:



o lo que es lo mismo:



o sea



En síntesis, para una combustión completa de:

1 kg de carbono se necesitan 2.67(8/3) kg de  $O_2$

1 kg de hidrógeno se necesitan 8 kg de  $O_2$

1 kg de azufre se necesita 1 kg de  $O_2$

Por tanto, la cantidad mínima o estequiométrica de oxígeno para un kilogramo de combustible sólido o líquido, dada su composición másica de c, h y s, queda determinada por:

$$O_{min} = 8/3c + 8h + s - o$$

$$ó \quad \quad \quad [kg_{O_2}/kg_c] \quad (2.20)$$

$$O_{min} = 2.67c + 8h + s - o$$

donde:

$o$  es la fracción másica de oxígeno ya contenido en el combustible.

Las unidades de la ecuación (2.20) indican kilogramos de oxígeno por cada kilogramo de combustible. Esta ecuación puede estar expresada en unidades de volumen de la siguiente forma:

$$O_{min} = (8/3c + 8h + s - o)/\rho_{O_2} [Nm^3/kg_c] \quad (2.21)$$

donde:

$\rho_{O_2}$  1.429 kg/Nm<sup>3</sup> es la densidad del oxígeno en condiciones normales de presión y temperatura. Frecuentemente se refieren las condiciones de combustión a estos parámetros normales; sin embargo, para ciertas condiciones de operación de equipos de combustión, el oxígeno mínimo en unidades de volumen se determina con la densidad correspondiente.

Tomando en cuenta que el oxígeno se encuentra en el aire atmosférico en 23%, fracción másica, y 21%, fracción molar, las ecuaciones (2.20) y (2.21) se transformarán en aire mínimo para la combustión. Esto es:

$$X_{min} = O_{min} / 0.23$$

$$X_{min} = (8/3c + 8h + s - o) / 0.23 \quad [\text{kg}_a/\text{kg}_c] \quad (2.22)$$

o también:

$$X_{min} = O_{min} / 0.21$$

$$X_{min} = (8/3c + 8h + s - o) / [(1.429)(0.21)] \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}_c] \quad (2.23)$$

donde:

$X_{min}$  es el aire mínimo y estequiométrico necesario para la combustión y se expresa en kilogramos o metros cúbicos normales de aire por cada kilogramo de combustible.

Las proporciones másicas y molares tomadas aquí son valores aproximados y son apropiados para los niveles de Ingeniería.

En la Tabla (2.1) se dan, en forma detallada, las composiciones másicas y molares (volumétricas) del aire atmosférico.

Elemento	Fracción másica $x_i$	Fracción molar $\Gamma_i$
N <sub>2</sub>	0.7547	0.7803
O <sub>2</sub>	0.2320	0.2099
A	0.0128	0.00933
CO <sub>2</sub>	0.00046	0.00030
H <sub>2</sub>	0.00001	0.00010
Ne	0.000012	0.000018
He	0.0000007	0.000005
Kr	0.000005	0.000001
X	0.0000004	0.0000009

Tabla 2.1 Composición del aire atmosférico

### 2.3.2 Análisis molar

En forma alterna se pueden encontrar expresiones anteriores suponiendo entidades molares. Es decir:

1 kmol de C (o sea 12 kg) necesita para su combustión 1 kmol de O<sub>2</sub> (o sea 32 kg);  
 1 kmol de H<sub>2</sub> (o sea 2 kg) necesita para su combustión ½ kmol de O<sub>2</sub> (o sea 16 kg)  
 y 1 kmol de S (o sea 32 kg) necesita para su combustión 1 kmol de O<sub>2</sub> (o sea 32 kg)

Sumando las necesidades de oxígeno, se tiene

$$O_{mn} = \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \quad \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right] \quad (2.24a)$$

o también:

$$O_{mn} = \frac{1}{12} \left[ \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right] \quad \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right] \quad (2.24b)$$

puesto que el volumen normal molar es:

$v_N = 22.41 \text{ Nm}^3/\text{kmol}$ , el volumen de oxígeno requerido será:

$$O_{mn} = 22.41 \left[ \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right] \quad \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_c} \right] \quad (2.25a)$$

ó

$$O_{mn} = \frac{22.41}{12} \left[ c + 3 \left( h - \frac{o - s}{8} \right) \right] \quad \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad (2.25b)$$

$$O_{mn} = 1.8675 \sigma \quad (\text{Nm}^3/\text{kg}_c) \quad (2.25c)$$

donde:

$$\sigma = 1 + \frac{3}{c} + \left( h - \frac{o - s}{8} \right) \quad (2.26)$$

Es el primer coeficiente característico de Mollier que representa la relación del oxígeno requerido por el combustible a el oxígeno requerido para quemar carbón solamente, ó como la relación del oxígeno requerido por el combustible a el contenido de carbono, ambos medidos en [kmol] o en [Nm<sup>3</sup>]. Cuando se trata de gases, el contenido de carbono se encuentra en los compuestos como CO, CO<sub>2</sub>, etc.

Ahora, multiplicando la ecuación (2.24a) por la masa molecular del oxígeno,  $M_{O_2} = 32 \text{ kg/kmol}$ ,

$$O_{\min} = 32 \left[ \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right] \left[ \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg}_c} \right]$$

$$O_{\min} = \frac{3}{8} c + 8h + s - o \left[ \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg}_c} \right]$$

que resulta la ecuación (2.21).

De igual forma, el aire mínimo o estequiométrico está dado por

$$X_{\min} = O_{\min}/0.21 = 8.893 c \sigma \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}_c] \quad (2.27)$$

Expresión equivalente a la (2.23).

El coeficiente característico  $\sigma$  resulta útil y en ocasiones facilita los cálculos debido a que su valor cambia poco para grupos muy específicos de combustibles. Para el caso de carbono para  $\sigma = 1.0$  y para combustóleo debe andar entre 1.2 a 1.55.

Por otro lado, el contenido de nitrógeno se maneja el segundo coeficiente característico, de Mollier, definido por:

$$v = \frac{\frac{n}{28}}{\frac{c}{12}} = \frac{3}{7} \frac{n}{c} \quad (2.28)$$

donde:

$n$  y  $c$  son las composiciones másicas de nitrógeno y carbono presentes en el combustible. Para combustibles sólidos y líquidos el contenido de nitrógeno usualmente se desconoce.

Más adelante en este capítulo se presentarán nuevamente los coeficientes característicos  $\sigma$  y  $v$ , los cuales figuran de manera importante en los productos de la combustión.

### 2.3.3 Productos de combustibles sólidos y líquidos en combustión completa.

Los productos de la combustión completa, determinados a partir de las ecuaciones estequiométricas de 1 kilogramo de combustible con el oxígeno necesario, se componen de los siguientes gases:

#### BIOXIDO DE CARBONO

$$11/3 c \text{ [kg/kg}_c\text{]} = c/12 \text{ [kmol/kg}_c\text{]} = (22.41/12)c \text{ [Nm}^3\text{/kg}_c\text{]} \quad (2.29)$$

#### VAPOR DE AGUA

$$(9h + w)/\text{kg/kg}_c = (h/2 + W/18) \text{ [kmol/kg}_c\text{]} = (22.41/18)(9h + w) \text{ [Nm}^3\text{/kg}_c\text{]} \quad (2.30)$$

#### BIOXIDO DE AZUFRE

$$2s \text{ [kg/kg}_c\text{]} = s/32 \text{ [kmol/kg}_c\text{]} = (22.41/32)S \text{ [Nm}^3\text{/kg}_c\text{]} \quad (2.31)$$

Aquí se ha incluido  $w$  que representa la fracción másica de agua (humedad) en el combustible.

Entonces, la cantidad total de productos gaseosos por cada kilogramo de combustible resulta, con entidades másicas:

$$\left[ \frac{11}{3} c + 9h + w + 2s \right] \quad \left[ \frac{\text{kg}_p}{\text{kg}_c} \right] \quad (2.32a)$$

con entidades molares:

$$\left[ \frac{c}{12} + \frac{h}{2} + \frac{w}{18} + \frac{s}{32} \right] \quad \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_c} \right] \quad (2.32b)$$

con entidades volumétricas:

$$\frac{22.41}{12} \left[ c + 6h + \frac{2}{3}w + \frac{3}{8}s \right] \quad \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_c} \right] \quad (2.32c)$$

El incremento de volumen durante la combustión resulta la diferencia entre (2.32c) y (2.25), o sea:

#### PRODUCTOS-OXIGENO MINIMO

$$(22.41/12)(c + 6h + 2/3 w + 3/8 s) - \{(22.41/12)(c + 3h + 3/8 s - 3/8 o)\}$$

## INCREMENTO DE VOLUMEN

$$\Delta V = (22.41/12)[3h + 3/8 o + 2/3 w] \text{ [Nm}^3\text{/kg}_c\text{]} \quad (2.33)$$

Cuando se quema 1 kg de combustible con la cantidad teórica de aire  $X_{min}$ , el nitrógeno aparece tanto en los reactantes como en los productos. Entonces, el volumen de los productos es:

$$V_{pmin} = X_{min} + \Delta V = X_{min} + (22.41/12)[3h + 3/8 o + 2/3 w] \text{ [Nm}^3\text{/kg}_c\text{]} \quad (2.34)$$

En la ecuación (2.34) puede notarse que el incremento de volumen durante la combustión depende exclusivamente de hidrógeno, oxígeno y de la humedad presentes en el combustible.

## EXCESO DE AIRE

Si  $X$  es la cantidad práctica de aire para asegurar la combustión completa, se tiene:

$$X = \lambda X_{min} = (1 + \delta) X_{min} \quad (2.35)$$

donde:

$\lambda$  es la relación de aire

$\delta$  es el coeficiente de exceso de aire o simplemente el exceso de aire.

entonces, el volumen total de los productos de combustión está dado por:

$$V_p = X + (22.41/12)[3h + 3/8 o + 2/3 w] \text{ [Nm}^3\text{/kg}_c\text{]} \quad (2.36)$$

Puesto que el exceso de oxígeno y la totalidad del nitrógeno pasan por el proceso sin cambio alguno. Es obvio que en condiciones reales se propicia la formación de  $\text{NO}_x$ .

### 2.4 Oxígeno y aire necesario para la combustión completa y sus productos: casos combustibles gaseosos

#### 2.4.1 Oxígeno y aire para la combustión con gases combustibles.

La composición de los combustibles gaseosos se expresa en fracciones molares (también llamadas volumétricas), como por ejemplo:

$$(r_{CO})_c + (r_{H_2})_c + (r_{CH_4})_c + (r_{C_2H_6})_c + (r_{O_2})_c + (r_{N_2})_c + (r_{CO_2})_c = 1 \text{ ó } 100\% \quad (2.37)$$

donde:

El subíndice "c" refiere al gas componente antes de la combustión.

Los componentes gaseosos de la ecuación (2.37) corresponden a un combustible hipotético, los cuales se tomarán como ejemplos. Debe admitirse que otros combustibles gaseosos pueden tener más o menos componentes.

Entonces, para la combustión completa de este gas combustible, dado por la ecuación (2.37) se requieren las cantidades de oxígeno ya presentadas en las ecuaciones (2.3), (2.5), (2.7) y (2.8), por orden de aparición. Los gases componentes  $O_2$ ,  $N_2$  y  $CO_2$  no figuran, obviamente, en estos requerimientos de oxígeno.

Haciendo la aclaración que un [kmol] a las mismas condiciones de presión y temperatura ocupan el mismo volumen, las ecuaciones estequiométricas resultan ser ecuaciones volumétricas. Si estos volúmenes se toman a condiciones normales, el  $O_{min}$  se calcula por:

$$O_{min} = 0.5(r_{CO})_c + 0.5(r_{H_2})_c + 2(r_{CH_4})_c + 3(r_{C_2H_6})_c - (r_{O_2})_c \quad [Nm^3/Nm^3c] \quad (2.38)$$

O lo que es lo mismo, la relación estequiométrica gas combustible-oxígeno es para:

- a) el CO de 1 a 0.5
- b) el  $H_2$  de 1 a 0.5
- c) el  $CH_4$  de 1 a 2.0
- d) el  $C_2H_6$  de 1 a 3.0

Entonces, el aire mínimo o estequiométrico se calcula por la relación siguiente

$$X = O_{min}/0.21$$

$$X_{min} = \frac{0.5(r_{CO})_c + 0.5(r_{H_2})_c + 2(r_{CH_4})_c + 3(r_{C_2H_6})_c - (r_{O_2})_c}{0.21} \quad \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3c} \right] \quad (2.39)$$

Recuérdese que (2.39) sólo es válido para el gas combustible adoptado como ejemplo.

También se aplica aquí la ecuación (2.35) para asegurar una combustión completa. El aire necesario se calcula por:

$$X = \lambda \left[ \frac{0.5(r_{CO})_c + 0.5(r_{H_2})_c + 2(r_{CH_4})_c + 3(r_{C_2H_6})_c - (r_{O_2})_c}{0.21} \right] \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \quad (2.40)$$

### Aire práctico de la combustión

#### 2.4.2 Productos de gases combustibles

Después de efectuado el proceso de combustión y de acuerdo a (2.40), donde  $X = \lambda X_{min}$ , se puede tomar en cuenta que:

- El CO se transforma en  $CO_2$  en proporción 1 a 1.
- El  $H_2$  se transforma en  $H_2O$  en proporción 1 a 1.
- El  $CH_4$  se transforma en  $CO_2$  en proporción 1 a 1. Además, se produce  $H_2O$  en proporción 1 a 2.
- El  $C_2H_6$  se transforma en  $CO_2$  en proporción 1 a 2. Además, se produce  $H_2O$  en proporción 1 a 2.
- Los demás gases como el  $CO_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$  pasan idealmente sin alterarse. La verdad es que eventualmente pueden transformarse en  $NO_x$ .

En suma, los productos de la combustión de gases combustibles se componen de los siguientes volúmenes parciales:

#### BIOXIDO DE CARBONO

$$(V_{CO_2})_p = (r_{CO})_c + (r_{CH_4})_c + 2(r_{C_2H_6})_c + (r_{CO_2})_c \quad (2.41)$$

#### VAPOR DE AGUA

$$(V_{H_2O})_v = (r_{H_2})_c + 2(r_{CH_4})_c + 2(r_{C_2H_6})_c \quad (2.42)$$

#### OXIGENO

$$(V_{O_2})_p = (\lambda - 1)O_{min} = \delta O_{min} = 0.21X - O_{min} \quad (2.43)$$

## NITROGENO

$$(V_{N_2})_p = (r_{N_2})_c + 0.79X \quad (2.44)$$

Las expresiones anteriores se dan en [kmol] o en unidades volumétricas. Por kilogramo de combustible [Nm<sup>3</sup>/kg<sub>c</sub>].

Comparando los volúmenes de los productos con el gas combustible sumado al del aire, existe un decremento igual a:

$$\Delta V_p = = 0.5[(r_{CO})_c + (r_{H_2})_c] \quad (2.45)$$

el cual se debe totalmente a la combustión del CO y del H<sub>2</sub>, ya que el CH<sub>4</sub> y el C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> se queman sin cambio de volumen.

Como en los productos de combustión aparecen tantos kmoles de CO<sub>2</sub> como kmoles hay de carbono en un combustible dado, se cumple:

$$\sigma = \frac{O_{min}}{(V_{CO_2})_p} \quad (2.46)$$

donde:

$O_{min}$  y  $(V_{CO_2})_p$  se expresa en [kmol/kg<sub>c</sub>] ó [Nm<sup>3</sup>/kg<sub>c</sub>]

Entonces, los coeficientes característicos para este combustible son:

$$\sigma = \frac{0.5(r_{CO})_c + 0.5(r_{H_2})_c + 2(r_{CH_4})_c + 3(r_{C_2H_4})_c - (r_{O_2})_c}{(r_{CO})_c + (r_{CH_4})_c + 2(r_{C_2H_4})_c + (r_{CO_2})_c} \quad (2.47)$$

$$v = \frac{(V_{N_2})_c}{(V_{CO_2})_p}$$

(2.48)

$$v = \frac{(r_{N_2})_c}{(r_{CO})_c + (r_{CH_4})_c + 2(r_{C_2H_4})_c + (r_{CO_2})_c}$$

## 2.5 Relación entre la composición de los productos de la combustión y la cantidad de oxígeno o aire necesario

Puesto que los productos de la combustión se secan antes de realizar su análisis, el vapor de agua y el bióxido de azufre se condensan y no aparecen en el análisis. Entonces:

$$(r_{CO_2})_p + (r_{O_2})_p + (r_{N_2})_p = 1 \text{ ó } 100\% \quad (2.49)$$

donde:

Cada término representa la fracción volumétrica o molar y el subíndice  $p$  se refiere a los productos.

De (2.43) y (2.46) se obtiene la relación oxígeno y bióxido de carbono en los productos como:

$$\frac{(V_{O_2})_p}{(V_{CO_2})_p} = \frac{(\lambda - 1)O_{min}}{\frac{O_{min}}{\sigma}} = (\lambda - 1)\sigma \quad (2.50)$$

Con exceso de aire, la cantidad total de oxígeno suministrado es  $(\lambda O_{min})$  kmol y el nitrógeno suministrado es  $(0.79/0.21)\lambda O_{min}$ . Usando la ecuación (2.49) se puede obtener el volumen de nitrógeno que es:  $(0.79/0.21)\lambda\sigma(V_{CO_2})_p$ . El nitrógeno presente en el gas combustible también se puede expresar en términos del contenido de carbono por el símbolo  $v$ . Este nitrógeno debe pasar a los productos de la combustión de igual forma. Puesto que los productos contienen tantos kmoles de  $CO_2$  como kmoles de C hay de combustibles, el nitrógeno del combustible que está en los productos es  $v(V_{CO_2})_p$ . Entonces, la relación del nitrógeno total al bióxido de carbono en los productos está dada por:

$$(V_{N_2})_p / (V_{CO_2})_p = [(0.79/0.21)\lambda\sigma] + v \quad (2.51)$$

Si las ecuaciones (2.49), (2.50) y (2.51) se solucionan para  $(r_{CO_2})_p$ ,  $(r_{O_2})_p$  y  $(r_{N_2})_p$  se obtiene:

$$(r_{CO_2})_p = \frac{0.21}{(\lambda - 0.21)\sigma + 0.21(v + 1)} \quad (2.52a)$$

$$(r_{O_2})_p = \frac{0.21(\lambda - 1)\sigma}{(\lambda - 0.21)\sigma + 0.21(v + 1)} \quad (2.52b)$$

$$(r_{N_2})_p = \frac{0.79 \lambda \sigma + 0.21 \nu}{(\lambda - 0.21)\sigma + 0.21(\nu + 1)} \quad (2.5)$$

De la ecuación (2.49) y de estas tres ecuaciones se obtiene:

$$\lambda = \frac{0.21}{\sigma} \left[ \frac{1}{(r_{CO_2})_p} + \sigma - 1 - \nu \right] \quad (2.53)$$

Como regla, si el contenido de nitrógeno se desconoce las últimas cuatro ecuaciones se reducen a:

$$(r_{CO_2})_p = \frac{0.21}{(\lambda - 0.21)\sigma + 0.21} \quad (2.54a)$$

$$(r_{O_2})_p = \frac{0.21(\lambda - 1)\sigma}{(\lambda - 0.21)\sigma + 0.21} \quad (2.54b)$$

$$(r_{N_2})_p = \frac{0.79 \lambda \sigma}{(\lambda - 0.21)\sigma + 0.21} \quad (2.54c)$$

$$\lambda = \frac{0.21}{\sigma} \left[ \frac{1}{(CO_2)_p} + \sigma - 1 \right] \quad (2.55)$$

Por medio de estas ecuaciones se puede determinar el exceso de aire de la combustión si se conoce el contenido porcentual molar de CO<sub>2</sub> en los gases secos de combustión y los coeficientes  $\sigma$  y  $\nu$ .

Cuando en el combustible no hay nitrógeno, el coeficiente  $\sigma$  puede eliminarse de las dos primeras ecuaciones (2.54), y después de solucionar para  $\lambda$  se obtiene:

$$\lambda = \frac{1 - (r_{CO})_p - (r_{O_2})_p}{1 - (r_{CO})_p - \left(\frac{1}{0.21}\right)(r_{O_2})_p} \quad (2.56)$$

Esta ecuación no puede usarse en cálculos que requieren una aproximación en el análisis de los productos que no puede alcanzarse prácticamente.

## 2.6 Relaciones empíricas entre $X_{\min}$ , $V_p$ y $PCI$ .

En la práctica se puede demostrar que el consumo mínimo de aire y el volumen de productos de combustión pueden representarse como función lineal de los poderes caloríficos inferiores. Estas relaciones se enuncian por grupos afines de combustibles como sigue:

Combustibles sólidos:  $PCI < 23,300$  kJ/kg<sub>c</sub>:

$$X_{\min} = \left[ \frac{0.5619}{23300} PCI + 0.5 \right] \left[ \frac{Nm^3}{kg_c} \right] \quad (2.57a)$$

$$V_{p_{\min}} = \left[ \frac{0.4932}{23300} PCI + 1.623 \right] \left[ \frac{Nm^3}{kg_c} \right] \quad (2.57a)$$

Combustibles sólidos:  $PCI > 23,300$  kJ/kg<sub>c</sub>:

$$X_{\min} = \left[ \frac{0.5619}{23300} PCI + 0.5619 \right] \left[ \frac{Nm^3}{kg_c} \right] \quad (2.58a)$$

$$V_{p_{\min}} = \left[ \frac{0.5556}{23300} PCI + 0.874 \right] \left[ \frac{Nm^3}{kg_c} \right] \quad (2.58b)$$

Combustibles líquidos (para todo  $PCI$ ):

$$X_{\min} = \left[ \frac{0.472}{23300} PCI + 2 \right] \left[ \frac{Nm^3}{kg_c} \right] \quad (2.59a)$$

$$V_{p_{\min}} = \left[ \frac{0.618}{23300} PCI \right] \left[ \frac{Nm^3}{kg_c} \right] \quad (2.59b)$$

Gases combustible:  $PCI < 11,200$  kJ/Nm<sup>3</sup>:

$$X_{\min} = \left[ \frac{7.8}{16900} PCI \right] \left[ \frac{Nm^3}{kg_c} \right] \quad (2.60a)$$

$$V_{p_{\min}} = \left[ \frac{5.7}{16900} PCI + 1.11 \right] \left[ \frac{Nm^3}{kg_c} \right] \quad (2.60b)$$

Gases combustible: PCI > 11,200 kJ/Nm<sup>3</sup>:

$$X_{\min} = \left[ \frac{0.5619}{16900} PCI - 0.25 \right] \left[ \frac{Nm^3}{kg_c} \right] \quad (2.61a)$$

$$V_{p_{\min}} = \left[ \frac{12}{16900} PCI - 0.67 \right] \left[ \frac{Nm^3}{kg_c} \right] \quad (2.61b)$$

En el caso de combustibles sólidos y líquidos, el PCI se da por unidad de masa del combustible, mientras que en el caso de combustibles gaseosos el PCI se toma por unidad de volumen en condiciones normales.

Con ayuda de estas ecuaciones se puede determinar el volumen de los productos a partir del poder calorífico del combustible. Para obtener los productos reales de la combustión se puede usar la ecuación:

$$V_p = V_{p_{\min}} + (\lambda - 1)X_{\min}$$

Este método empírico simplifica considerablemente los cálculos de combustión. Los resultados son lo suficientemente aproximados para todos los fines prácticos.

## **CAPITULO 3 Cálculo y determinación de productos de combustión**

### **3.1 Combustibles Líquidos**

De acuerdo a la composición que presentan los combustibles mexicanos usados en el ámbito industrial y a la gama no uniforme de sus datos, resulta de interés primordial predecir en forma analítica y gráfica, mediante parámetros característicos, la composición de los gases de combustión para tener su orden de magnitud.

Se adoptan aquí definiciones no convencionales y se deducen algunas expresiones para el análisis de los productos de la combustión y finalmente se trazan las curvas características del combustible estudiado.

En los campos ingenieril y del dominio público se ha presentado la urgencia de manejar y conocer los productos gaseosos emanados por la quema de combustibles nacionales. Debido a la gran variedad de la composición de los combustibles mexicanos y usados en el ámbito industrial resulta no muy fácil establecer de una manera confiable la composición de los productos de combustión. Lo anterior se comprende debido a que las condiciones estequiométricas se ven desviadas al ocupar un exceso de aire y no oxidarse completamente sus componentes. Es por ello que, desde el punto de vista práctico se facilita su análisis, de un combustible dado con la representación gráfica de sus parámetros.

De esta forma, en base a la composición del combustible en estudio se analizan sus relaciones estequiométricas, y se encuentran y deducen ecuaciones en función de parámetros característicos intrínsecos y condiciones de combustión.

#### **3.1.1 Caso Combustoleo**

De acuerdo a un estudio cromatográfico se obtuvieron las composiciones fraccionarias de los componentes del combustible en estudio, las cuales nos servirán para calcular los coeficientes característicos del mismo:

#### **COMPOSICION DEL COMBUSTOLEO**

CARBONO	C = 84.90 %
HIDROGENO	H = 10.90 %
AZUFRE	S = 3.40 %
NITROGENO	N = 0.41 %
CENIZAS	Z = 0.39 %

Empleando las ecuaciones (2.26) y (2.28) se obtiene:

$$\sigma = 1 + \frac{3}{0.849} \left[ 0.109 + \frac{0.034}{8} \right] = 1.4001$$

$$\nu = \left( \frac{3}{7} \right) \left( \frac{0.0041}{0.8490} \right) = 0.002069$$

Sustituyendo los valores de los Coeficientes Característicos en las ecuaciones (2.52a), (2.52b) y (2.52c), para un predeterminado exceso de aire ( $\lambda$ ):

Exceso de Aire $\lambda$ [%]	$(\Gamma_{CO_2})_p$	$(\Gamma_{O_2})_p$	$(\Gamma_{N_2})_p$
1	0.159519	0	0.840481
10	0.015089	0.190136	0.794775
20	0.007522	0.200098	0.792380
30	0.005010	0.203405	0.791585
40	0.003755	0.205056	0.791188
50	0.003003	0.206046	0.790950

Tabla 3.1 Fracciones Volumétricas de los Gases de Combustión del Combustoleo

Graficando los valores tabulados se obtienen las curvas características del combustible:

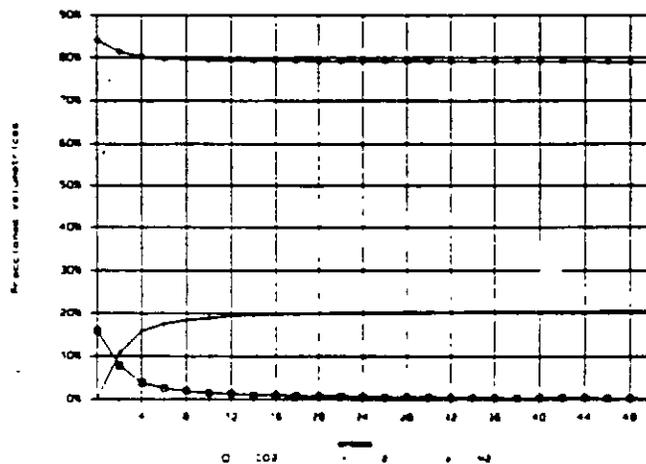


Figura 3.1 Gráfica Característica del Combustoleo

### 3.1.2 Caso Gasoleo

De acuerdo a un estudio cromatográfico se obtuvieron las composiciones fraccionarias de los componentes del combustible en estudio, las cuales nos servirán para calcular los coeficientes característicos del mismo:

#### COMPOSICION DEL GASOLEO

CARBONO	C = 84.660 %
HIDROGENO	H = 9.940 %
AZUFRE	S = 2.840 %
NITROGENO	N = 0.882 %
CENIZAS	Z = 0.418 %
UMEDAD	W = 1.200 %

Empleando las ecuaciones (2.26) y (2.28) se obtiene:

$$\sigma = 1 - \frac{3}{0.8466} \left[ 0.994 - \frac{0.0284}{8} \right] = 1.3648$$

$$\nu = \left( \frac{3}{7} \right) \left( \frac{0.00882}{0.8466} \right) = 0.00446$$

Sustituyendo los valores de los Coeficientes Característicos en las ecuaciones (2.52a), (2.52b) y (2.52c), para un predeterminado exceso de aire ( $\lambda$ ):

Exceso de Aire $\lambda$ [%]	$(\Gamma_{CO_2})_p$	$(\Gamma_{O_2})_p$	$(\Gamma_{N_2})_p$
1	0.162901	0	0.837099
10	0.015473	0.190054	0.794474
20	0.007715	0.200055	0.792231
30	0.005138	0.203376	0.791486
40	0.003852	0.205034	0.791114
50	0.003081	0.206028	0.790891

Tabla 3.2 Fracciones Volumétricas de los Gases de Combustión del Gasoleo

Grificando los valores tabulados se obtienen las curvas característi  
combustible:

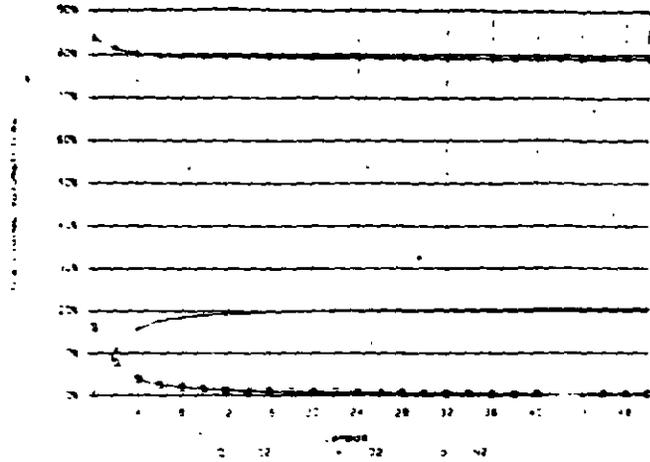


Figura 3.2 Gráfica Característica del Gasoleo

### 3.1.3 Caso Diesel

De acuerdo a un estudio cromatográfico se obtuvieron las co  
fraccionarias de los componentes del combustible en estudio, las cuales nos  
para calcular los coeficientes característicos del mismo:

#### COMPOSICION DEL DIESEL

CARBONO	C = 84.600 %
HIDROGENO	H = 9.700 %
AZUFRE	S = 2.700 %
NITROGENO	N = 1.000 %
CENIZAS	Z = 0.500 %
HUMEDAD	W = 1.500 %

Empleando las ecuaciones (2.26) y (2.28) se obtiene:

$$\sigma = 1 + \frac{3}{0.8 + \sigma} \left[ 0.097 + \frac{0.0270}{8} \right] = 1.3559$$

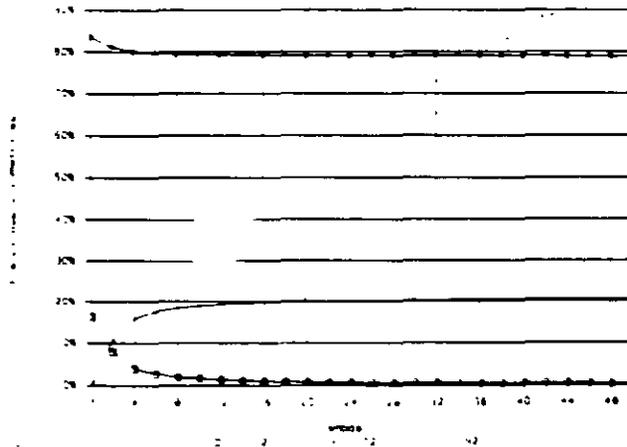
$$\nu = \left(\frac{3}{7}\right)\left(\frac{0.010}{0.846}\right) = 0.00506$$

Sustituyendo los valores de los Coeficientes Característicos en las ecuaciones (2.52a), (2.52b) y (2.25c), para un predeterminado exceso de aire ( $\lambda$ ):

Exceso de Aire $\lambda$ [%]	$(\Gamma_{CO})_p$	$(\Gamma_{O_2})_p$	$(\Gamma_{N_2})_p$
1	0.163778	0	0.836222
10	0.015572	0.190033	0.794395
20	0.007765	0.200043	0.792191
30	0.005172	0.203368	0.791460
40	0.003877	0.205029	0.791094
50	0.003101	0.206024	0.790875

**Tabla 3.3 Fracciones Volumétricas de los Gases de Combustión del Diesel**

Graficando los valores tabulados se obtienen las curvas características del combustible:



**Figura 3.3 Gráfica Característica del Diesel**

### 3.2 Combustibles Gaseosos.

En el desarrollo de este capítulo, se analizan los productos de combustión tanto del gas L.P. como los del gas natural, considerando una combustión ideal o completa, así como una combustión real aproximada.

#### 3.2.1 Caso Gas L.P.

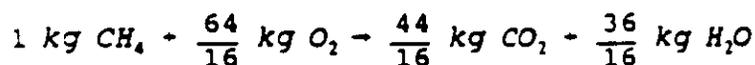
El gas L.P., tiene un mayor uso en aplicaciones domésticas, aunque algunas industrias lo utilizan como combustible para calderas y generadores de vapor. Se dice que su uso resulta atractivo debido a su alta eficiencia de combustión y su alto poder calorífico. Este gas se compone básicamente de gases como butano y propano, su composición exacta la proporciona la planta que lo destila.

La siguiente tabla proporciona un análisis cromatográfico de un gas L.P. de la zona metropolitana de la Cd. de México.

#### COMPOSICION MASICA DEL GAS L.P.

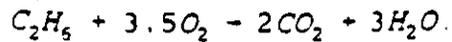
Etano	CH <sub>4</sub>	0.02%
Etano + etileno	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.45%
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	46.64%
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0.05%
iso-Butano + n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	49.50%
1-Buteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	0.37%
iso-Buteno	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	0.09%
iso-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	2.88%

Obteniendo las reacciones de combustión de cada uno de sus componentes y calculando el O<sub>mn</sub> necesario para que se realice la combustión, resulta:



Si  $\text{CH}_4$  representa el 0.02%, entonces:

$$O_{\min(\text{CH}_4)} = 0.0002 \left( \frac{64}{16} \right) = 0.0008 \left[ \frac{\text{kg}_{\text{O}_2}}{\text{kg}_c} \right]$$

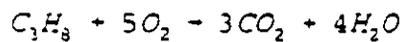


$$30 \text{ kg C}_2\text{H}_6 + 112 \text{ kg O}_2 - 88 \text{ kg CO}_2 + 54 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kg C}_2\text{H}_6 + \frac{112}{30} \text{ kg O}_2 - \frac{88}{30} \text{ kg CO}_2 + \frac{54}{30} \text{ kg H}_2\text{O}$$

Si  $\text{C}_2\text{H}_6$  representa el 0.45%, entonces:

$$O_{\min(\text{C}_2\text{H}_6)} = 0.0045 \left( \frac{112}{30} \right) = 0.0167 \left[ \frac{\text{kg}_{\text{O}_2}}{\text{kg}_c} \right]$$

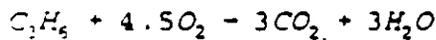


$$44 \text{ kg C}_3\text{H}_8 + 160 \text{ kg O}_2 - 132 \text{ kg CO}_2 + \quad \text{kg H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kg C}_3\text{H}_8 + \frac{160}{44} \text{ kg O}_2 - \frac{132}{44} \text{ kg CO}_2 + \frac{72}{44} \text{ kg H}_2\text{O}$$

Si  $\text{C}_3\text{H}_8$  representa el 46.64%, entonces:

$$O_{\min(\text{C}_3\text{H}_8)} = 0.4664 \left( \frac{160}{44} \right) = 1.6959 \left[ \frac{\text{kg}_{\text{O}_2}}{\text{kg}_c} \right]$$

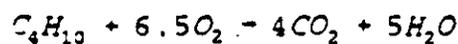


$$42 \text{ kg C}_3\text{H}_6 + 144 \text{ kg O}_2 - 132 \text{ kg CO}_2 + 54 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kg C}_3\text{H}_6 + \frac{144}{42} \text{ kg O}_2 - \frac{132}{42} \text{ kg CO}_2 + \frac{54}{42} \text{ kg H}_2\text{O}$$

Si  $C_3H_8$  representa el 0.05%, entonces:

$$O_{\min(C_3H_8)} = 0.0005 \left( \frac{144}{42} \right) = 0.001714 \left[ \frac{kg_{O_2}}{kg_c} \right]$$

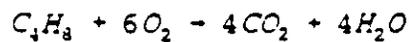


$$58 \text{ kg } C_3H_8 + 208 \text{ kg } O_2 \rightarrow 176 \text{ kg } CO_2 + 90 \text{ kg } H_2O$$

$$1 \text{ kg } C_3H_8 + \frac{208}{58} \text{ kg } O_2 \rightarrow \frac{176}{58} \text{ kg } CO_2 + \frac{90}{58} \text{ kg } H_2O$$

Si  $C_4H_{10}$  representa el 49.50%, entonces:

$$O_{\min(C_4H_{10})} = 0.4950 \left( \frac{208}{58} \right) = 1.7751 \left[ \frac{kg_{O_2}}{kg_c} \right]$$

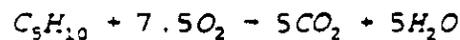


$$56 \text{ kg } C_4H_{10} + 192 \text{ kg } O_2 \rightarrow 176 \text{ kg } CO_2 + 72 \text{ kg } H_2O$$

$$1 \text{ kg } C_4H_{10} + \frac{192}{56} \text{ kg } O_2 \rightarrow \frac{176}{56} \text{ kg } CO_2 + \frac{72}{56} \text{ kg } H_2O$$

Si  $C_5H_{12}$  representa el 0.37%, entonces:

$$O_{\min(C_5H_{12})} = 0.0037 \left( \frac{192}{56} \right) = 0.01268 \left[ \frac{kg_{O_2}}{kg_c} \right]$$

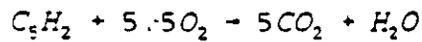


$$70 \text{ kg } C_5H_{12} + 240 \text{ kg } O_2 \rightarrow 220 \text{ kg } CO_2 + 90 \text{ kg } H_2O$$

$$1 \text{ kg } C_5H_{12} + \frac{240}{70} \text{ kg } O_2 \rightarrow \frac{220}{70} \text{ kg } CO_2 + \frac{90}{70} \text{ kg } H_2O$$

Si  $C_5H_{10}$  representa el 0.09%, entonces:

$$O_{\min(C_5H_{10})} = 0.0009 \left( \frac{240}{70} \right) = 0.00308 \left[ \frac{kg_{O_2}}{kg_c} \right]$$



$$62 \text{ kg } C_5H_{10} + 176 \text{ kg } O_2 \rightarrow 220 \text{ kg } CO_2 + 18 \text{ kg } H_2O$$

$$1 \text{ kg } C_5H_{10} + \frac{176}{62} \text{ kg } O_2 \rightarrow \frac{220}{62} \text{ kg } CO_2 + \frac{18}{62} \text{ kg } H_2O$$

Si  $C_5H_2$  representa el 2.88%, entonces:

$$O_{\min(C_5H_2)} = 0.0288 \left( \frac{176}{62} \right) = 0.0817 \left[ \frac{kg_{O_2}}{kg_c} \right]$$

Realizando la sumatoria de los  $O_{\min}$  de cada componente, da como resultado el  $O_{\min}$  total requerido para poder llevarse a cabo la combustión de dicho combustible, por lo que:

$$\begin{aligned} O_{\min} &= 0.0008 + 0.01679 + 1.6959 + 0.001714 + 1.7751 + 0.01268 + 0.00308 + 0.08175 \\ &= 3.5878 \text{ (kg}_{O_2}/\text{kg}_c) \end{aligned}$$

Considerando  $\rho_{O_2} = 1.4279 \text{ (kg}_{O_2}/\text{Nm}^3\text{O}_2)$ , entonces:

$$O_{\min} = \frac{3.5878}{1.4279} = 2.5126 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_c} \right]$$

Si

$$X_{\min} = \frac{O_{\min}}{0.21}$$

resulta que:

$$X_{\min} = \frac{2.5126}{0.21} = 11.9647 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_c} \right]$$

Para poder obtener la  $M$  del combustible se utiliza la expresión:

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{x_i} \right)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{\frac{0.0002}{16} + \frac{0.0045}{30} + \frac{0.4664}{44} + \frac{0.0005}{42} + \frac{0.0050}{58} + \frac{0.0037}{56} + \frac{0.0009}{70} + \frac{0.0288}{62}}$$

$$\bar{M} = \frac{1}{0.000012 + 0.00015 + 0.0106 + 0.0000119 + 0.00853 + 0.000066 + 0.0000128 + 0.000464}$$

$$\bar{M} = \frac{1}{0.01984} = 50.40 \left[ \frac{kg}{kmol} \right]$$

Si la densidad del combustible es:

$$(\rho_c^N) = \frac{M}{V} \left[ \frac{\frac{kg}{kmol}}{\frac{Nm^3}{kmol}} \right]$$

Para el caso de este combustible se tiene que:

$$\rho_c^N = \frac{50.40 \left[ \frac{kg}{kmol} \right]}{22.41 \left[ \frac{Nm^3}{kmol} \right]} = 2.2489 \left[ \frac{kg_c}{Nm_c^3} \right]$$

De lo anterior se deduce que:

$$X_{m, n} = 26.9074 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

Por otro lado:

$$O_{m, n} = X_{m, n}(0.21) = 26.9074(0.21) = 5.6576 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

De la ecuación (2.13) se puede transformar de fracción másica a fracción volumétrica (molar), por lo tanto los valores de las fracciones volumétricas de cada

componente estan dadas por:

$$CH_4 = \frac{0.000012}{0.01984} = 0.00060 \quad \therefore \quad 0.06\%$$

$$C_2H_6 = \frac{0.00015}{0.01984} = 0.0075 \quad \therefore \quad 0.75\%$$

$$C_3H_8 = \frac{0.0106}{0.01984} = 0.5342 \quad \therefore \quad 53.42\%$$

$$C_3H_6 = \frac{0.0000119}{0.01984} = 0.00059 \quad \therefore \quad 0.059\%$$

$$C_4H_{10} = \frac{0.00853}{0.01984} = 0.4299 \quad \therefore \quad 42.99\%$$

$$C_4H_8 = \frac{0.000066}{0.01984} = 0.0033 \quad \therefore \quad 0.33\%$$

$$C_5H_{12} = \frac{0.0000128}{0.01984} = 0.00064 \quad \therefore \quad 0.064\%$$

$$C_5H_2 = \frac{0.000464}{0.01984} = 0.0233 \quad \therefore \quad 2.33\%$$

De las ecuaciones de reacción que se analizaron con anterioridad se pueden calcular los volúmenes de los productos de la combustión, considerando en este caso la fracción volumétrica, por lo que resulta:

$$(V_{CO_2})_p = 1(0.0006) + 2(0.0075) + 3(0.5342) + 3(0.0005) + 4(0.4299) +$$

$$+ 4(0.0033) + 5(0.0006) + 5(0.0233) = 3.472 \left[ \frac{Nm^3_{CO_2}}{Nm^3_c} \right]$$

$$(V_{H_2O})_p = 2(0.0006) + 3(0.0075) + 4(0.5342) + 3(0.0005) + 5(0.4299) +$$

$$+ 4(0.0033) + 5(0.0006) + 1(0.0233) = 4.351 \left[ \frac{Nm^3_{H_2O}}{Nm^3_c} \right]$$

$$O_{min} = 2(0.0006) + 3.5(0.0075) + 5(0.5342) + 4.5(0.0005) + 6.5(0.4299) +$$

$$+ 6(0.0033) + 7.5(0.0006) + 5.5(0.0233) = 5.6481 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

de lo que se obtiene:

$$X_{min} = \frac{O_{min}}{0.21} = \frac{5.6481}{0.21} = 26.89 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

Considerando  $\lambda = 5\%$  se obtienen

$$(V_{O_2})_p = O_{min}(\lambda - 1) = 5.6481(1.05 - 1) = 0.2824 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

$$(V_{N_2})_p = r_{(N_2)_c} + 0.79(\lambda X_{min}) = 0 + 0.79\{26.895(1.05)\} = 22.30 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

El volumen total un base húmeda es igual a:

$$V_T = (V_{CO_2})_p + (V_{H_2O})_p + (V_{O_2})_p + (V_{N_2})_p$$

$$V_T = 3.472 + 4.351 + 0.2824 + 22.30 = 30.4054 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

Las fracciones volumétricas de los productos de la combustión estequiométrica en base húmeda es igual a:

$$r_{(CO_2)} = \frac{(V_{CO_2})_p}{V_T} = \frac{3.4720}{30.4054} = 0.1141$$

$$r_{(H_2O)} = \frac{(V_{H_2O})_P}{V_T} = \frac{4.351}{30.4054} = 0.1430$$

$$r_{(O_2)} = \frac{(V_{O_2})_P}{V_T} = \frac{0.2824}{30.4054} = 0.0092$$

$$r_{(N_2)} = \frac{(V_{N_2})_P}{V_T} = \frac{22.30}{30.4054} = 0.7334$$

El volumen total un base seca es igual a:

$$V_T = (V_{CO_2})_P + (V_{O_2})_P + (V_{N_2})_P$$

$$V_T = 3.472 + 0.2824 + 22.30 = 26.05 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3} \right]$$

Las fracciones volumétricas de los productos de la combustión estequiométricas en base seca es igual a:

$$r_{(CO_2)} = \frac{(V_{CO_2})_P}{V_T} = \frac{3.4720}{26.05} = 0.1332$$

$$r_{(O_2)} = \frac{(V_{O_2})_P}{V_T} = \frac{0.2824}{26.05} = 0.0108$$

$$r_{(N_2)} = \frac{(V_{N_2})_P}{V_T} = \frac{22.30}{26.05} = 0.8560$$

Por lo tanto los coeficientes característicos del Gas L.P. valen:

$$\sigma = \frac{O_{T.in}}{V_{(CO_2)}_P} = \frac{5.6481}{3.472} = 1.6267$$

$$v = \frac{V(N_2)_c}{V_{(CO_2)}_P} = \frac{0}{3.472} = 0$$

Aplicando las ecuaciones (2.54a, 2.54b y 2.54c) para un exceso de aire ( $\lambda$ )

predeterminado se obtienen los volúmenes parciales productos de una combustión estequiométrica en base seca se muestra en la Tabla 3.4

Exceso de Aire A [%]	$(f_{CO_2})_p$	$(f_{O_2})_p$	$(f_{N_2})_p$
0	0.1404	0	0.8596
1	0.138889	0.00226	0.858851
10	0.126622	0.020608	0.85277
20	0.115307	0.037532	0.847161
30	0.105848	0.05168	0.842472
40	0.097823	0.063683	0.838494
50	0.0913	0.073994	0.835076

Tabla 3.4 Fracciones Volumétricas de los Gases de Combustión del Gas L.P.

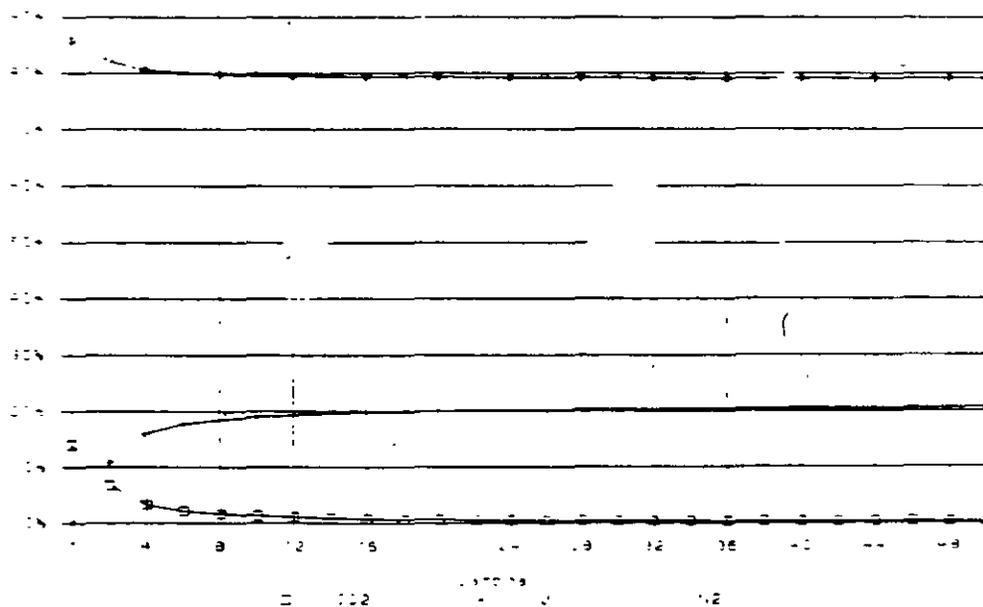


Figura 3.4 Gráfica Característica del Gas L.P.

### 3.2.2 Caso Gas Natural

El Gas Natural es muy estimado en el ámbito de Calderas y Generadores de Vapor debido a que proporciona una correcta combustión al no poseer azufre ni cenizas. El motivo por el cual no se hace extensivo su uso es por que su oferta es muy limitada y se expende solamente en determinadas zonas del país.

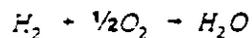
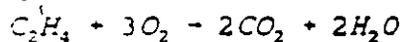
El Gas Natural esta compuesto básicamente por Etano, Meta: o, Bióxido de Carbono y otros gases. Es obvio que su composición varia en función del yacimiento.

La siguiente proporciona las características del gas natural en su composición molar ( o volumétrica) que fueron tomadas de un análisis cromatográfico según PEMEX.

#### COMPOSICION MOLAR DEL GAS NATURAL

Etano	CH <sub>4</sub>	=	76.30
Bióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	=	0.60
Etano + Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	=	6.00
Metano	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	=	2.30
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	=	0.10
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	=	0.70
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	=	10.80
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	=	3.20

Las ecuaciones de reacción son:



**Masas moleculares de los componentes del Gas Natural en [kg/k**

CH <sub>4</sub>	=	16
CO <sub>2</sub>	=	44
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	=	30
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	=	28
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	=	44
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	=	42
H <sub>2</sub>	=	2
N <sub>2</sub>	=	28

Poo lo que la Masa molecular del Combustible [kg<sub>c</sub>/kmol]:

0.763(16)	=	12.208
0.006(44)	=	0.264
0.060(30)	=	1.800
0.023(28)	=	0.644
0.001(44)	=	0.044
0.007(42)	=	0.294
0.108(2)	=	0.216
0.032(28)	=	0.896

$$\sum r_i M_i = M_c = 16.366 \text{ (masa molecular del combustible)}$$

Entonces el valor de la densidad del combustible ( $\rho_c$ ) se calcula por

$$\rho_c = \frac{M_c}{22.41} = \frac{16.366}{22.41} = 0.738 \left[ \frac{\text{kg}_c}{\text{Nm}^3} \right]$$

Ahora para encontrar el valor de los volúmenes parciales de dióxido de carbono ( $V_{CO_2}_p$ ) y el vapor de agua ( $V_{H_2O}_p$ ), productos de combustión son:

$$(V_{CO_2})_p = 1(0.763) + 2(0.06) + 2(0.023) + 3(0.001) + 3(0.007) + 0.006$$

$$(V_{CO_2})_p = 0.956 \left[ \frac{\text{Nm}^3_{CO_2}}{\text{Nm}^3_c} \right]$$

$$(V_{H_2O})_p = 2(0.763) + 3(0.06) + 2(0.023) + 4(0.001) + 3(0.007) + 1.006$$

$$(V_{H_2O})_p = 1.8850 \left[ \frac{\text{Nm}^3_{H_2O}}{\text{Nm}^3_c} \right]$$

El oxígeno mínimo ( $O_{min}$ ) para la combustión es:

$$O_{min} = 2(0.763) + 3.5(0.06) + 3(0.023) + 5(0.001) + 4.5(0.007) + 0.5(0.108)$$

$$O_{min} = 1.8955 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

Por tanto, el aire estequiométrico ( $X_{min}$ ) resulta:

$$X_{min} = \frac{O_{min}}{0.21} = \frac{1.8955}{0.21} = 9.026 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

Considerando  $\lambda = 1.05$  se obtiene:

$$(V_{O_2})_p = O_{min}(\lambda - 1) = 1.8955(1.05 - 1) = 0.0947 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

$$(V_{N_2})_p = r_{(N_2)_c} + 0.79(\lambda X_{min}) = 0.032 + 0.79(9.026(1.05)) = 7.5190 \left[ \frac{\Delta}{\Delta} \right]$$

El volumen total en base húmeda es igual a:

$$V_T = (V_{CO_2})_p + (V_{H_2O})_p + (V_{O_2})_p + (V_{N_2})_p$$

$$V_T = 0.959 + 1.885 + 0.0947 + 7.519 = 10.4577 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

Las fracciones volumétricas de los productos de la combustión estequiométrica en base húmeda es igual a:

$$r_{(CO_2)} = \frac{(V_{CO_2})_p}{V_T} = \frac{0.9590}{10.4577} = 0.0917$$

$$r_{(H_2O)} = \frac{(V_{H_2O})_p}{V_T} = \frac{1.885}{10.4577} = 0.1802$$

El volumen total en base seca es igual a:

$$r_{(O_2)} = \frac{(V_{O_2})_P}{V_T} = \frac{0.0947}{10.4577} = 0.0090$$

$$r_{(N_2)} = \frac{(V_{N_2})_P}{V_T} = \frac{7.519}{10.4577} = 0.7189$$

$$V_T = (V_{CO_2})_P + (V_{O_2})_P + (V_{N_2})_P$$

$$V_T = 0.959 + 0.0947 + 7.519 = 8.5637 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3} \right]$$

Las fracciones volumétricas de los productos de la combustión estequiométrica en base seca es igual a:

$$r_{(CO_2)} = \frac{(V_{CO_2})_P}{V_T} = \frac{0.9590}{8.5637} = 0.1119$$

$$r_{(O_2)} = \frac{(V_{O_2})_P}{V_T} = \frac{0.0947}{8.5637} = 0.0110$$

$$r_{(N_2)} = \frac{(V_{N_2})_P}{V_T} = \frac{7.510}{8.5637} = 0.8769$$

Por lo tanto los coeficientes característicos del Gas Natural son:

$$\sigma = \frac{O_{T,2,2}}{V_{(CO_2)_P}} = \frac{1.8955}{0.9590} = 1.9765$$

$$v = \frac{V(N_2)_C}{V_{(CO_2)_P}} = \frac{0.032}{0.9590} = 0.0333$$

Aplicando las ecuaciones (2.52a, 2.52b y 2.52c) para un exceso de aire ( $\lambda$ ) pre determinado se obtienen los volúmenes parciales productos de una combustión estequiométrica en base seca para el Gas Natural, se muestra en la Tabla 3.5

Exceso de Aire $\lambda$ [%]	$(f_{CO_2})_p$	$(f_{O_2})_p$	$(f_{N_2})_p$
0	0.118081	0	0.881919
1	0.116783	0.002308	0.880909
10	0.10627	0.021004	0.872725
20	0.096608	0.038189	0.865203
30	0.088556	0.052509	0.858935
40	0.081743	0.064626	0.853632
50	0.075903	0.075011	0.849086

Tabla 3.5 Fracciones Volumétricas de los Gases de Combustión del Gas Natural

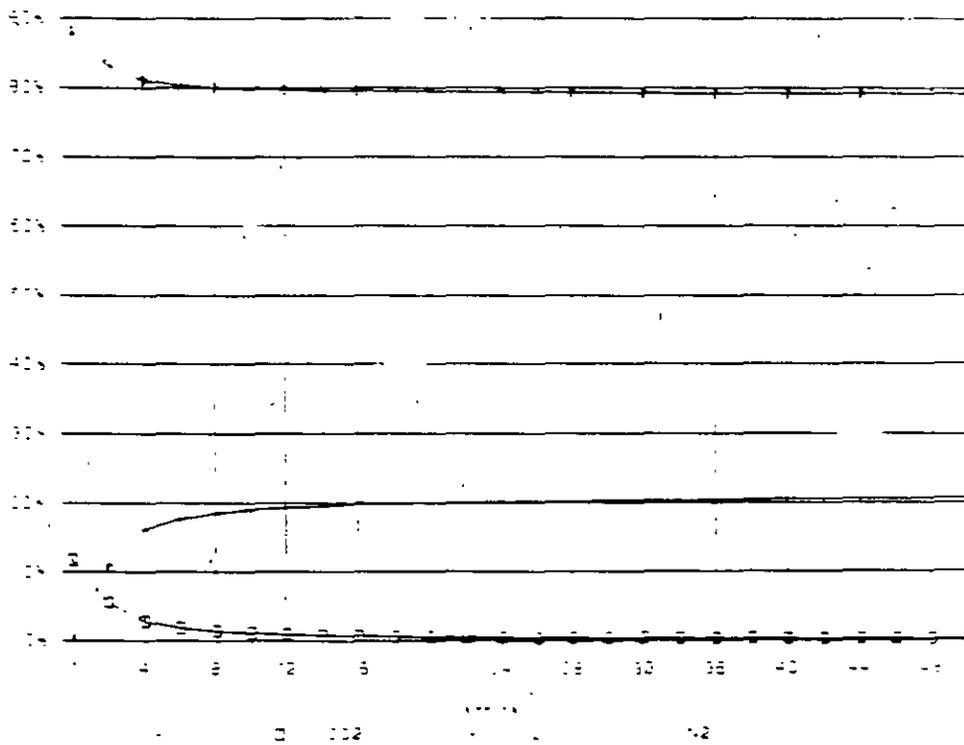


Figura 3.5 Gráfica Característica del Gas Natural

### **3.3 Aproximación de las Emisiones Contaminantes de los Combustibles usados en el Valle de México**

En este estudio se calculan en forma aproximada la emisión de contaminantes en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y que proceden de fuentes fijas, considerando los combustibles disponibles. Es válido hacer notar que no se incluye el combustóleo por ser este un combustible en fuera de uso, según la Secretaría de Desarrollo Social y el Instituto Nacional de Ecología.

Para tal propósito, se aplica un método basado en las relaciones estequiométricas de combustión, tomando en cuenta aspectos normativos que deben cumplir los equipos de combustión.

Hace un década la industria y el consumo de energía todavía eran condiciones muy marcadas para entender un pleno desarrollo de un país. A medida que los grandes conglomerados de población en el mundo se fueron acrecentando, las industrias, que en su origen estuvieron en los suburbios, fueron propiciando, como en el caso de las Zonas Metropolitanas (Monterrey, Guadalajara, Cd. de México), altas concentraciones de gases emanados de la combustión, tanto de vehículos automotores como de fuentes fijas industriales.

Hoy en día, pese a las medidas adoptadas por el sector gubernamental, no han sido mejoradas en forma importante las condiciones ambientales en el Valle de México. No obstante que las entidades oficiales involucradas han empezado proceso de normatividad desde el punto de vista ecológico, el sector empresarial no ha adoptado, por lo menos hasta hoy en forma seria y responsable acciones tendientes a resolver las problemáticas ambientales de la cual son integrantes.

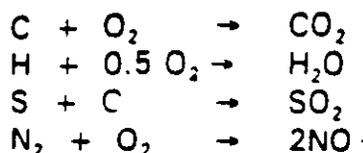
Lo anterior puede deberse, por un lado, a la escasa información y preparación del personal técnico y, por otro lado, al poco entendimiento y concentrización del problema y también según nuestra opinión particular desconocimiento de la relación que existe entre el binomio perfecto:

**Economía (uso eficiente de energía) y optimización de la combustión.  
Reducción de gases contaminantes (optimización de la combustión).**

La gran variedad de equipos, condiciones de operación, en la Cd. de México, motiva que no haya una certeza en cuanto a consumo de combustible. Sin embargo al tomar cantidades globales de consumo de combustible y considerando los combustibles usados en el Valle de México, podemos obtener con cierta aproximación las emisiones contaminantes.

### 3.3.1 Combustibles líquidos

Empleando ecuaciones estequiométricas para combustibles líquidos se obtienen las siguientes reacciones al efectuar una combustión teórica (sin CO ni NO<sub>x</sub>):



A partir de las reacciones antes mencionadas obtenemos los volúmenes parciales en base seca, en el caso I se supone un exceso de aire  $\lambda = 5\%$  y el caso II,  $\lambda = 20\%$ , para los combustibles:

(A) GASOLEO (B) DIESEL

Los cuales se ilustran en las tablas 3.7 y 3.8 respectivamente.

Ahora empleando los datos de consumos específicos anuales para los combustibles indicados, tomados del Balance Nacional de Energía (1991), editado por la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (ISBN 968-874-077-2).

Consumo Anual aproximado para el Valle de México	
GASOLEO	$5.3461 \times 10^9$ [Kg <sub>c</sub> /año]
DIESEL	$919.93 \times 10^6$ [Kg <sub>c</sub> /año]

Tabla 3.6 Consumos Anuales de Combustibles en el Valle de México

Aplicando estos consumos solamente a los volúmenes que son considerados como contaminantes (tabla 3.7 y 3.8) y tomando en consideración  $\eta = 90\%$  de eficiencia en el equipo de combustión, se obtiene la cuantificación de los combustibles al año en la tabla 3.9.

TABLA 3.6. COMBUSTIBLE A) GASOLEO						
VOLUME N PARCIAL	$\lambda = 5\%$			$\lambda = 20\%$		
	(Nm <sup>3</sup> /Kg.)	(Kg./Kg.)	(ppm)	(Nm <sup>3</sup> /Kg.)	(Kg./Kg.)	(ppm)
·CO <sub>2</sub>	1.58040	3.1029	160	1.5802	3.1026	139882
·CO	0.00002	0.0002	200	0.0002	0.00025	180
N	8.08930	10.1068	823970	9.2463	11.5223	819471
·NO <sub>x</sub>	0.00120	0.0026	130	0.00145	0.0029	130
·SO <sub>2</sub>	0.01960	0.0560	2000	0.0192	0.0548	1070
O <sub>2</sub>	0.10700	0.0865	10900	0.4315	0.6161	38200
* SON CONSIDERADOS PRODUCTOS CONTAMINANTES						

TABLA 3.7 COMBUSTIBLE (B) DIESEL						
VOLUME N PARCIAL	$\lambda = 5\%$			$\lambda = 20\%$		
	(Nm <sup>3</sup> /Kg.)	(Kg./Kg.)	(ppm)	(Nm <sup>3</sup> /Kg.)	(Kg./Kg.)	(ppm)
·CO <sub>2</sub>	1.57970	3.1015	61880	1.5795	3.1012	140682
·CO	0.00019	0.00024	200	0.0002	0.00025	180
N	8.03130	10.0343	822970	9.1784	11.4674	817471
·NO <sub>x</sub>	0.00168	0.00260	130	0.00140	0.0029	129
·SO <sub>2</sub>	0.01850	0.05280	1900	0.0190	0.0544	1700
O <sub>2</sub>	0.10830	0.15460	11100	0.4289	0.6124	38200
* SON CONSIDERADOS PRODUCTOS CONTAMINANTES						

- TABLA 3.8 CUANTIFICACION APROXIMADA DE EMISIONES CONTAMINANTES VALLE DE MEXICO				
VOLUMEN DE:	COMB. (A) [Kg/AÑO]		COMB. (B) [Kg/AÑO]	
	$\lambda = 5\%$	$\lambda = 20\%$	$\lambda = 5\%$	$\lambda = 20\%$
CO <sub>2</sub>	1.4929E10	1.4928E10	2.5679E9	2.5676E9
CO	115475760	12028730	2011890	2086400
NO <sub>x</sub>	12509874	13953321	2152637	2442415
SO <sub>2</sub>	269443440	263669652	43715094	45097750

Se ha probado que a ciertas condiciones de exceso de aire, un equipo de combustión no aprueba los estándares ecológicos, por lo que se deben variar estas exigencias normativas para evitar la producción de contaminates.

Por otro lado se ha encontrado la emisión de contaminantes debida a la quema de combustibles líquidos en forma aproximada, tomando en consideración que:

- a) No se conocen en forma precisa las condiciones de operación de toda la gama de equipos existentes en el Valle de México
- b) Las características de los combustibles y su composición son variables las cuales dependen de la entidad procesadora
- c) Los datos de consumo de combustible son tomadas "apriori" en base a los datos globales del Balance Nacional de Energía.

### 3.3.2 Combustibles Gaseosos

De todo lo anterior analizado con anterioridad, ha sido un desarrollo teórico, es decir se ha manejado tanto para Gas L.P. como para Gas Natural una combustión ideal. Ahora bien, lo que se desarrolla a continuación es un análisis considerando una combustión real aproximada, de la cual se obtendrán los volúmenes parciales dada de una composición real aproximada.

### 3.3.2.1 Productos de una combustión real aproximada para el Gas L.P.

**Caso A: Exceso de aire =  $\lambda = 5\%$**

**Composición de los gases secos**

Los volúmenes parciales son:

$$(V_{\text{CO}_2})_p = 3.4720 \left[ \frac{\text{Nm}^3_{\text{CO}_2}}{\text{Nm}^3_c} \right]$$

$$(V_{\text{O}_2})_p = 0.2824 \left[ \frac{\text{Nm}^3_{\text{O}_2}}{\text{Nm}^3_c} \right]$$

$$(V_{\text{N}_2})_p = 22.3000 \left[ \frac{\text{Nm}^3_{\text{N}_2}}{\text{Nm}^3_c} \right]$$

Por lo que el volumen total (Base seca) es:

$$V_T = (V_{\text{CO}_2})_p + (V_{\text{O}_2})_p + (V_{\text{N}_2})_p$$

$$V_T = 3.472 + 0.2824 + 22.30 = 26.0544 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3_c} \right]$$

Las fracciones volumétricas son iguales a:

$$r_{(\text{CO}_2)} = \frac{(V_{\text{CO}_2})_p}{V_T} = \frac{3.4720}{26.0544} = 0.1332$$

$$r_{(\text{O}_2)} = \frac{(V_{\text{O}_2})_p}{V_T} = \frac{0.2824}{26.0544} = 0.0108$$

Por lo que la composición ideal es:

$$r_{(N_2)} = \frac{(V_{N_2})_P}{V_T} = \frac{2.30}{26.0544} = 0.8560$$

$$r_{CO_2} = 133\,200 \text{ ppm}$$

$$r_{O_2} = 10\,800 \text{ ppm}$$

$$r_{N_2} = 855\,900 \text{ ppm}$$

Se considera que una parte de  $CO_2$  se convierte a  $CO$  y que tanto  $N_2$  como  $O_2$  dará origen a una cantidad de  $NO_x$ , de lo anterior se puede determinar una composición real aproximada, la que se muestra a continuación:

$$r_{CO_2} = 132\,950 \text{ ppm}$$

$$r_{CO} = 250 \text{ ppm}^*$$

$$r_{O_2} = 10\,700 \text{ ppm}$$

$$r_{N_2} = 855\,800 \text{ ppm}$$

$$r_{NO_x} = 200 \text{ ppm}^*$$

\*Según Norma ecológica

Recalculando los volúmenes parciales:

$$V_{CO_2} = r_{CO_2} \times V_T = (132\,950 \times 10^{-6}) (26.0544) = 3.4638 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{CO} = r_{CO} \times V_T = (250 \times 10^{-6}) (26.0544) = 0.0065 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{O_2} = r_{O_2} \times V_T = (10\,700 \times 10^{-6}) (26.0544) = 0.2787 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{N_2} = r_{N_2} \times V_T = (855\,800 \times 10^{-6}) (26.0544) = 22.2970 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{NO_x} = r_{NO_x} \times V_T = (200 \times 10^{-6}) (26.0544) = 0.0052 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

Realizando un artificio matemático con la  $(\rho^N)$  del componente, así como con la  $(\rho_c^N)$  del combustible se deduce que:

$$V'_{CO_2} = V_{CO_2} \times \frac{\rho_{CO_2}^N}{\rho_c^N} = 3.4638 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.9630 \left[ \frac{kg_{CO_2}}{Nm_{CO_2}^3} \right]}{2.2489 \left[ \frac{kg_c}{Nm_c^3} \right]} \right) = 3.0235 \left[ \frac{kg_{CO_2}}{kg_c} \right]$$

$$V'_{CO} = V_{CO} \times \frac{\rho_{CO}^N}{\rho_c^N} = 0.0065 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.494 \left[ \frac{kg_{CO}}{Nm_{CO}^3} \right]}{2.2489 \left[ \frac{kg_c}{Nm_c^3} \right]} \right) = 0.0036 \left[ \frac{kg_{CO}}{kg_c} \right]$$

$$V'_{O_2} = V_{O_2} \times \frac{\rho_{O_2}^N}{\rho_C^N} = 0.2787 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_C^3} \right] \left( \frac{1.4279 \left[ \frac{kg_{O_2}}{Nm_{O_2}^3} \right]}{2.2489 \left[ \frac{kg_C}{Nm_C^3} \right]} \right) = 0.1770 \left[ \frac{kg_{O_2}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{N_2} = V_{N_2} \times \frac{\rho_{N_2}^N}{\rho_C^N} = 22.2970 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_C^3} \right] \left( \frac{1.2494 \left[ \frac{kg_{N_2}}{Nm_{N_2}^3} \right]}{2.2489 \left[ \frac{kg_C}{Nm_C^3} \right]} \right) = 12.3873 \left[ \frac{kg_{N_2}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{NO_x} = V_{NO_x} \times \frac{\rho_{NO_x}^N}{\rho_C^N} = 0.0052 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_C^3} \right] \left( \frac{1.3386 \left[ \frac{kg_{NO_x}}{Nm_{NO_x}^3} \right]}{2.2534 \left[ \frac{kg_C}{Nm_C^N} \right]} \right) = 0.00308 \left[ \frac{kg_{NO_x}}{kg_C} \right]$$

**Caso B: Exceso de aire =  $\lambda = 20\%$**   
**Composición de los gases secos**

Los volúmenes parciales son:

$$(V_{CO_2})_p = 3.472 \left[ \frac{Nm_{CO_2}^3}{Nm_C^3} \right]$$

$$(V_{O_2})_p = O_{min} (\lambda - 1) = 5.6481 (1 - 1.20) = 1.1296 \left[ \frac{Nm_{O_2}^3}{Nm_C^3} \right]$$

$$(V_{N_2})_p = (r_{N_2})_c + 0.79 (X_{min} \cdot \lambda) = 0 + 0.79 (26.90 \cdot 1.20) = 25.4900 \left[ \frac{Nm_{N_2}^3}{Nm_C^3} \right]$$

Por lo que el volumen total (Base seca) es:

$$V_T = (V_{CO_2})_P + (V_{O_2})_P + (V_{N_2})_P$$

$$V_T = 3.472 + 1.1296 + 25.49 = 30.0916 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

Las fracciones volumetricas son iguales a:

$$r_{(CO_2)} = \frac{(V_{CO_2})_P}{V_T} = \frac{3.4720}{30.0916} = 0.1153$$

$$r_{(O_2)} = \frac{(V_{O_2})_P}{V_T} = \frac{1.1296}{30.0916} = 0.0375$$

$$r_{(N_2)} = \frac{(V_{N_2})_P}{V_T} = \frac{25.49}{30.0916} = 0.8471$$

Por lo que la composición ideal es:

$$r_{CO_2} = 115\,300 \text{ ppm}$$

$$r_{O_2} = 37\,500 \text{ ppm}$$

$$r_{N_2} = 847\,100 \text{ ppm}$$

Se considera que una parte de  $CO_2$  se convierte a  $CO$  y que tanto  $N_2$  como  $O_2$  dará origen a una cantidad de  $NO_x$ . de lo anterior se puede determinar una composición real aproximada, la que se muestra a continuación:

$$r_{CO_2} = 115\,050 \text{ ppm}$$

$$r_{CO} = 250 \text{ ppm}^*$$

$$r_{O_2} = 37\,400 \text{ ppm}$$

$$r_{N_2} = 846\,900 \text{ ppm}$$

$$r_{NO_x} = 200 \text{ ppm}$$

Según Norma ecológica

Recalculando los volúmenes parciales:

$$V_{CO_2} = r_{CO_2} \times V_T = (115\,050 \times 10^{-6}) (30.0916) = 3.4619 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{CO} = r_{CO} \times V_T = (250 \times 10^{-6}) (30.0916) = 0.0075 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{O_2} = r_{O_2} \times V_T = (37\,500 \times 10^{-6}) (30.0916) = 1.1254 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{N_2} = r_{N_2} \times V_T = (846\,900 \times 10^{-6}) (30.0916) = 25.4840 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{NO_x} = r_{NO_x} \times V_T = (200 \times 10^{-6}) (30.0916) = 0.0060 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

Realizando un artificio matemático con la ( $\rho^N$ ) del componente, así como con la ( $\rho_C^N$ ) del combustible se deduce que:

$$V_{CO_2}^c = V_{CO_2} \times \frac{\rho_{CO_2}^N}{\rho_C^N} = 3.4619 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.9630 \left[ \frac{kg_{CO_2}}{Nm_{CO_2}^3} \right]}{2.2489 \left[ \frac{kg_C}{Nm_c^3} \right]} \right) = 3.0218 \left[ \frac{kg_{CO_2}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{CO} = V_{CO} \times \frac{\rho_{CO}^N}{\rho_C^N} = 0.0075 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.2104 \left[ \frac{kg_{CO}}{Nm_{CO}^3} \right]}{2.2489 \left[ \frac{kg_C}{Nm_c^3} \right]} \right) = 0.0042 \left[ \frac{kg_{CO}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{O_2} = V_{O_2} \times \frac{\rho_{O_2}^N}{\rho_C^N} = 1.1254 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.4279 \left[ \frac{kg_{O_2}}{Nm_{O_2}^3} \right]}{2.2489 \left[ \frac{kg_C}{Nm_c^3} \right]} \right) = 0.7149 \left[ \frac{kg_{O_2}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{N_2} = V_{N_2} \times \frac{\rho_{N_2}^N}{\rho_C^N} = 25.4840 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.2494 \left[ \frac{kg_{N_2}}{Nm_{N_2}^3} \right]}{2.2489 \left[ \frac{kg_C}{Nm_c^3} \right]} \right) = 14.1579 \left[ \frac{kg_{N_2}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{NO_x} = V_{NO_x} \times \frac{\rho_{NO_x}^N}{\rho_C^N} = 0.00601 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.3386 \left[ \frac{kg_{NO_x}}{Nm_{NO_x}^3} \right]}{2.2489 \left[ \frac{kg_C}{Nm_c^3} \right]} \right) = 0.0036 \left[ \frac{kg_{NO_x}}{kg_C} \right]$$

### 3.3.2.2 Productos de una combustión real aproximada para el Gas Natural

*Caso A: Exceso de aire =  $\lambda = 5\%$*

*Composición de los gases secos*

Los volúmenes parciales son:

$$(V_{CO_2})_p = 0.9560 \left[ \frac{Nm_{CO_2}^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$(V_{O_2})_p = 0.0947 \left[ \frac{Nm_{O_2}^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$(V_{N_2})_p = 7.5190 \left[ \frac{Nm^3_{O_2}}{Nm^3_c} \right]$$

Por lo que el volumen total (Base seca) es:

$$V_T = (V_{CO_2})_p + (V_{O_2})_p + (V_{N_2})_p$$

$$V_T = 0.9560 + 0.0947 + 7.5190 = 8.5637 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

Las fracciones volumetricas son iguales a:

$$r_{(CO_2)} = \frac{(V_{CO_2})_p}{V_T} = \frac{0.9590}{8.5637} = 0.1118$$

$$r_{(O_2)} = \frac{(V_{O_2})_p}{V_T} = \frac{0.0947}{8.5637} = 0.0110$$

$$r_{(N_2)} = \frac{(V_{N_2})_p}{V_T} = \frac{7.5190}{8.5637} = 0.8770$$

Por lo que la composición ideal es:

$$r_{CO_2} = 111\ 800 \text{ ppm}$$

$$r_{O_2} = 11\ 000 \text{ ppm}$$

$$r_{N_2} = 877\ 000 \text{ ppm}$$

Se considera que una parte de  $CO_2$  se convierte a  $CO$  y que tanto  $N_2$  como  $O_2$  dará origen a una cantidad de  $NO_x$ , de lo anterior se puede determinar una composición real aproximada, la que se muestra a continuación:

$$r_{CO_2} = 111\ 550\ ppm$$

$$r_{CO} = 250\ ppm$$

$$r_{O_2} = 10\ 900\ ppm$$

$$r_{N_2} = 876\ 900\ ppm$$

$$r_{NO_x} = 200\ ppm$$

Según Norma ecológica

Recalculando los volúmenes parciales:

$$V_{CO_2} = r_{CO_2} \times V_T = (111\ 550 \times 10^{-6}) (8.5727) = 0.9562 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{CO} = r_{CO} \times V_T = 50 \times 10^{-6} (8.5727) = 0.00214 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{O_2} = r_{O_2} \times V_T = (10\ 900 \times 10^{-6}) (8.5727) = 0.0934 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{N_2} = r_{N_2} \times V_T = (879\,900 \times 10^{-6}) (8.57274) = 7.5174 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{NO_x} = r_{NO_x} \times V_T = (200 \times 10^{-6}) (8.5727) = 0.0017 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

Realizando un artificio matemático con la ( $\rho^N$ ) del componente, así como con la ( $\rho_C^N$ ) del combustible se deduce que:

$$V_{CO_2}' = V_{CO_2} \times \frac{\rho_{CO_2}^N}{\rho_C^N} = 0.9562 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.9630 \left[ \frac{kg_{CO_2}}{Nm_{CO_2}^3} \right]}{0.7380 \left[ \frac{kg_C}{Nm_C^3} \right]} \right) = 2.5436 \left[ \frac{kg_{CO_2}}{kg_C} \right]$$

$$V_{CO}' = V_{CO} \times \frac{\rho_{CO}^N}{\rho_C^N} = 0.00214 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.2494 \left[ \frac{kg_{CO}}{Nm_{CO}^3} \right]}{0.7380 \left[ \frac{kg_C}{Nm_C^3} \right]} \right) = 0.00362 \left[ \frac{kg_{CO}}{kg_C} \right]$$

$$V_{O_2}' = V_{O_2} \times \frac{\rho_{O_2}^N}{\rho_C^N} = 0.0934 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.4279 \left[ \frac{kg_{O_2}}{Nm_{O_2}^3} \right]}{0.7380 \left[ \frac{kg_C}{Nm_C^3} \right]} \right) = 0.1807 \left[ \frac{kg_{O_2}}{kg_C} \right]$$

$$V_{N_2}' = V_{N_2} \times \frac{\rho_{N_2}^N}{\rho_C^N} = 7.5174 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.2494 \left[ \frac{kg_{N_2}}{Nm_{N_2}^3} \right]}{0.7380 \left[ \frac{kg_C}{Nm_C^3} \right]} \right) = 12.7266 \left[ \frac{kg_{N_2}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{NO_x} = V_{NO_x} \times \frac{\rho_{NO_x}^N}{\rho_C^N} = 0.0017 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.3386 \left[ \frac{kg_{NO_x}}{Nm_{NO_x}^3} \right]}{0.7380 \left[ \frac{kg_C}{Nm_c^3} \right]} \right) = 0.003108 \left[ \frac{kg_{NO_x}}{kg_C} \right]$$

**Caso B: Exceso de aire =  $\lambda = 20\%$**   
**Composición de los gases secos**

Los volúmenes parciales son:

$$(V_{CO_2})_p = 0.9590 \left[ \frac{Nm_{CO_2}^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$(V_{O_2})_p = O_{\min} (\lambda - 1) = 1.8955 (1 - 1.20) = 0.3791 \left[ \frac{Nm_{O_2}^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$(V_{N_2})_p = (r_{N_2})_c + 0.79 (X_{\min} \lambda) = 0.032 + 0.79 (9.026 \cdot 1.20) = 8.5886 \left[ \frac{Nm_{N_2}^3}{Nm_c^3} \right]$$

Por lo que el volumen total (Base seca) es:

$$V_T = (V_{CO_2})_p + (V_{O_2})_p + (V_{N_2})_p$$

$$V_T = 0.9590 + 0.3791 + 8.5886 = 9.9267 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

Las fracciones volumetricas son iguales a:

$$r_{(CO_2)} = \frac{(V_{CO_2})_p}{V_T} = \frac{0.9590}{9.9267} = 0.0966$$

Por lo que la composición ideal es:

$$r_{(O_2)} = \frac{(V_{O_2})_P}{V_T} = \frac{0.3791}{9.9267} = 0.0381$$

$$r_{(N_2)} = \frac{(V_{N_2})_P}{V_T} = \frac{8.5886}{9.9267} = 0.8652$$

$$r_{CO_2} = 96\ 600\ ppm$$

$$r_{O_2} = 38\ 100\ ppm$$

$$r_{N_2} = 865\ 200\ ppm$$

Se considera que una parte de  $CO_2$  se convierte a  $CO$  y que tanto  $N_2$  como  $O_2$  dará origen a una cantidad de  $NO_x$ , de lo anterior se puede determinar una composición real aproximada, la que se muestra a continuación:

$$r'_{CO_2} = 96\ 350\ ppm$$

$$r_{CO} = 250\ ppm^*$$

$$r'_{O_2} = 38\ 000\ ppm$$

$$r'_{N_2} = 865\ 100\ ppm$$

$$r_{NO_x} = 200\ ppm^*$$

según Norma ecológica

Recalculando los volúmenes parciales:

$$V'_{CO_2} = r'_{CO_2} \times V_T = (96\ 350 \times 10^{-6}) (9.9267) = 0.6564 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3_c} \right]$$

$$V_{CO} = r_{CO} \times V_T = (250 \times 10^{-6}) (9.9267) = 0.0024 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{O_2} = r_{O_2} \times V_T = (38\ 000 \times 10^{-6}) (9.9267) = 0.3772 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{N_2} = r_{N_2} \times V_T = (865\ 100 \times 10^{-6}) (9.9267) = 8.5875 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

$$V_{NO_x} = r_{NO_x} \times V_T = (200 \times 10^{-6}) (9.9267) = 0.0019 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right]$$

Realizando un artificio matemático con la ( $\rho^N$ ) del componente, así como con la ( $\rho_C^N$ ) del combustible se deduce que:

$$V'_{CO_2} = V_{CO_2} \times \frac{\rho_{CO_2}^N}{\rho_C^N} = 0.9564 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.9630 \left[ \frac{kg_{CO_2}}{Nm_{CO_2}^3} \right]}{0.7380 \left[ \frac{kg_C}{Nm_c^3} \right]} \right) = 2.5440 \left[ \frac{kg_{CO_2}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{CO} = V_{CO} \times \frac{\rho_{CO}^N}{\rho_C^N} = 0.0024 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.2494 \left[ \frac{kg_{CO}}{Nm_{CO}^3} \right]}{0.7380 \left[ \frac{kg_C}{Nm_c^3} \right]} \right) = 0.0024 \left[ \frac{kg_{CO}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{O_2} = V_{O_2} \times \frac{\rho_{O_2}^N}{\rho_C^N} = 0.3772 \left[ \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \right] \left( \frac{1.4279 \left[ \frac{kg_{O_2}}{Nm_{O_2}^3} \right]}{0.7380 \left[ \frac{kg_C}{Nm_c^3} \right]} \right) = 0.7298 \left[ \frac{kg_{O_2}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{N_2} = V_{N_2} \times \frac{\rho_{N_2}^N}{\rho_C^N} = 8.5875 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3} \right] \left( \frac{1.2494 \left[ \frac{kg_{N_2}}{Nm^3} \right]}{0.7380 \left[ \frac{kg_C}{Nm^3} \right]} \right) = 14.5382 \left[ \frac{kg_{N_2}}{kg_C} \right]$$

$$V'_{NO_x} = V_{NO_x} \times \frac{\rho_{NO_x}^N}{\rho_C^N} = 0.0019 \left[ \frac{Nm^3}{Nm^3} \right] \left( \frac{1.3386 \left[ \frac{kg_{NO_x}}{Nm^3} \right]}{0.7380 \left[ \frac{kg_C}{Nm^3} \right]} \right) = 0.0036 \left[ \frac{kg_{NO_x}}{kg_C} \right]$$

A continuación se muestra un resumen de las combustiones reales del Gas L.P. y el Gas Natural, para lo cual se tomó en cuenta la Norma Ecológica para el Valle de México [1], dichas combustiones se muestran en las Tablas 3.9 y 3.10

Tabla 3.9 Caso Gas L.P.				
Producto de la Combustión	λ = 5%		λ = 20%	
	[kg/kg <sub>c</sub> ]	[ppm]	[kg/kg <sub>c</sub> ]	[ppm]
*CO <sub>2</sub>	3.0174	132950	3.0157	115050
*CO	0.0036	250	0.0041	250
N <sub>2</sub>	12.3625	855800	14.1296	846900
*NO <sub>x</sub>	0.0030	200	0.0035	200
O <sub>2</sub>	0.1766	10700	0.7131	37400

\* Son considerados productos contaminantes

Tabla 3.10 Caso Gas Natural				
Producto de la Combustión	$\lambda = 5\%$		$\lambda = 20\%$	
	[kg/kg <sub>c</sub> ]	[ppm]	[kg/kg <sub>c</sub> ]	[ppm]
*CO <sub>2</sub>	2.5436	111550	2.5440	96350
*CO	0.0036	250	0.0024	250
N <sub>2</sub>	12.7266	876900	14.5382	865100
*NO <sub>x</sub>	0.0031	200	0.0036	200
O <sub>2</sub>	0.1807	10900	0.7298	38000

\* Son considerados productos contaminantes

## **CAPITULO 4 Legislación Ambiental**

### **4.1 Introducción**

En este capítulo se trata de presentar de una manera clara y sencilla -mediante el uso de cuadros sinópticos- la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, incluyendo el Reglamento a seguir en Materia de Prevención y Control de la Contaminación a la Atmósfera.

Se incluye lógicamente una presentación de la Norma Oficial Mexicana NOM-CCAT-019-ECOL/1993 (NE), Contaminación atmosférica -fuentes fijas- niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas (PM<sub>10</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y humo, así como los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de combustión de calentamiento indirecto utilizados en las fuentes fijas, que usan combustibles fósiles líquidos.

Y como complemento, se elabora una comparación gráfica de la Norma Mexicana de la Calidad del Aire y distintas normas internacionales. Estas normas de calidad del aire establecen las concentraciones máximas de ciertos contaminantes a las que, de acuerdo con la experiencia nacional e internacional, se puede garantizar la no afectación de la salud.

### **4.2 Ley Federal del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente**

Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de Enero de 1988.  
Gaceta Ecológica: Volumen 1, Numero 1, Junio de 1989.

ARTICULO 1º - La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tiene por objeto establecer las bases para:

- I.- Definir los principios de la política ecológica general y regular los instrumentos para su aplicación
- II.- El ordenamiento ecológico
- III.- La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente
- IV.- La protección de las áreas naturales y la flora y fauna silvestres y acuáticas
- V.- El aprovechamiento racional de los elementos naturales de manera que sea compatible la obtención de beneficios económicos con el equilibrio de los ecosistemas

- VI.- La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo
- VII.- La concurrencia del gobierno federal, de las entidades federativas y de los municipios, en la materia, y
- VIII.- La coordinación entre las diversas dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, así como la participación corresponsable de la sociedad, en las materias de este ordenamiento.

#### 4.3 Norma Técnica Ecológica

##### NOM-CCAT-019-ECOL/1993 (NE)

Publicada en el Diario Oficial de la federación el 30 de Marzo de 1993. Gaceta Ecológica, Volumen V, Número 26, Diciembre 1993.

Esta norma oficial mexicana establece los niveles máximos permisibles de emisión de partículas, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y humo, así como los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de combustión de calentamiento indirecto utilizados en las fuentes fijas que usan combustibles fósiles líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones.

Los equipos de combustión, con capacidad hasta de 5,200 MJ/hr (150 cc) deberán operar con un contenido de oxígeno menor a 6.3 % para el caso de combustibles gaseosos y oxígeno menor de 10.5 % para combustible líquido.

Para los efectos de esta norma oficial mexicana, se consideran zonas críticas por las altas concentraciones de contaminantes de la atmósfera que registran, las siguientes:

Las Zonas Metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, los centros de población de: Coatzacoalcos-Minatitlan, Estado de Veracruz; Irapuato-Celaya-Salamanca, Estado de Guanajuato; Tula-Vito Apasco, Estado de Hidalgo y de México; Corredor Industrial de Tampico-Madero-Altamira, Estado de Tamaulipas y la Zona Fronteriza Norte.

#### 4.4 Comparación de la Norma Mexicana de Calidad del Aire con otras Normas Internacionales

Las normas de calidad del aire para México han estado vigentes desde Noviembre de 1989, fecha en la que el Sector Salud, las puso en vigor.

Las normas de calidad del aire en México expresan las concentraciones máximas de aquellos contaminantes para los que ya existen criterios de afectación los seres vivos en períodos específicos de exposición, como son; PST, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>.

En la elaboración del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), esta norma de la calidad del aire representa el nivel 100 de la escala y consecuentemente es el valor determinante de la calidad del aire en una región y tiempo específicos.

UN INDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE TIENE POR OBJETO PRIMORDIAL SERVIR COMO UNA HERRAMIENTA DE COMUNICACION ENTRE LAS AUTORIDADES ENCARGADAS DE ADMINISTRAR LOS PROBLEMAS DE CONTAMINACION AMBIENTAL Y EL PUBLICO EN GENERAL, ES DECIR, LA CIUDADANIA.

NORMA MEXICANA DE LA CALIDAD DEL AIRE			
CONTAMINANTES	FORMULA QUIMICA	PARTES POR MILLON	Mg/M3
MONOXIDO DE CARBONO	CO	13 EN 8 HRS	14872 EN 8 HRS.
OZONO	O <sub>3</sub>	0.11 EN 1 HR.	216 EN 1 HR
BIOXIDO DE NITROGENO	NO <sub>2</sub>	0.21 EN 1 HR.	395 EN 1 HR.
BIOXIDO DE AZUFRE	SO <sub>2</sub>	0.13 EN 24 HRS.	340 EN 24 HRS
PARTICULAS SUSPENDIDAS	PST	NA	275 EN 24 HRS

### Referencias

- [1] Balances Nacionales de Energía, 1992, SEMIP.
- [2] Norma Nacional: NOM-CCAT-019-ECOL/1992  
Gaceta Ecológica, Volumen V, número 26, Diciembre 1993.
- [3] Sánchez-Flores A. Et al. Aproximación de las Emisiones contaminantes de combustibles quemados en el Valle de México, Tercer Simposium de Calderas y Recipientes a Presión, CANACINTRA, Nov. 5, 1993.
- [4] Sánchez-Flores A. Et al. Determinación Gráfica de productos de combustión en Combustibles de uso Industrial, Tercer Simposium de Calderas y Recipientes a Presión, CANACINTRA, Nov. 5, 1993.
- [5] Sánchez-Flores A. Combustión para mecánicos ESIME-UPA, 1992 México.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**DIPLOMADO EN INGENIERÍA DE CALDERAS Y  
RECIPIENTES SUJETOS A PRESIÓN**

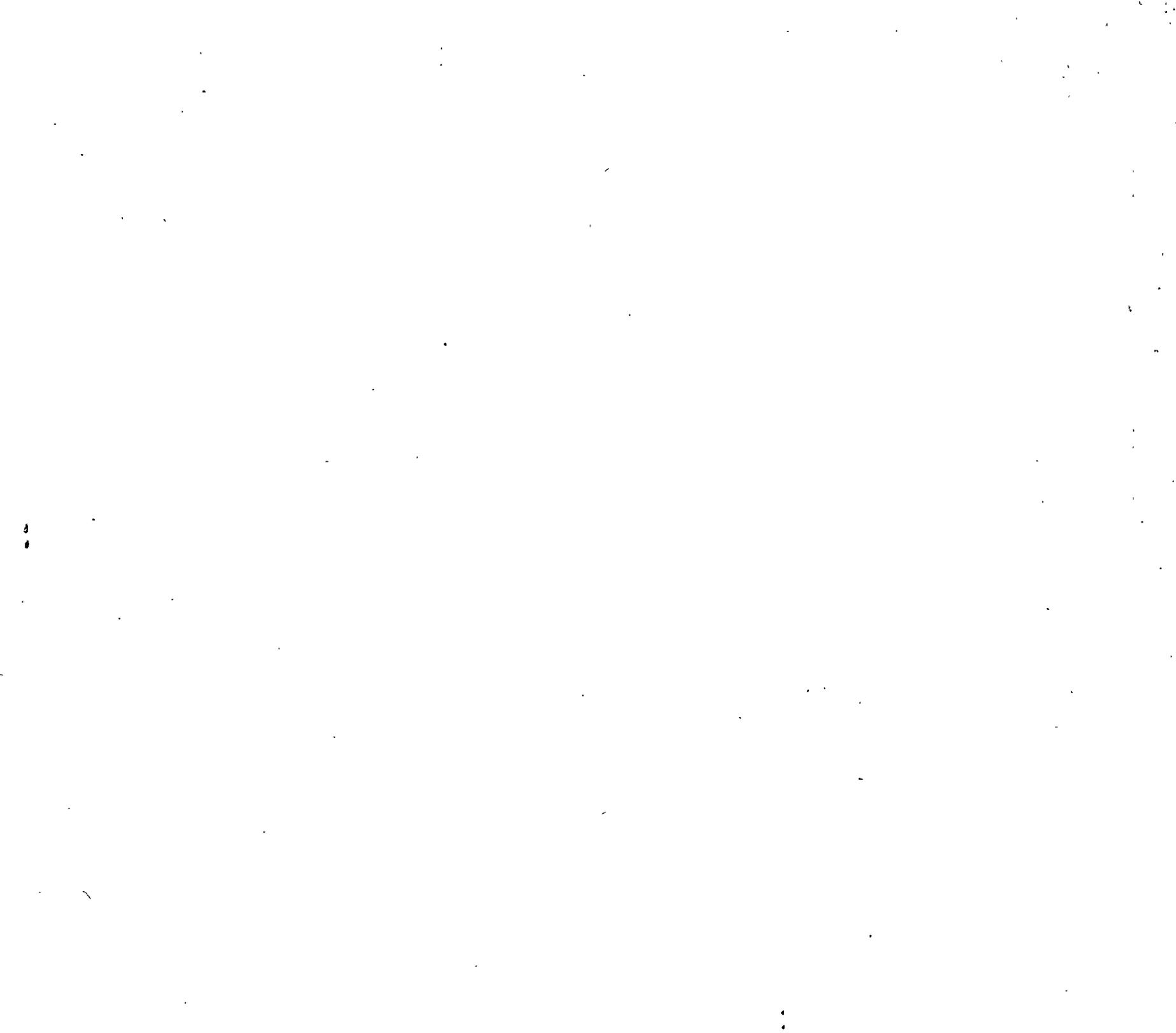
**MODULO IV: INGENIERÍA DE COMBUSTIÓN  
E INSTALACIONES**

**TEMA:**

**TRATAMIENTO QUÍMICO DEL AGUA**

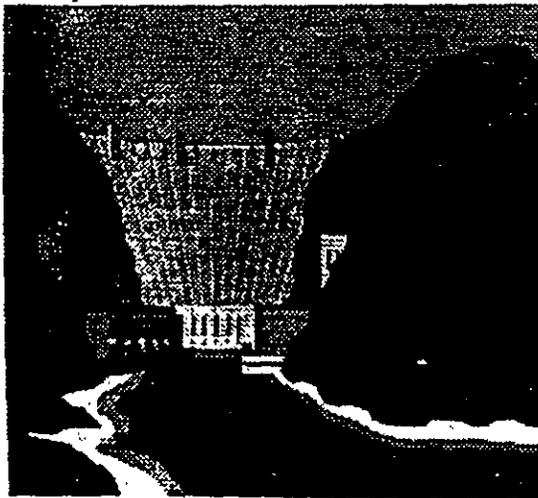
**EXPOSITOR: ING. MIGUEL ALONSO CASTILLO HOIL**

**PALACIO DE MINERÍA  
1997**



# **DIPLOMADO EN INGENIERÍA DE CALDERAS Y RECIPIENTES DE ALTA PRESIÓN**

## **TRATAMIENTO QUÍMICO DEL AGUA**



Expositor: Ing. Miguel Alonso Castillo Holm



# DIPLOMADO EN INGENIERIA DE CALDERAS Y RECIPIENTES SUJETOS A PRESION

## TEMA.- Tratamiento de agua.

### El agua.

El agua es un compuesto químico constituido por 2 átomos de Hidrógeno y 1 de oxígeno y que se expresa por la fórmula  $H_2O$ .

Debido a sus propiedades es considerado como el solvente universal de todas las sustancias por lo que no se encuentra puro en la naturaleza. Cualquiera que sea su procedencia el agua siempre contendrá impurezas en solución o suspensión.

El volumen de agua existente es una cantidad constante y por lo tanto, no es ampliable a voluntad.



Se trata sin lugar a dudas, de un recurso unitario que debe estar disponible no sólo en la cantidad necesaria sino también con la calidad debida.

Esta disponibilidad de cantidad y calidad debe obtenerse sin degradar el medio ambiente en general y el propio recurso en particular.

En la naturaleza el agua circula continuamente a través del ciclo hidrológico de:

Precipitación o lluvia

Escurrimiento

Infiltración

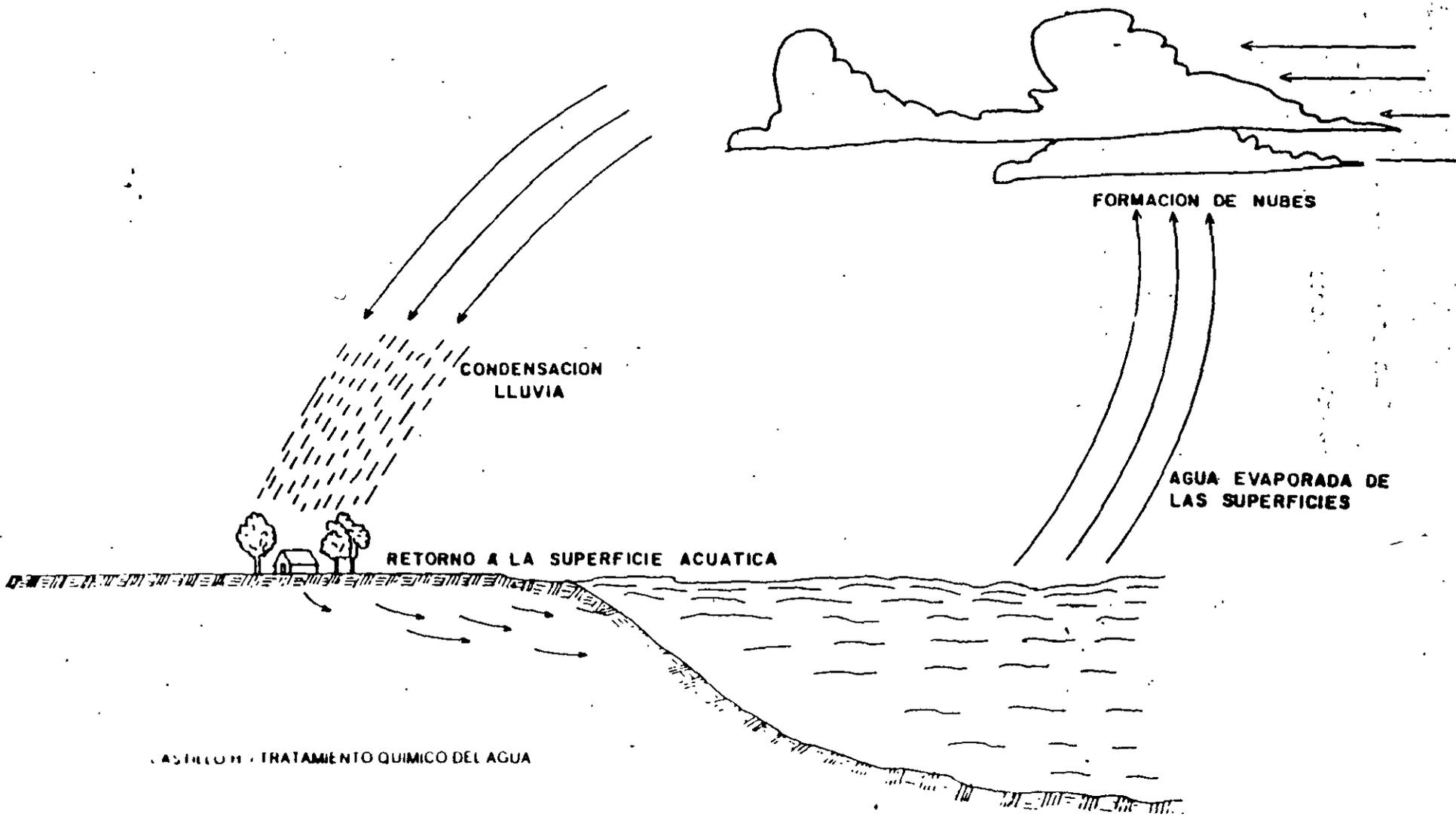
Retención o almacenamiento

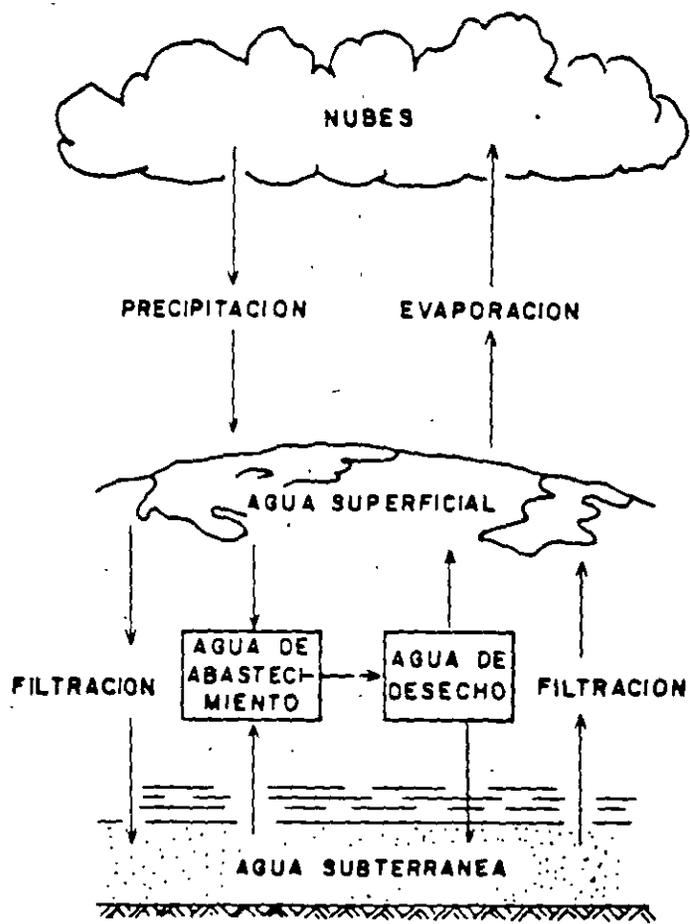
Evaporación

Reprecipitación o lluvia, etc.

Este ciclo es interferido por el hombre en alguno de sus pasos causando las más de las veces importantes disminuciones en los recursos al retomarla CONTAMINADA.

# CICLO NATURAL DEL AGUA.





**CICLO HIDROLOGICO**

M. A. CASTILLO H. / TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA

## Origen y Características del Agua.

El agua puede provenir de 4 fuentes principales:

- Agua de lluvia y superficial
- Agua de manantiales y ríos
- Agua de pozos y perforaciones
- Agua de mar.

El agua de estas fuentes que no han recibido ningún tratamiento se le conoce como AGUA CRUDA, y debido a las impurezas que contiene para su uso deberá analizarse y tratarse en caso necesario.

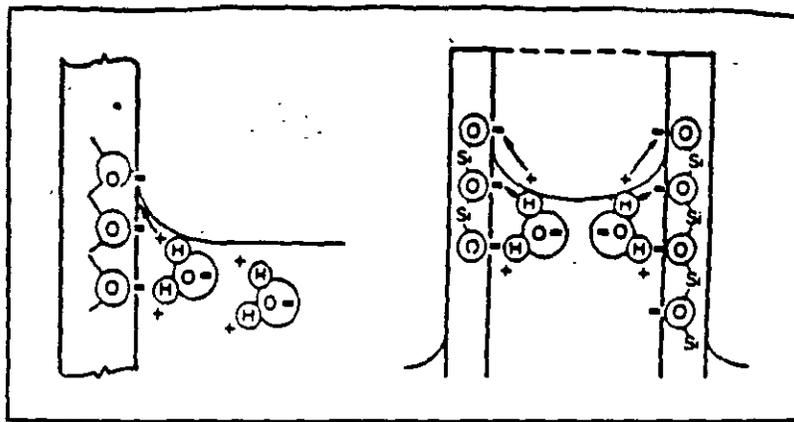
Alguna de las características del agua, por lo que se utiliza en la industria son:

- Entre las sustancias inorgánicas comunes tiene la más alta capacidad para absorber calor sin cambiar su temperatura.

- No sufre alteraciones químicas con calentamiento dentro del rango de temperatura encontrados.
- A la temperatura ambiente puede controlarse y hacerse fluir fácilmente
- Su manejo no presenta riesgos.
- "Es aún abundante y barata".

Todo lo anterior se debe a que su estructura molecular es fuera de lo común para una molécula que tiene un peso molecular tan pequeño.

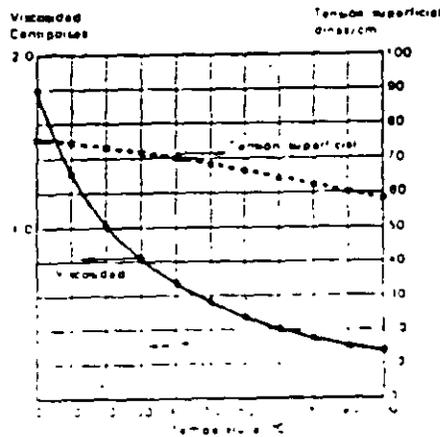
Un dipolo de una molécula de agua tiende a unirse a otra molécula análoga a través de sus polos contrarios formando un compuesto llamado dihidrol.



Se forma un menisco (izquierda) cuando los átomos de hidrógeno se mueven hacia arriba para humedecer la superficie del óxido en la línea de agua en un tubo de vidrio. El dibujo de la derecha muestra cómo los "puentes de hidrógeno" del agua en un tubo de vidrio delgado hacen que el agua en el tubo suba por arriba del nivel del agua que la rodea.



Una aguja de acero, con una densidad de aproximadamente siete veces la del agua, puede flotar debido a la elevada tensión superficial del agua.



La tensión superficial y la viscosidad descienden cuando el agua se calienta.

## **Impurezas del agua.**

Las impurezas que se encuentran generalmente se pueden clasificar de la manera siguiente:

## CLASIFICACION DE IMPUREZAS EN EL AGUA

1 - Sustancias en suspensión	a) Inorgánicas	{ Limo (0.05 - 0.002 mm) Arena (2 - 0.05 mm)
	b) Orgánicas	Material vegetal y animal
2 - Sustancias disueltas	a) Sales Inorgánicas	OH, CO <sub>3</sub> , HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , Cl, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , Na, K, NH <sub>4</sub> , Ca, Mg, Fe
	b) Sales orgánicas	
	c) Gases	CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
3 - Impurezas Coloidales	Arcilla y sílice muy finamente dividida (0.002 mm), hidróxidos de hierro y aluminio, productos orgánicos residuales, ácidos húmicos, sustancias colorantes.	

Todas estas impurezas son causas potenciales de problemas, por lo que se hace necesario su eliminación mediante un tratamiento adecuado.

El cuadro siguiente relaciona las principales impurezas del agua los problemas que pueden causar y algunos tratamientos para su eliminación.

## IMPUREZAS DEL AGUA.

IMPUREZA	FORMULA QUIMICA	DIFICULTADES Y PROBLEMAS	GUIA DE TRATAMIENTO
<u>SOLIDOS EN SUSPENSION</u>			
TURBIDIDAD	COMPUESTOS VARIOS SE EXPRESA EN UNIDADES	IMPARTE APARIENCIA INDESEABLE. CAUSA DEPOSITOS EN LINEAS, EQUIPOS DE PROCESO Y DE INTERCAMBIO DE CALOR.	COAGULACION, ASENTAMIENTO, FILTRACION.
<u>SOLIDOS EN SUSPENSION Y SOLIDOS DISUELTOS</u>			
COLOR	COMPUESTOS VARIOS SE EXPRESA EN UNIDADES	CAUSA ESPUMA EN CALDERAS. INTERFIERE EN ANALISIS COLORIMETRICOS, PUEDE TENER O COLOREAR EL PRODUCTO EN ALGUNOS PROCESOS.	COAGULACION Y FILTRACION, CLORACION, ADSORCION POR CARBON ACTIVADO.
<u>SOLIDOS DISUELTOS</u>			
DUREZA	SALES DE CALCIO Y MAGNESIO EXPRESADA COMO $CaCO_3$ .	PRINCIPAL FUENTE DE INCRUSTACIONES EN EQUIPO DE INTERCAMBIO DE CALOR, CALDERAS, LINEAS Y TUBERIAS. FORMA GRUMOS CON EL JABON.	SUAVIZACION, DESMINERALIZACION, DESTILACION, TRATAMIENTO INTERNO, DISPERSION.
ALCALINIDAD	BICARBONATOS ( $HCO_3^-$ ) CARBONATOS ( $CO_3^{2-}$ ) E HIDROXIDOS (OH)	ESPUMA Y ARRASTRES DE SOLIDOS EN LA PRODUCCION DE VAPOR. FRAGILIZACION DEL ACERO EN CALDERAS. LOS CARBONATOS Y BICARBONATOS PRODUCEN $CO_2$ AL CALENTARSE Y ESTE GAS ES CORROSIVO.	SUAVIZACION POR CAL-SODA. TRATAMIENTO ACIDO. DESALCALINIZACION POR INTERCAMBIO IONICO. DESTILACION.
ACIDEZ MINERAL	ACIDOS LIBRES ( $H_2SO_4$ , $HNO_3$ Y HCl) EXPRESADOS COMO $CaCO_3$ .	CORROSION GENERAL	NEUTRALIZACION CON ALCALIS
	CONCENTRACION DE IONES HIDROGENO (DEFINIDO POR $pH = \log \frac{1}{[H^+]}$ )	EL VALOR VARIA DE ACUERDO A LA ACIDEZ O ALCALINIDAD DEL AGUA. LAS AGUAS NATURALES OSCILAN DE 6.0 A 8.5.	pH DEBE SER REGULADO CON ALCALIS O ACIDOS SEGUN EL CASO (NATURALES).

IMPUREZA	FORMULA QUIMICA	DIFICULTADES Y PROBLEMAS	GUIA DE TRATAMIENTO
SULFATOS	$SO_4 =$	LAS SALES ALCALINAS TIENEN CARACTER CORROSIVO.	DESMINERALIZACION, DESTILACION Y OSMOSIS INVERSA.
CLORURDS	$Cl^-$	LAS SALES DE CALCIO Y MAGNESIO SON- INCRUSTANTES INCREMENTA LOS SOLIDOS DISUELTOS EN EL AGUA Y SU CARACTER- CORROSIVO.	DESMINERALIZACION, DESTILACION Y OSMOSIS INVERSA.
NITRATOS	$NO_3^-$	INCREMENTA SOLIDOS EN EL AGUA (PERO ALTAS CONCENTRACIONES SON RARAS) -- UTIL PARA CONTROLAR LA FRAGILIZA -- CION EN CALDERAS.	DESMINERALIZACION, DESTILACION Y OSMOSIS INVERSA.
SILICE	$SiO_2$	INCRUSTACION Y DEPOSITOS EN EL AGUA DE ENFRIAMIENTO Y DE CALDERAS. VAPO- RIZACION EN LAS CALDERAS Y DEPOST - TOS EN ALABES DE TURBINAS.	PROCESOS DE REMOSION EN CA -- LIENTE CON SALES DE MAGNESIO. ADSORCION POR RESINAS DE IN - TERCAMBIO IONICO FUERTEMENTE- BASICAS. DESTILACION Y OSMOSIS INVERSA.
hierro	$Fe^{++}$ (FERROSO)	COLORACION Y PRECIPITACION EN EL -- AGUA. DEPOSITOS EN LINEAS, CALDERAS -- ETC. ATACA LAS RESINAS DE INTERCAM -- BIO IONICO.	AEREAACION, COAGULACION Y FIL -- TRACION, SUAVIZACION CON CAL. -- INTERCAMBIO CATIONICO.
MANGANESO	$Fe^{++}$ (FERRICO)	INTERFIERE EN ALGUNOS PROCESOS.	FILTRACION POR CONTACTO.
	$Mn^{++}$	MISMOS QUE EL FIERRO	MISMOS QUE PARA EL FIERRO.
ACEITES Y GRASAS	EXPRESADO COMO MA- TERIALES EXTRACTA- BLES POR CLOROFORMO.	DEPOSITOS, LODOS Y ESPUMADO EN CALDE RAS. IMPIDE LA TRANSMISION DE CALOR -- INDESEABLE EN LA MAYOR PARTE DE PRO -- CESOS.	SEPARACION MECANICA, COAGULA - CION Y FILTRACION. FILTRA -- CION A TRAVES DE TIERRA DIA - TOMACEA.
<u>GASES</u>			
DIOXIDO DE CARBONO	$CO_2$	CORROSION EN LINEAS DE AGUA Y PAR - TICULARMENTE EN LINEAS DE VAPOIR Y - CONDENSADO.	DEAREACION, NEUTRALIZACION -- CON ALCALIS, USO DE AMINAS FIL -- MICAS Y NEUTRALIZANTES.

IMPUREZA	FORMULA QUIMICA	DIFICULTADES Y PROBLEMAS	GUIA DE TRATAMIENTO
OXIGENO	$O_2$	CORROSION EN LINEAS DE AGUA, EQUIPO DE INTERCAMBIO DE CALOR, CALDERAS, RE-TORNO DE CONDENSADO.	DEAERACION, ELIMINADORES DE OXIGENO (HIDRAZINA, SULFITO DE SODIO) INHIBIDORES DE CORROSION.
SULFURO DE HIDROGENO	$H_2S$	CAUSA OLOR A HUEVOS PODRIDOS. CORROSION GENERAL. VENENOSO.	AERACION, CLORACION. INTERCAMBIO IONICO CON RESINAS FUERTEMENTE BASICAS.
AMONIACO	$NH_3$	CORROSION DEL COBRE, ZINC Y SUS ALEACIONES. FORMACION DE IONES SOLUBLES-COMPLEJOS.	INTERCAMBIO CATIONICO. CLORACION. DEAERACION.
CONDUCTIVIDAD	EXPRESADA EN MMHOS/CM	RESULTADO DE SOLIDOS IONIZABLES EN SOLUCION. UNA ALTA CONDUCTIVIDAD INCREMENTA LAS CARACTERISTICAS CORROSIVAS DEL AGUA.	CUALQUIER PROCESO QUE DISMINUYA EL CONTENIDO DE SALES DISUELTAS. DESMINERALIZACION, DESTILACION. OSMOSIS INVERSA. ELECTRODIALISIS.
SOLIDOS SUSPENDIDOS	VARIOS COMPUESTOS	SOLIDOS SUSPENDIDOS ES LA CANTIDAD DE MATERIA EN SUSPENSION DETERMINADA POR GRAVIMETRIA. TAPAN LINEAS, CAUSAN DEPOSITOS EN EQUIPO DE TRANSFERENCIA DE CALOR CALDERAS, CONDENSADORES, ETC.	DECANTACION, FILTRACION PRECEDIDA DE COAGULACION.
SOLIDOS TOTALES	VARIOS COMPUESTOS	SUMA DE SOLIDOS DISUELTOS E INSOLUBLES. SE DETERMINA POR GRAVIMETRIA.	COMBINACION DE METODOS ARRIBA MENCIONADOS.
MATERIA ORGANICA	VARIOS COMPUESTOS	CORROSION, DEPOSITOS Y ESPUMA (EN CALDERAS). CONTAMINA LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO.	CLORACION

## Análisis del agua

El análisis del agua es un análisis físico-químico que se efectúa para valorar su calidad para su utilización.

Las principales impurezas del agua, las constituyen los sólidos disueltos disociados en partículas con carga positiva (CATIONES) y partículas con carga negativa (ANIONES).

Los cationes más comunes en el agua son: Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ) y Sodio ( $\text{Na}^+$ ) y menos comunes el Hierro ( $\text{Fe}^{++}$  o  $\text{Fe}^{+++}$ ) y el Manganeseo ( $\text{Mn}^{++}$ ).

Los aniones más comunes en el agua son: Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), Carbonatos ( $\text{CO}_3^{--}$ ), Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{--}$ ), Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y en aguas contaminadas, los Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ )

La Sílice es otro anión que se encuentra presente en forma de silicatos solubles y en ocasiones en estado coloidal

Otras impurezas importantes, son los gases disueltos, como el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) el Oxígeno ( $\text{O}_2$ ), el Acido Sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) el Metano ( $\text{CH}_4$ ) y el Amoniáco ( $\text{NH}_3$ ).

Los problemas de corrosión y de incrustación o depósitos debidos a las impurezas del agua, se deben a cuatro factores.

- La solubilidad de cada impureza
- La temperatura
- La alcalinidad o acidez del agua (pH)
- Las condiciones de oxidación o reducción presentes.

Cuando el agua se evapora, las impurezas se concentran y se depositan cuando se excede el límite de solubilidad, debido a la temperatura o al pH.

Basándose en la solubilidad, los minerales comunes en las aguas naturales se pueden tener cuatro grupos:

- Compuestos de Calcio y Magnesio
- Compuestos de Sodio

- Sílice
- Compuestos de Hierro y Manganeso

La Solubilidad de los diferentes Compuestos son afectados por varios factores:

Compuesto	Factor	Efecto
Sales de Calcio y Magnesio.	Temperatura del agua	Disminuye la solubilidad y la alcalinidad también disminuye.
		Aumenta el CO <sub>2</sub> .
Sales de Na	Temperatura	Aumenta.
Oxidos de Fe y Sílice	Temperatura	No varía sensiblemente
Sílice	Alcalinidad	Aumenta

Con relación a los gases disueltos en el agua (Oxígeno, Dióxido de Carbono, Amoníaco) depende:

- Su reacción química con el agua, o su presencia como gas libre.
- Su presión parcial en el agua y en la atmósfera que lo rodea.
- La temperatura del agua

Así tenemos:

Gas	Factor	Efecto
Oxígeno	No se ioniza	Se disuelve y se remueve mecánicamente por de areación o común eliminador químico.
Bióxido de Carbono y Amoniaco.	Están ionizados	Eliminación en forma de neutralización.

Como las impurezas que se encuentran en el agua, están en cantidades muy pequeñas, el resultado de un análisis se expresa en partes por millón (ppm) o en partes por billón (ppb), en vez de expresarlas en porcientos.

Una parte por millón significa una parte de la substancia en un millón de partes de agua, independientemente de la unidad de peso que se utilice. Ejem:

1 gramo en 1 millón de gramos.

1 libra en 1 millón de libras.

Considerando que la densidad del agua es de 1 gr/ml, entonces:

$$1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg/l}$$

$$= 1 \text{ gr/m}^3$$

entonces la ppb será mil veces menor, es decir:

$$1 \text{ ppb} = 1 \text{ mg/m}^3$$

Algunas equivalencias de estas unidades para análisis químicos son:

$$1 \text{ ppm} = 0.0583 \text{ grano/U.S. galón}$$

$$1 \text{ grano/U.S. gal} = 17.1 \text{ ppm.}$$

Para facilitar el manejo aritmético de los resultados de los diversos análisis del agua, se suelen convertir a una base común.

Generalmente se utiliza el Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) cuyo peso Molecular es 100.

— Reportados los resultados de esta manera, en términos de  $\text{CaCO}_3$  se pueden sumar o restar directamente. Sin embargo, la tendencia es a expresar los resultados de un análisis químico es en equivalentes por millón (epm). Estos se obtienen dividiendo las ppm entre su peso equivalente (El peso equivalente se obtienen dividiendo su Peso Molecular entre su valencia). En caso de estar expresada en términos de  $\text{CaCO}_3$ , se dividirá entre 50, que es su peso equivalente.

Se muestra enseguida un análisis típico de un agua de pozo.

# COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Química

Determinó \_\_\_\_\_

Revisó \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_

No. \_\_\_\_\_

PRUEBA POZO No. 3

C A R A C T E R E S F I S I C O S		
Turbidez	Sedimento	Color
<b>C A T I O N E S</b>		
	EN TERMINOS DE	P. P.
Calcio (Ca+ +)	CaCO <sub>3</sub>	160
Magnesio (Mg+ +)	CaCO <sub>3</sub>	112
Sodio (Na-1)	CaCO <sub>3</sub>	288.88
<b>TOTALES</b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>560.88</b>
<b>A N I O N E S</b>		
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> )	CaCO <sub>3</sub>	90
Carbonatos (CO <sub>3</sub> =)	CaCO <sub>3</sub>	0
Hidróxidos (OH=)	CaCO <sub>3</sub>	0
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	SO <sub>4</sub>	288
Cloruros (CL=)	CL	48
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	NO <sub>3</sub>	128
<b>TOTALES</b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>560.88</b>
<b>D E T E R M I N A C I O N E S</b>		
Dureza Total	CaCO <sub>3</sub>	272
Dureza de no Carbonatos	CaCO <sub>3</sub>	182
Dureza de Carbonatos	CaCO <sub>3</sub>	90
Alcalinidad a la Fenoltaleina	CaCO <sub>3</sub>	0
Alcalinidad al Anaranjado de Metilo	CaCO <sub>3</sub>	90
Anidrido Carbónico Libre	CO <sub>2</sub>	-
Fosfatos (PO <sub>4</sub> =)	PO <sub>4</sub>	-
Sulfitos (SO <sub>3</sub> =)	CO <sub>3</sub>	-
Fierro	Fe	-
Silice	SiO <sub>2</sub>	52
Materia Orgánica	O <sub>2</sub>	-
Sólidos Totales Disueltos	CaCO <sub>3</sub>	67.92
Conductividad Especifica	Micromhos	1120

pH 7.6

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

Con relación a algunas determinaciones comentaremos lo siguiente:

- La Dureza Total ( $\text{CaCO}_3 = 272 \text{ ppm}$ ) representa el contenido de Calcio y Magnesio ( $160 + 112$ )
- El Contenido de Magnesio, se obtiene restando el Calcio a la Dureza Total ( $272 - 160 = 112$ )
- La Dureza de Carbonatos representa la cantidad de Ca y Mg que se encuentra combinada con los Carbonatos y Bicarbonatos presentes en el agua.
- La Dureza de No Carbonatos representa la cantidad de Ca y Mg combinada con los ácidos minerales (Cloruros de Sulfatos, etc.). Se obtiene al restar a la Dureza Total la Dureza de Carbonatos ( $272 - 90 = 182$ ).
- Las alcalinidades a la fenolftaleína (F) y al anaranjado de Metilo (M) representan la cantidad de carbonatos y bicarbonatos presentes, respectivamente ( $F = 0$  y  $M = 90$ ).

En el agua cruda, generalmente, toda la alcalinidad presente se debe a Bicarbonatos (M).

- La conductividad específica es una medida de la conducción de la corriente eléctrica del agua y está relacionada directamente con la cantidad de Sólidos disueltos. Se expresa en mmhos (micromhos/cm a 25°C).
- El pH determina la acidez o la alcalinidad del agua si expresa de 0 a 14.

Un pH de 7 corresponde a un agua neutra. Si el valor se desplaza a cero indica acidez y si se desplaza a 14 indica alcalinidad.

## TRATAMIENTO EXTERNO DEL AGUA

Las impurezas del agua ocasionan problemas de corrosión e incrustación, principalmente en los equipos de intercambio de calor y en tuberías, causando pérdidas de eficiencia y fallas en los equipos, con los consiguientes paros costosos por reemplazos de partes, reparaciones, además de la falta de suministro que se cause.

Para depurar el agua, generalmente es preciso utilizar uno o combinar varios tratamientos elementales, cuyas bases pueden ser físicas, químicas o biológicas y, cuyo efecto es el de eliminar en primer lugar, la materia en suspensión, después las coloidales y por último las sustancias disueltas (minerales u orgánicas).

Finalmente se corregirán ciertas características.

Todo esto dependerá de:

- La calidad del agua disponible
- El uso del agua acondicionada o tratada
- La calidad necesaria de esta agua a utilizar.

Lo anterior se el conoce como "tratamiento externo del agua".

Algunos de los tratamientos elementales a mencionar, son:

- Decantación o flotación
- Filtración
- Coagulación y floculación
- Precipitación
  - Cal - Coagulante en frío
  - Cal - Carbonato en caliente
- Suavización
- Desmineralización

- **Separación por membranas**
  - **Osmosis inversa**
  - **Ultrafiltración**
  - **Electrodiálisis**
- **Destilación o Evaporación**

Existen más tratamientos y la sofisticación y complejidad, dependerá de la calidad del agua, tanto de la disponible a tratar como de la que se va a utilizar

La presencia en el agua cruda, de diversas sustancias sólidas constituye, indudablemente, la parte más importante y aparente de la contaminación. Esta parte sólida deberá eliminarse para evitar grandes inconvenientes, como son la obstrucción de conducciones, equipos de intercambio, abrasión de bombas, equipo de medición, etc.

La separación de estas partículas sólidas pueden hacerse de 2 maneras

- **Decantación o flotación**
- **Filtración o tamizado.**

En el proceso de decantación se aprovecha la acción directa de la pesantez, por simple decantación en función del grosor y del peso específico de las partículas, o por flotación, fijando sobre las partículas burbujas de aire sistemáticamente introducidas en la suspensión.

Puede acelerarse artificialmente el primer proceso, mediante la intervención de la fuerza centrífuga (hidrociclones o centrifugadoras).

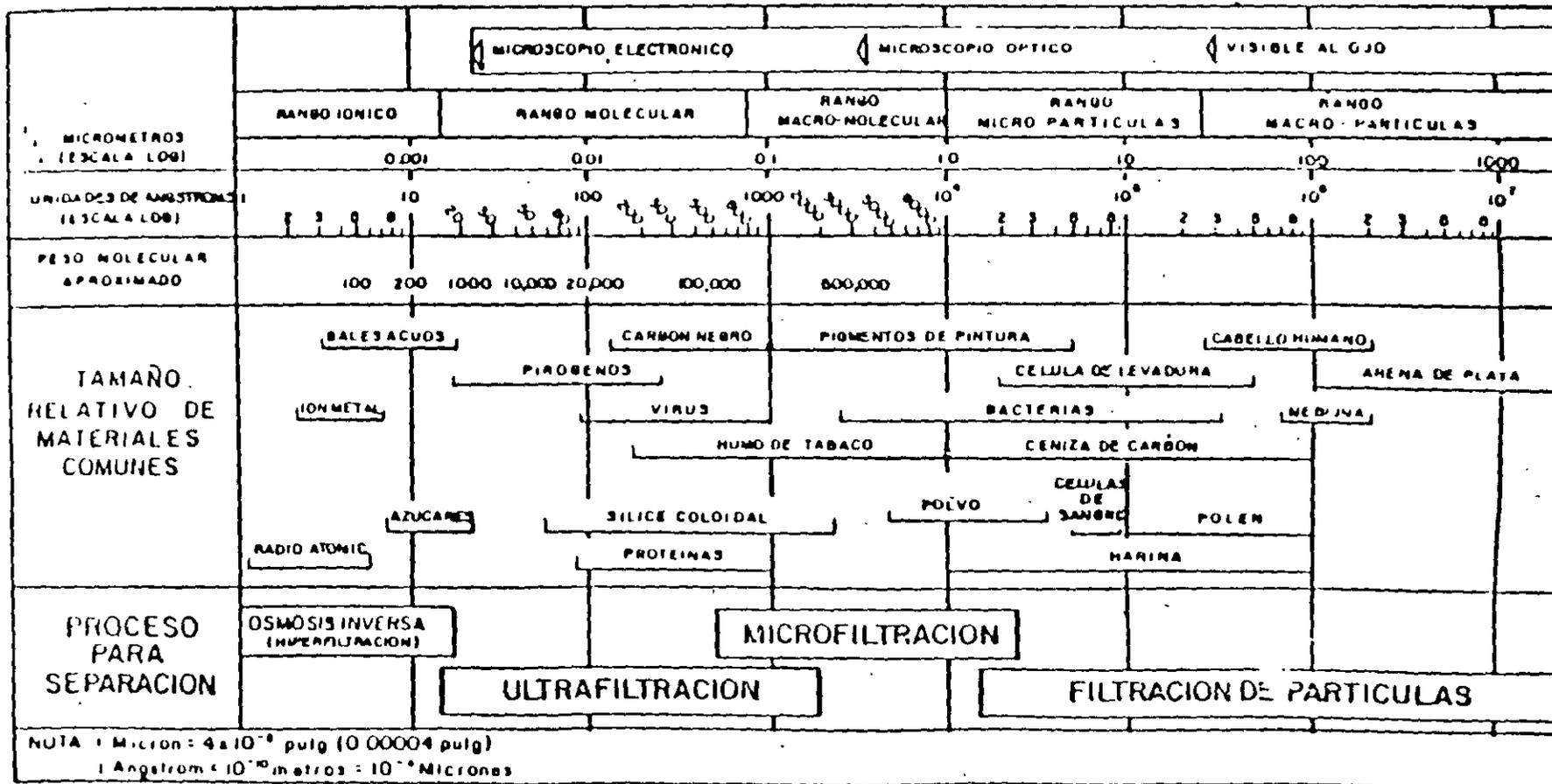
Aparentemente, es muy sencillo lo anterior, sin embargo, se tropieza con la gran dificultad debida a la gran dispersión del tamaño de las partículas (incluso para un determinado tipo de contaminación).

El cuadro siguiente, relaciona ciertos materiales y organismos, con su tamaño medio, así como el orden de magnitud del tiempo necesario para que estas partículas recorran verticalmente un metro de agua, únicamente por la influencia de su peso.

Diámetro de la partícula (mm)	Material	Tiempo de sedimentación para 1m (orden de magnitud)
10	Grava	1 segundo
1	Arena	10 segundos
0.1	Arena fina	2 minutos
0.01	Arcilla	2 horas
0.001	Bacteria	8 días
0.0001	Partícula Coloidal	2 años
0.00001	Partícula Coloidal	20 años

En efecto, un litro de agua de buena calidad puede contener varias decenas de millones de partículas del orden de una micra, aunque estas partículas pesen, en total, menos de 0.1 mg.

### EL ESPECTRO DE FILTRACION



# FILTRACION

La filtración es un procedimiento en el que se utiliza el paso de una mezcla sólido-líquido a través de un medio poroso (filtro) que retiene los sólidos y deja pasar los líquidos (filtrado).

Si las materias en suspensión que deben separarse tienen una dimensión superior a la de los poros, quedarán retenidas en la superficie del filtro. La filtración, en este caso, se denomina superficial o en torta o sobre soporte. En caso contrario de que las materias queden retenidas en el interior de la masa porosa la filtración se denomina en volumen, en profundidad o sobre lecho filtrante.

La misión de los filtros es retener, en la superficie o en el seno de la masa filtrante, las partículas que contiene un líquido.

La "filtración sobre la superficie" se efectúa:

- A través de un soporte delgado de mallas, desbaste por rejas, tamizado, microtamizado, filtro prensa, filtro prensa al vacío, etc.
- A través de un soporte grueso, filtros de material aglomerado o sintetizado o de cartuchos.
- A través de soporte con precapa filtros de bujías, de bastidores, discos o tambores, etc.

La "filtración a través de un lecho filtrante" se efectúa cuando la cantidad de materias que deben retenerse es grande y la dimensión de las partículas contenidas en el agua, es relativamente pequeña, es decir, es preciso que la materia pueda penetrar profundamente dentro del lecho y no bloquearlo en su superficie.

Para lograr esto, es necesario elegir cuidadosamente él o los materiales, tanto en su granulometría como en la altura de la capa, para lograr obtener la calidad del agua deseada.

Si sólo se desea reducir los sólidos en suspensión, esta filtración (o una rápida) será suficiente, pero si se desea eliminar, en caso de haber coloración o materia orgánica será necesario un pretratamiento.

Cuando la filtración es rápida y se desea obtener una clarificación óptima, es necesario acondicionarla previamente, por adición de reactivos con o sin decantación.

Un filtro se atasca a medida que su lecho, se carga de materias retenidas. Cuando el atascamiento es excesivo o la calidad del filtrado no es aceptable, debe procederse al lavado del lecho filtrante. Con este lavado, el lecho filtrante debe recuperar sus cualidades iniciales de filtración; sin las cuales, el filtro irá perdiendo eficacia y el material filtrante deberá retirarse para su limpieza completa o su reemplazo.

Un reparto uniforme del agua en el interior del filtro a través de la masa filtrante es muy importante, así como el sistema de soporte del lecho filtrante.

Dependiendo de las características de las partículas que deben retenerse, la filtración puede efectuarse a través de una capa de mayor o menor altura:

- De material homogéneo.
- De dos o varias capas de material de diferentes granulometrías de material homogéneo a cada nivel.
- Sobre una o varias capas de diferentes granulometrías totalmente heterogénea y escalonada.

La eficacia de un filtro depende, fundamentalmente de:

- La regulación de su caudal.
- Evitar fluctuaciones de sus flujos.
- Evitar golpes de arriete.

Todo esto durante la operación y lavado

**No existe un filtro universal.**

**Para cada problema se hará un diseño adecuado.**

En la elección de un filtro es muy importante asegurarse de tener un lavado fácil, eficaz y económico, así como la obtención de la mejor calidad de agua filtrada, ya que ésta agua, sólo se obtendrá, de forma constante, si el lavado mantiene siempre intacto el material filtrante.

# FILTROS A PRESIÓN

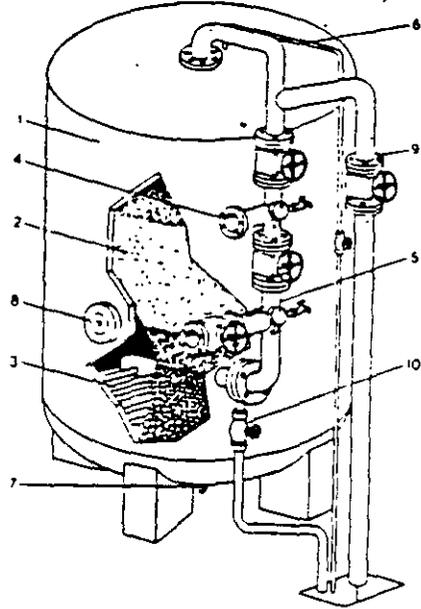
Estos filtros son, generalmente, metálicos.

## Filtros verticales lavables sólo con agua

Van equipados con materiales filtrantes cuya granulometría y densidad deben elegirse de acuerdo con la velocidad de retorno de agua de lavado, que es necesario prever para su expansión. La capa filtrante descansa sobre un soporte de lechos sucesivos de materiales de granulometría creciente hacia abajo y la toma de agua filtrada se efectúa por un colector ramificado perforado, embebido en la capa de granulometría mayor.

En la mayoría de los casos, la capa filtrante es única, arena o antracita.

- 1 - Cuerpo del filtro
- 2 - Masa filtrante
- 3 - Colector.
- 4 - Entrada de agua bruta
- 5 - Salida de agua filtrada
- 6 - Purga de aire
- 7 - Vaciado.
- 8 - Agujero de mano
- 9 - Salida de agua de lavado
- 10 - Envío eventual de las primeras aguas filtradas.



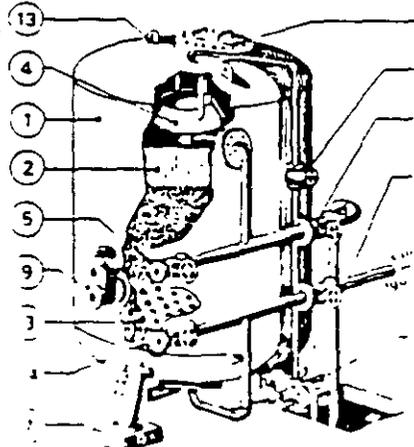
Filtro cerrado a presión con lavado por retorno de agua

## Filtros verticales lavables por aire y agua

### FILTROS CON CAPA ÚNICA HOMOGÉNEA, LAVADOS SIMULTANEAMENTE

El lecho filtrante, homogéneo en toda su altura, descansa sobre el falso fondo metálico perforado, al cual se fijan unos anillos en los que van rosca-das las boquillas metálicas o de plástico, según la naturaleza y la temperatura del líquido a filtrar.

- 1 - Cuerpo del filtro
- 2 - Masa filtrante
- 3 - Falso fondo con boquillas
- 4 - Arqueta de alimentación
- 5 - Entrada de agua bruta
- 6 - Salida de agua filtrada
- 7 - Entrada de agua de lavado
- 8 - Salida de agua de lavado
- 9 - Entrada de aire de lavado
- 10 - Purga de aire
- 11 - Mecanismo de vaciado
- 12 - Agujero de bombeo
- 13 - Asa para elevación



Filtro tipo F. 23

### 3.4.4 ELECCION DE BOQUILLAS COLECTORAS FILTRANTES PARA EL LAVADO DE FILTROS RAPIDOS

Según la forma de lavado, existen dos tipos de boquillas colectoras que se fijan en el falso fondo.

- boquillas para el lavado sólo con agua:

Estas boquillas se diferencian por su forma, la anchura de sus ranuras y el material con que están fabricadas.

- boquillas para lavado con agua y aire:

La repartición del aire se realiza

— por un colector ramificado perforado, dispuesto bajo el falso fondo, con boquillas tipo D 13 (fig 162) que permiten el paso de la mezcla agua-aire.

— mediante un colchón de aire utilizando boquillas de cola (figs 164 a 167) especialmente concebidas para este uso, con las que se obtiene una perfecta equirrepartición del aire y del agua

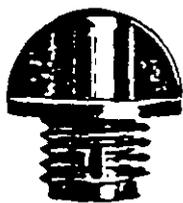


Fig 162 —  
Boquilla D 13 de  
material plástico

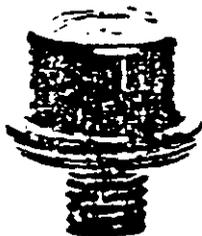


Fig 163 —  
Boquilla D 15 de  
material plástico



Fig 164 — Boquilla D 20 de material plástico con casquillo de empotramiento para falso fondo de hormigón



Fig 165 —  
Boquilla D 25 de  
material plástico  
con anillo de fijación para falso fondo metálico

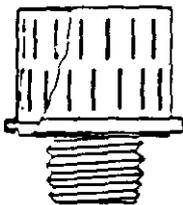


Fig. 166 — Boquilla D 50,  
metálica.



Fig 167 — Boquilla D 50  
metálica, de cola larga

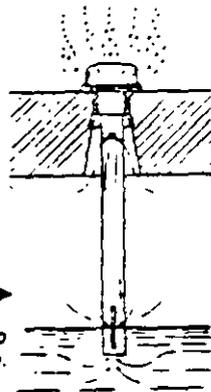


Fig 168 —  
Boquilla en periodo  
de lavado de filtro,  
con aire y agua.

## COAGULACION Y FLOCULACION

Para permitir la separación de una suspensión coloidal en condiciones de velocidad satisfactorias por sus pesantes, es necesario aglomerar los coloides para formar partículas de tamaño mucho mayor.

Esta aglomeración se efectúa por medios artificiales, que resulta de dos acciones diferentes:

- Una desestabilización, producida generalmente, por la adición de reactivos químicos, que anulan las fuerzas repulsivas o actúan sobre la hidrofilia de las partículas coloidales.
- Una aglomeración de los coloides "descargados", hasta la obtención de un tamaño de 0.1 micra aproximadamente y después por agitación mecánica, las conduce a un tamaño suficiente de los flóculos

A la primera acción de desestabilización se le denomina COAGULACION y a la segunda acción, de aglomeración de los coloides descargados se le denomina FLOCULACION.

Los reactivos correspondientes serán "coagulantes" y "floculantes" respectivamente.

La separación sólido - líquido del floculo formado y del agua puede hacerse por filtración, por decantación o flotación y filtración (opcional).

## PRINCIPALES COAGULANTES

Los Coagulantes principalmente utilizados son las sales de Aluminio o de hierro. Se usan también productos sintéticos como los polielectrolitos catiónicos.

Todos estos productos químicos actúan sobre los coloides del agua por medio del agua por medio del catión (+) que neutralizan los coloides negativos. Los polielectrolitos catiónicos pueden trabajar solos o mezclados con una sal metálica.

### Coagulantes Comunes Metálicos

Nombre	Fórmula
Sulfato de Aluminio (Alumbre)	$\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$
Cal	$\text{Ca} (\text{OH})_2$
Cloruro Férrico	$\text{Fe} \text{Cl}_3 - 6\text{H}_2\text{O}$
Sulfato Férrico	$\text{Fe}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$
Sulfato Ferroso (Caparrosa verde)	$\text{Fe} \text{SO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$
Aluminato de Sodio	$\text{Na}_2 \text{Al}_2 \text{O}_4$

## Polímeros orgánicos

Clase	Peso Molecular
1.- Coagulantes Catiónicos:	Abajo de 100 000
Poliaminas	
Policuaternarios	
Poli cloruro de dialil-dimetil amonio	
Epi dimetil amina	
2.- Floculantes Catiónicos	Arriba de 1 000 000
Copolímeros de Acril amida y dimetil- amino etil-metacrilato	
Acril amida y CD ADMA	
Aminas MANICH	
3.- Floculantes no iónicos	Arriba de 1 000 000
Poli acrilamidas	
4.- Floculantes aniónicos	Arriba de 1 000 000
Poliacrilatos	
5.- Copolímeros de acrilamida y acrilato	Arriba de 1 000 000

Los Coagulantes metálicos son muy sensibles al pH y a la alcalinidad. Si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre.

A diferencia de las sales inorgánicas, los polímeros no producen flóculos voluminosos ni gelatinosos. Tampoco afectan al pH, ni su desempeño es sensible al pH del agua tratada.

De la floculación:

Una vez formado el flóculo por la acción del coagulante, será necesario aumentar su volumen, su peso y sobre todo su cohesión.

Esto se logrará si existen las condiciones siguientes:

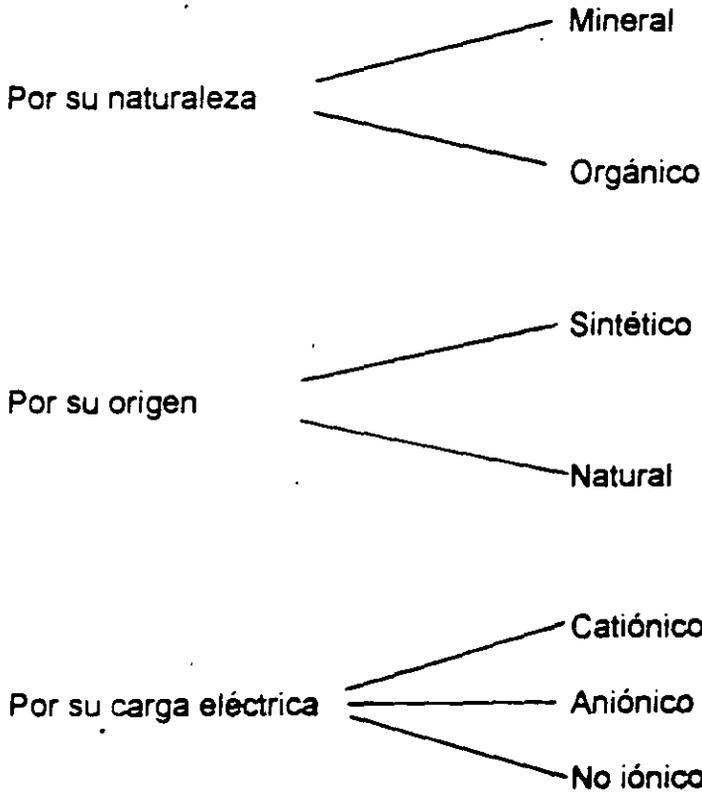
- Una coagulación previa, tan perfecta como sea posible.
- Un incremento de la cantidad de flóculos en el agua.

Para lograr esto, se recirculan los lodos formados, para poner en contacto el agua con los precipitados ya formados.

- Una agitación homogénea y lenta del conjunto, con el fin de mejorar el contacto.
- El uso de floculantes.

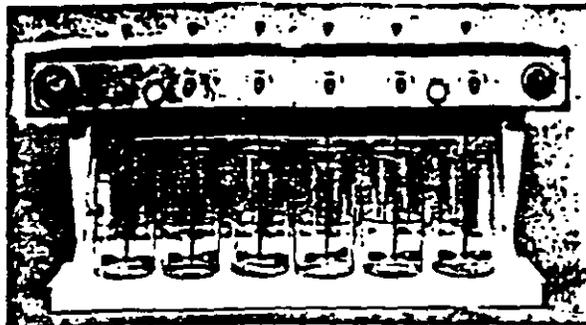
Estos son también llamados "ayudantes de coagulación", "ayuda floculantes".

Estos productos, pueden ser:



La sílice activada fue el primer floculante que se empleó y hasta la fecha en algunos casos el que mejor resultado puede dar, en partículas, si se utiliza junto con el sulfato de alúmina.

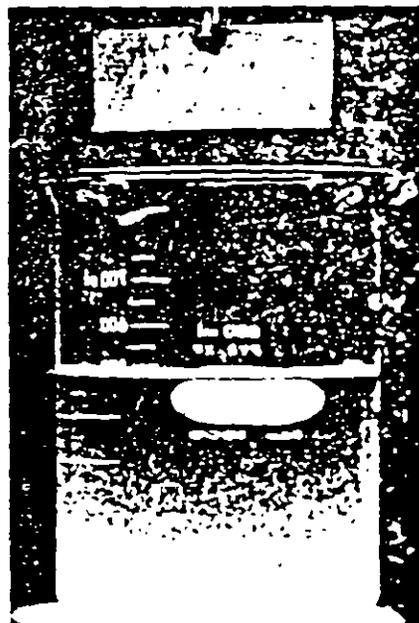
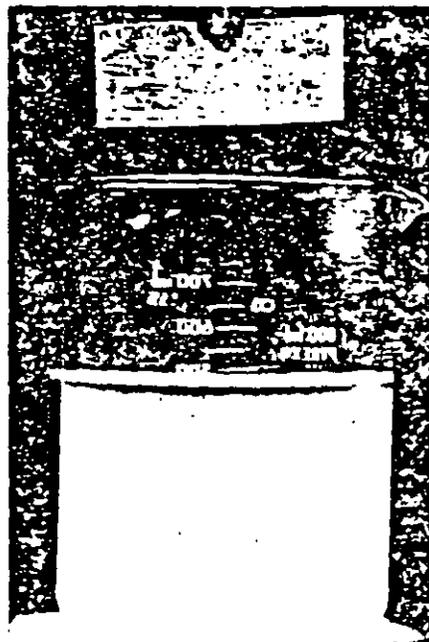
La elección de coagulante y del floculante se hará después de un estudio de laboratorio para determinar la naturaleza y las dosis de reactivos para el tratamiento de un agua en particular.



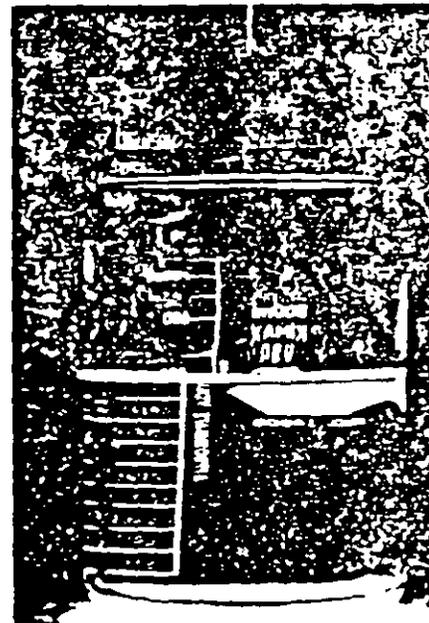
Flocculador HYDROCURE de accionamiento eléctrico, con variador de velocidad y aparato de relojería.



(a)



(b)



Una vez que se ha completado la preparación de la muestra se toma una muestra de 25 ml de la muestra y se coloca en un tubo de ensayo. La muestra se agita vigorosamente durante 15 segundos para asegurar la dispersión de las partículas. Después de esto se añade un volumen conocido de agua destilada a un volumen conocido de la muestra. La muestra se agita vigorosamente durante 15 segundos y se deja reposar durante 5 minutos. Después de esto se toma una muestra de 25 ml de la muestra y se examina la muestra después de un tiempo determinado. Obsérvese el floculo fino que escapa de ser capturado por el tubo de ensayo. Después de 5 a 10 minutos de asentamiento se examina y prueba el floculo y puede registrarse la naturaleza y el volumen del floculo. En algunos casos el floculo observado en la siguiente serie de pruebas de la jarra

## PRECIPITACION

Una vez que el agua ha sido extraída de su fuente, donde pudo haberse encontrado en un estado de equilibrio, suele exponerse a bombeo, aereación, calentamiento, etc., que pueden cambiar su estabilidad y producir corrosión o incrustación. Esto puede conocerse encontrando el Índice de Estabilidad del agua. Un factor importante para este cálculo es el producto de solubilidad del Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y la concentración de ciertos iones en el agua.

El proceso de precipitación emplea el producto de solubilidad de un compuesto que contiene un ion o radical que es considerado perjudicial y que, por lo tanto, debe ser eliminado antes de utilizar el agua. El caso más común es la reducción de la concentración de iones de Calcio<sup>++</sup> y Magnesio<sup>++</sup> por precipitación como  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Mg}(\text{CO}_3)$ .

Por precipitación química se entiende, la formación por la acción de los reactivos apropiados de Compuestos insolubles de los elementos indeseables.

El mecanismo de la precipitación del Carbonato cálcico y el hidróxido de magnesio; para el primer caso ( $\text{CaCO}_3$ ), la reacción de la cal sobre el agua cruda es extraordinariamente lenta, en ausencia de "gérmenes de cristalización". Por el contrario, cuando el agua y la cal se ponen en contacto con una masa suficiente de cristales de  $\text{CaCO}_3$  ya precipitados, la reacción alcanza su equilibrio en unos minutos.

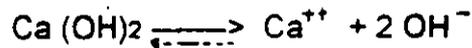
Esto se efectúa, si la superficie de los cristales de  $\text{CaCO}_3$  se encuentra suficientemente limpia. La presencia de coloides orgánicos puede impedir la cristalización, para evitar estos se añaden coagulantes y floculantes para eliminarlos.

## CAL-COAGULANTE EN FRIO

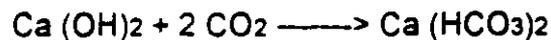
Este tratamiento se efectúa a temperatura ambiente, elimina la turbidez, el color y materia en suspensión, por esto, se les denomina a los equipos de este tratamiento floculadores y clarificadores también.

La dureza constituida por las sales de Ca y Mg, son reducidas en este tratamiento, por el proceso de precipitación, que predomina en este tratamiento, como CaCO<sub>3</sub>.

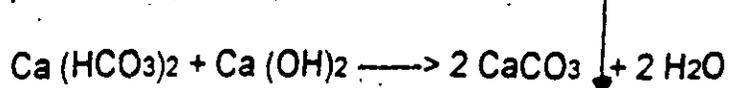
Puesto que la alcalinidad de casi toda el agua cruda esta formada por bicarbonatos y generalmente contiene CO<sub>2</sub>, la precipitación del Carbonato de Calcio requiere la conversión del CO<sub>2</sub> y del HCO<sub>3</sub>, de acuerdo con las siguientes reacciones químicas:



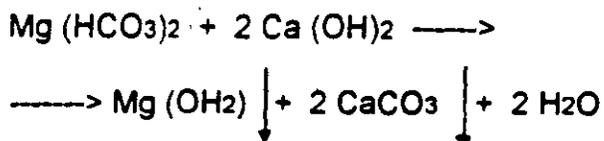
para el CO<sub>2</sub>:



para el Ca (HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>



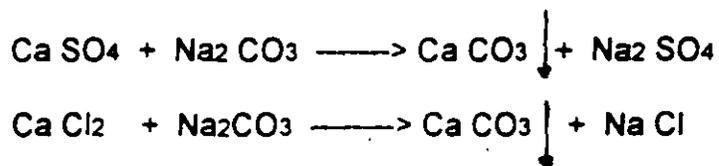
para el Mg (HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

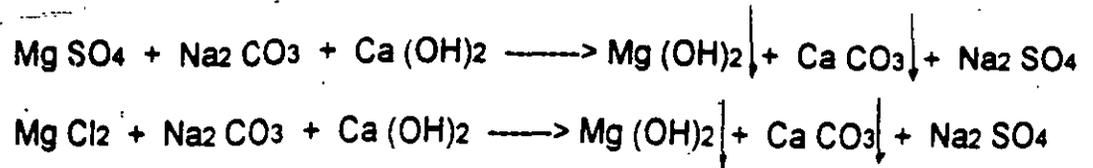


De esta manera, se han convertido las sales solubles a sales insolubles (precipitado que se separa por asentamiento).

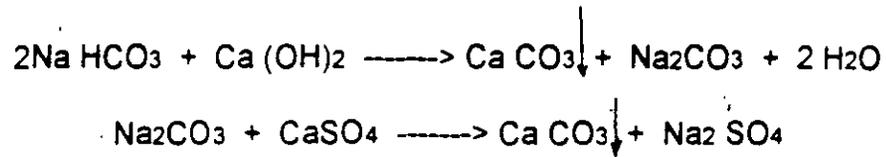
Dado que la dureza de Ca y Mg puede ser "de Carbonato" o "no Carbonato", las reacciones anteriores convirtieron la "dureza Carbonato".

La "dureza no Carbonato" esta dada por las sales de Ca y Mg, derivadas de ácidos minerales (sulfatos, cloruro, nitratos...). Esta se reduce, mediante la adición de carbonato de Sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), de acuerdo a las siguientes reacciones químicas:





Cuando existe alcalinidad de Sodio en el agua cruda, se elimina mediante la adición de Yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) y Cal ( $\text{Ca (OH)}_2$ ):



La cal reacciona con el bicarbonato de Sodio, precipitando Carbonato de Calcio y el Carbonato de Sodio formado reacciona con el Yeso para dar nuevamente Carbonato de Calcio (precipitado) y sulfato de sodio.

Se observa que al final quedo sulfato de sodio, en vez del bicarbonato de Sodio inicial, pero en la mayoría de los casos el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  es menos problema que el  $\text{Na HCO}_3$ .

En este tipo de tratamiento de agua, se puede lograr:

- Reducción de la dureza de Calcio hasta de 35 ppm como la  $\text{CO}_3$ .
- Reducción de la dureza de Magnesio hasta cualquier valor deseado.
- Reducción de la alcalinidad total hasta 35 ppm como  $\text{CaCO}_3$ .
- Reducción de los sólidos totales disueltos en proporción igual a la reducción de la alcalinidad y de la dureza de Carbonatos.
- Eliminación total del bióxido de carbono.

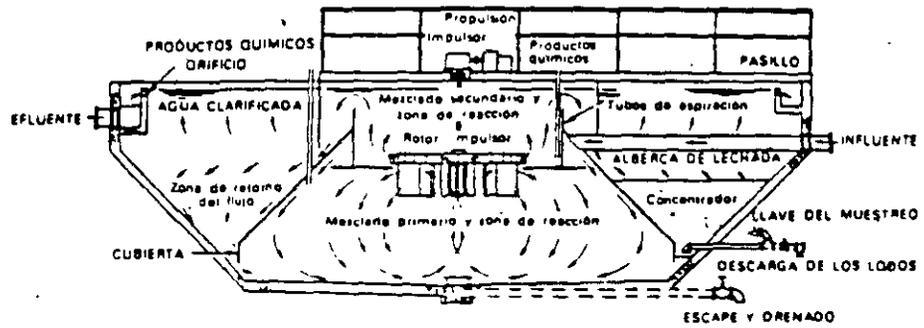
En este tipo de tratamiento, es necesario el uso de coagulantes, para lograr una mejora en el tiempo de asentamiento de los productos de reacción insolubles

Los equipos de tratamiento de Cal-coagulante en frío, según su forma de operación pueden ser:

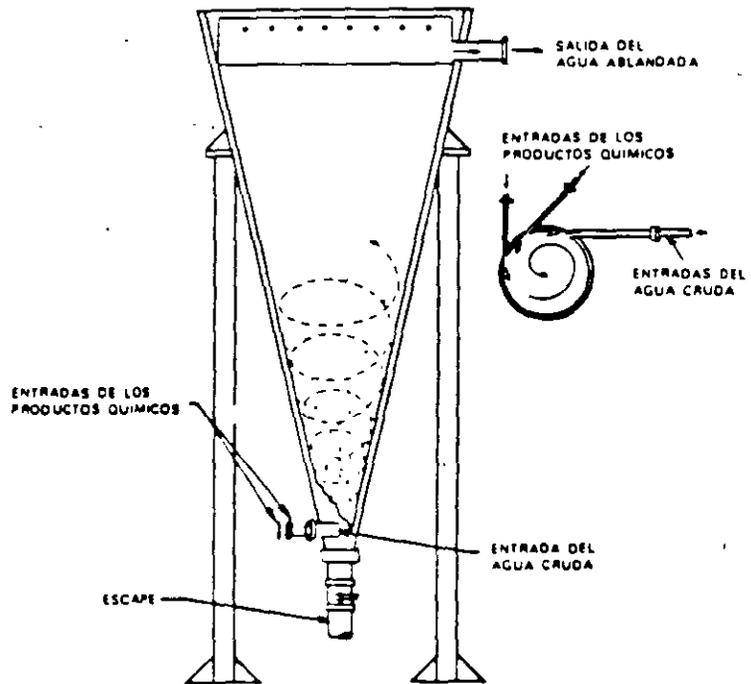
## TIPOS DE TRATAMIENTO CAL-COAGULANTE EN FRIO SEGUN SU FORMA DE OPERAR

EQUIPO	OPERACION	OBSERVACIONES
<p>- Intermitente</p>	<p>Método de llenado y vaciado, varios tanques. Uno en limpieza y los demás en operación. Operación sencilla. Efluente sobre saturado de Ca Co<sub>3</sub>. Se usa para plantas pequeñas.</p>	<p>Adición de agua cruda y prod. químicos simultánea. Agitación y reposo para sedimentación. (4 a 8 horas). Bajo Costo inicial. Mucha supervisión. Mayor espacio (En desuso).</p>
<p>- De Sedimentación continua (llamado también CONVENCIONAL)</p>	<p>Adición de agua cruda y prod's químicos en forma continua Un sólo tanque, alto fondo plano, con un cilindro central. Dosificadores en seco o en solución. Agitación lenta para buena formación de flóculos, que precipitan. Estos se recirculan para ayudar a la formación de flóculos más grandes. El efluente debe ser tratado para su estabilización. (adición de gas carbónico o con ácido para evitar la formación de Ca CO<sub>3</sub>).</p>	<p>Agua y prods. químicos encuentran por arriba al cilindro central, hacia abajo, forma lodos y el flujo cambia de sentido hacia arriba, produciendo agua de buena calidad (4 horas aprox), pasando por el colchón de lodos formando. Es de fácil adaptación, control y mantenimiento aunque necesita espacio, costo de construcción relativamente alto. Necesita estabilización.</p>

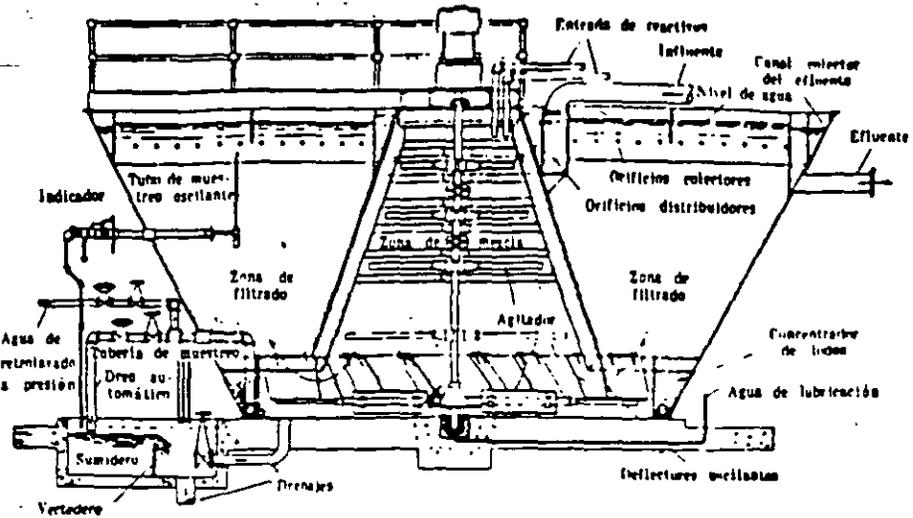
<p>- De colchón de Lodos o de Contacto de Lodos.</p>	<p>Cristalización de una solución saturada a través de un colchón de lodos. Aprovechamiento máximo de los prod's químicos. La operación puede tener un grado alto de automatización.</p> <p>El nivel de lodos, se mantiene mediante purgas.</p> <p>El efluente no se sobresatura de Ca CO<sub>3</sub>, se logra 10 ppm de turbidez. (filtración a través del colchón de lodos).</p>	<p>El agua cruda se mezcla perfectamente con los prod's químicos (cal, carbonato y coag.), reacciona y <u>pasa a través del colchón de lodos</u>. Requiere de 1 hora aprox. Unidades más compactas.</p> <p>Diseño vertical y horizontal.</p> <p>Los precipitadores de cal-coagulante en frío de colchón o contacto de lodos es el más usado.</p>
<p>- Catalítico (Spiractor)</p>	<p>Tanque cónico vertical lleno hasta 2/3 de un material granulado (calcita o arena) A presión o abiertos. Entrada del agua y reactivos en forma tangencial cerca del fondo del cono.</p>	<p>El material granulado debe ser repuesto periódicamente.</p> <p>Tiempo de retención: 8 a 12 min.</p> <p>Purgas periódicas del lodo depositado sobre los granos catalizadores que aumentan de tamaño. Poco uso.</p>



Ablandador tipico con cal del tipo de colchón de lodo con velocidad alta para la recirculación del lodo (Cortesía de Inilio Degremoni Incorporated )



Ablandador con cal de lecho granular que produce un lodo concentrado en forma de pelotas (Cortesía de The Permutit Company )



Vista transversal de un precipitador vertical para el proceso de cal sodada en frío.

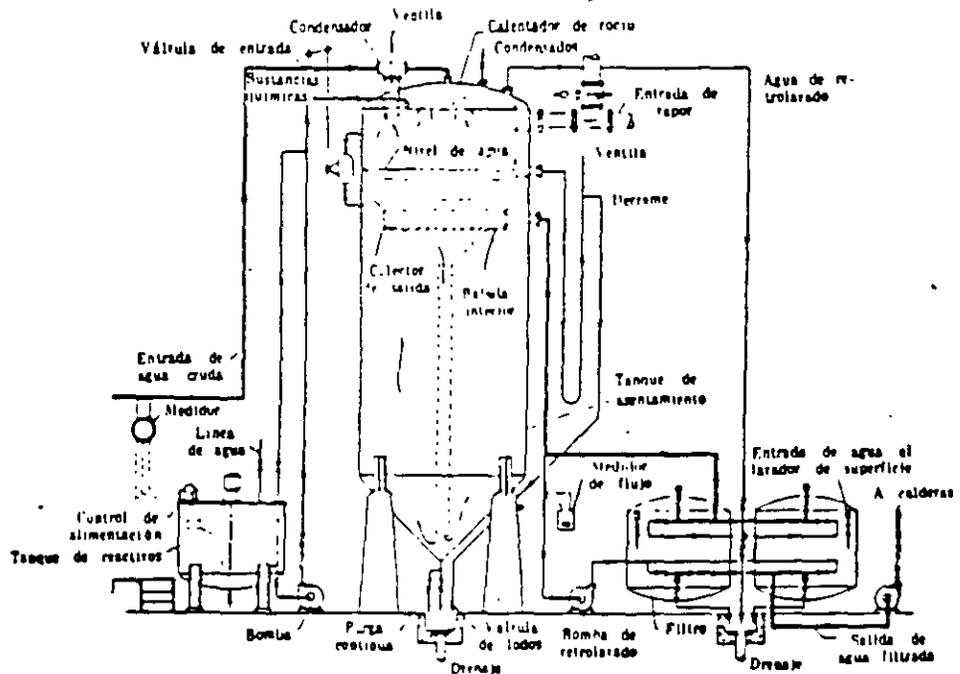


Diagrama de flujo de una planta de ablandamiento de agua por el proceso cal sodada en caliente y eliminación de sílice. De izquierda a derecha: (1) dosificador, (2) bomba y línea de recirculación, (3) reactor de lecho suspendido, (4) bomba de retrolavado de filtros, (5) filtros de presión de antracita, (6) bomba de calderas.

- Todos éstos equipos producen lodos de la reacción química, que actualmente debe considerarse su disposición, para evitar contaminación.
- Debido a la necesidad de limpieza del tanque por azolve, la unidad debe ponerse fuera de servicio periódicamente.
- Debe llevarse un especial control químico para obtener la calidad del agua deseada, así como de la operación.
- El mantenimiento preventivo debe incluir revisión de todas las partes móviles, lubricación, revisión del equipo de control, equipo eléctrico, etc.

## CAL - CARBONATO EN CALIENTE

En éste proceso, las reacciones se efectúan en caliente (105°C aprox.), por lo que suceden a una velocidad considerablemente mayor. Se obtienen precipitados, más grandes, más pesados y el asentamiento es más rápido. No utiliza Coagulante, ni cal para eliminar el CO<sub>2</sub>.

El efluente se usa generalmente para calderas o evaporadores. Si se desea pulir más, puede hacerse pasar por un suavizador de Zeolita en caliente.

Las reacciones químicas son las mismas que las que se producen en el tratamiento en frío; con la ventaja de que se reduce el contenido de la sílice del agua cruda, con la adición de óxido de Magnesio, que se convierte a hidróxido de Magnesio, el cual retiene la sílice. El Mg (OH)<sub>2</sub> del agua cruda actúa igual y, además funciona como coagulante.

Los equipos son tanques cerrados de forma cilíndrica, verticales y de fondo cónico operan a una presión de 0.35 a 0.7 Kg/cm<sup>2</sup>.

— La alimentación del agua cruda, de los reactivos y del vapor es por separado por la parte superior del tanque. Ahí se atomiza el agua, de esta manera se desgasifica ( $O_2$  y  $CO_2$ ). El agua ya mezclada con los prod's químicos, va al fondo por un tubo central en donde se forma el colchón de lodos, logrando un mayor y mejor contacto para producir un agua clara, para alimentar a filtros de antracita, suavizadores, evaporadores o a calderas (30 a 40 Kg/cm<sup>2</sup>).

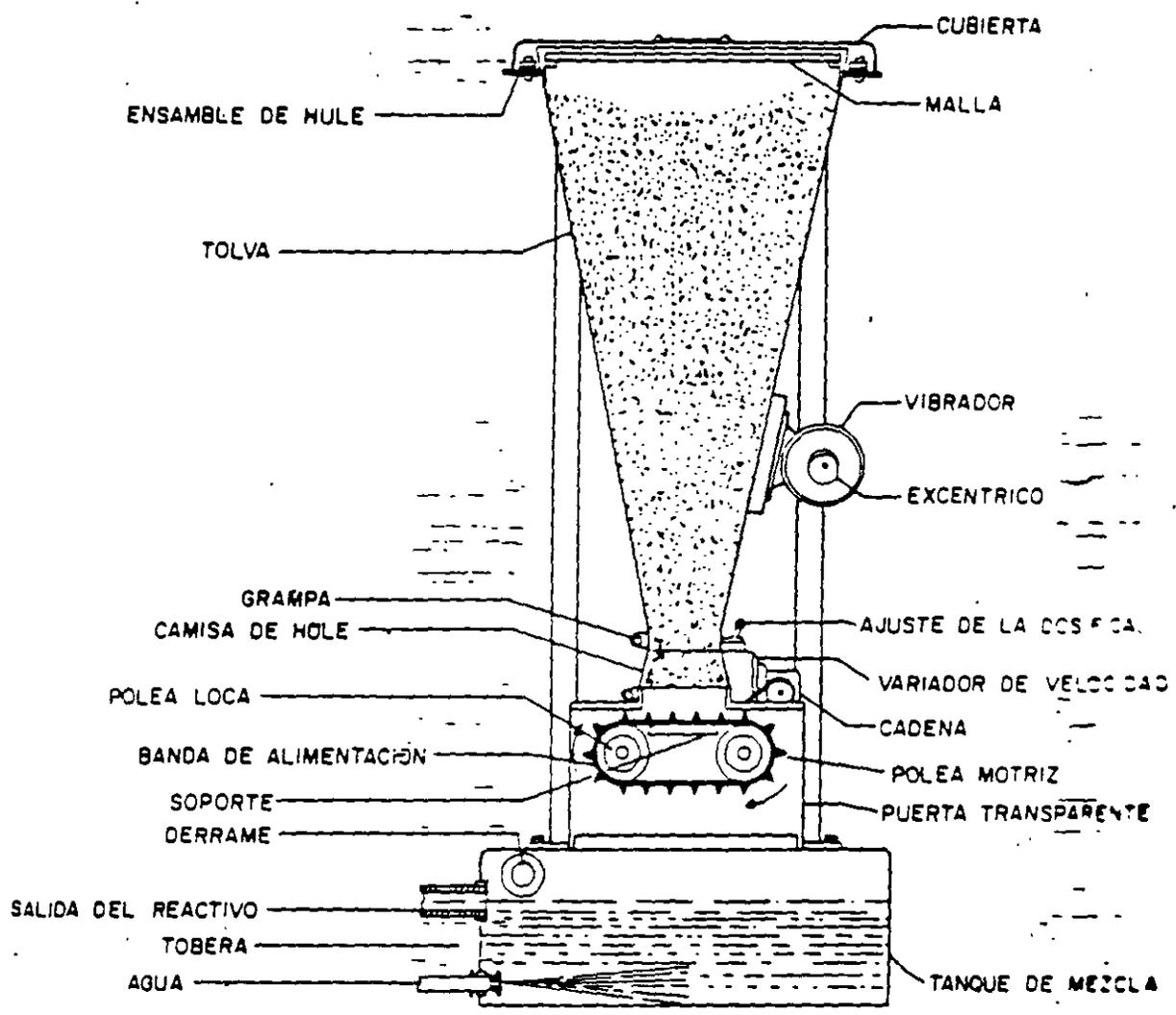
Los lodos se eliminan, de acuerdo a la formación de lodos, por la parte inferior del cono.

Este tratamiento requiere de una estricta supervisión y de un control químico cuidadoso.

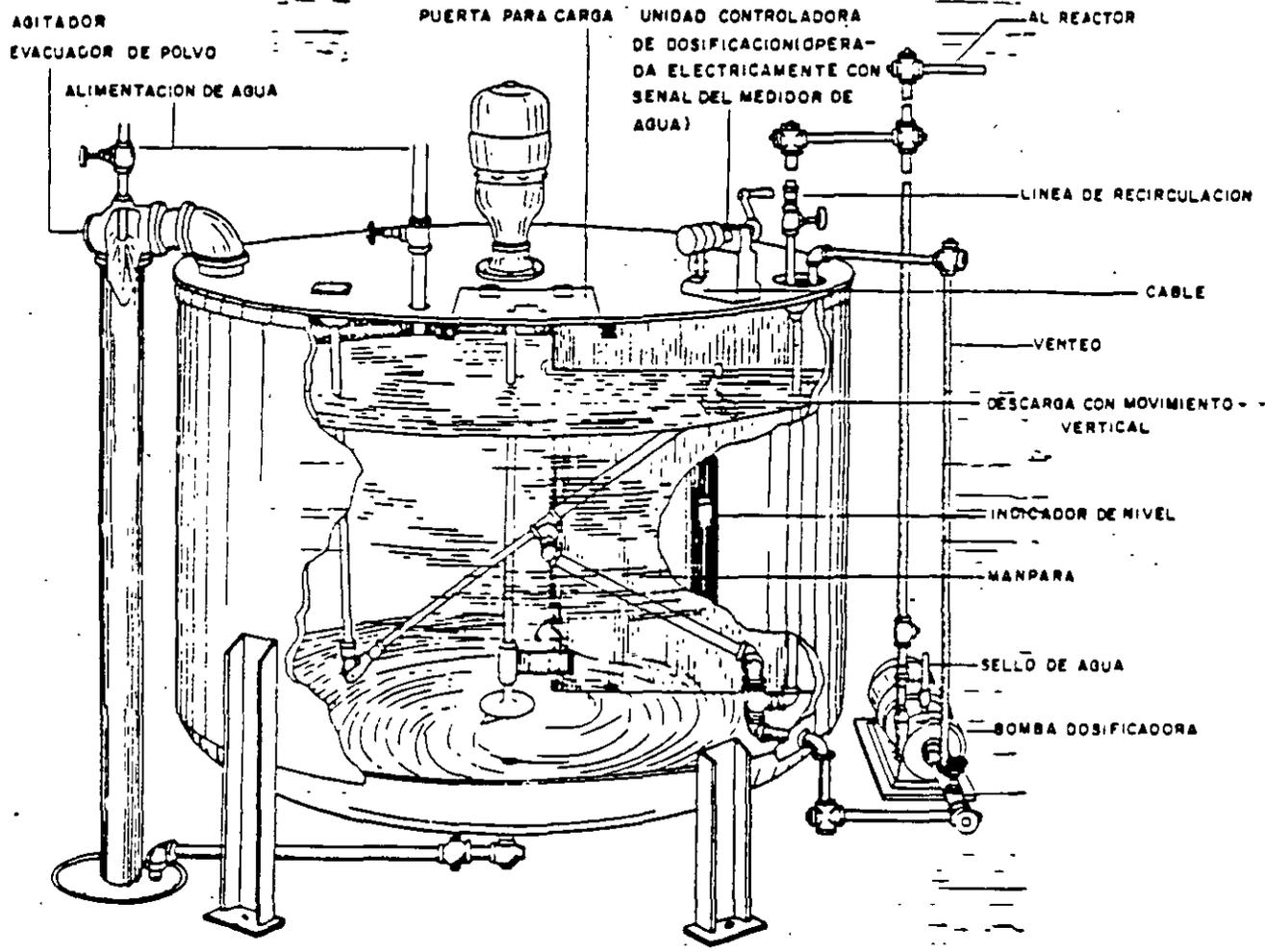
- Debido a la temperatura, las tuberías de alimentación de Cal, se incrustan con frecuencia.

El efluente suele arrastrar  $CaCO_3$  y  $Mg(OH)_2$  hasta los filtros por lo que deben tomarse las medidas pertinentes.

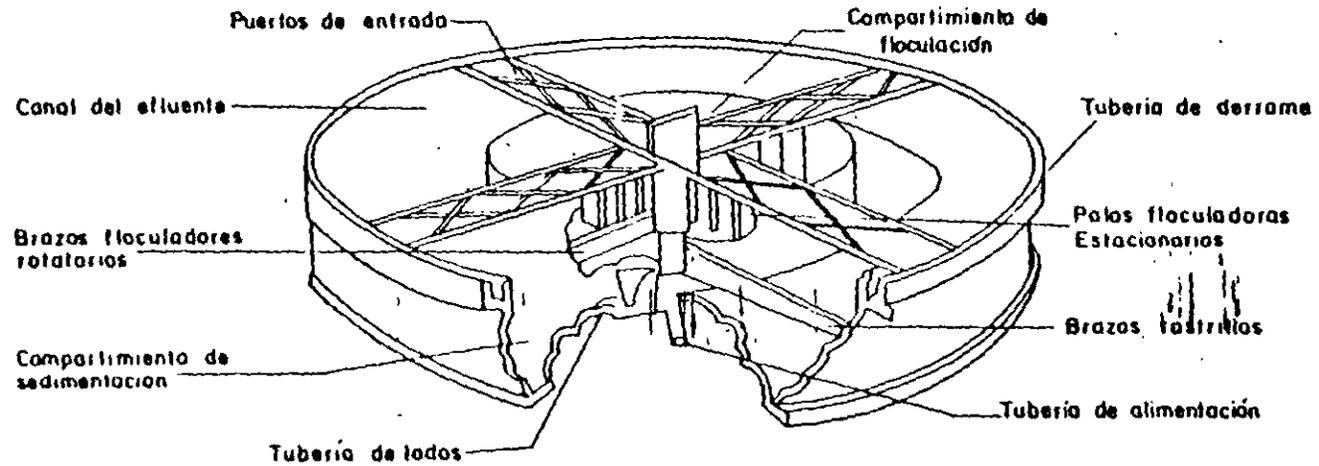
- La temperatura de reacción debe controlarse, para evitar disminución del tratamiento y por lo tanto un efluente de mala calidad.
- Debe incluirse programas de inspecciones periódicas de todos los mecanismos de dosificación, medición, control, etc.



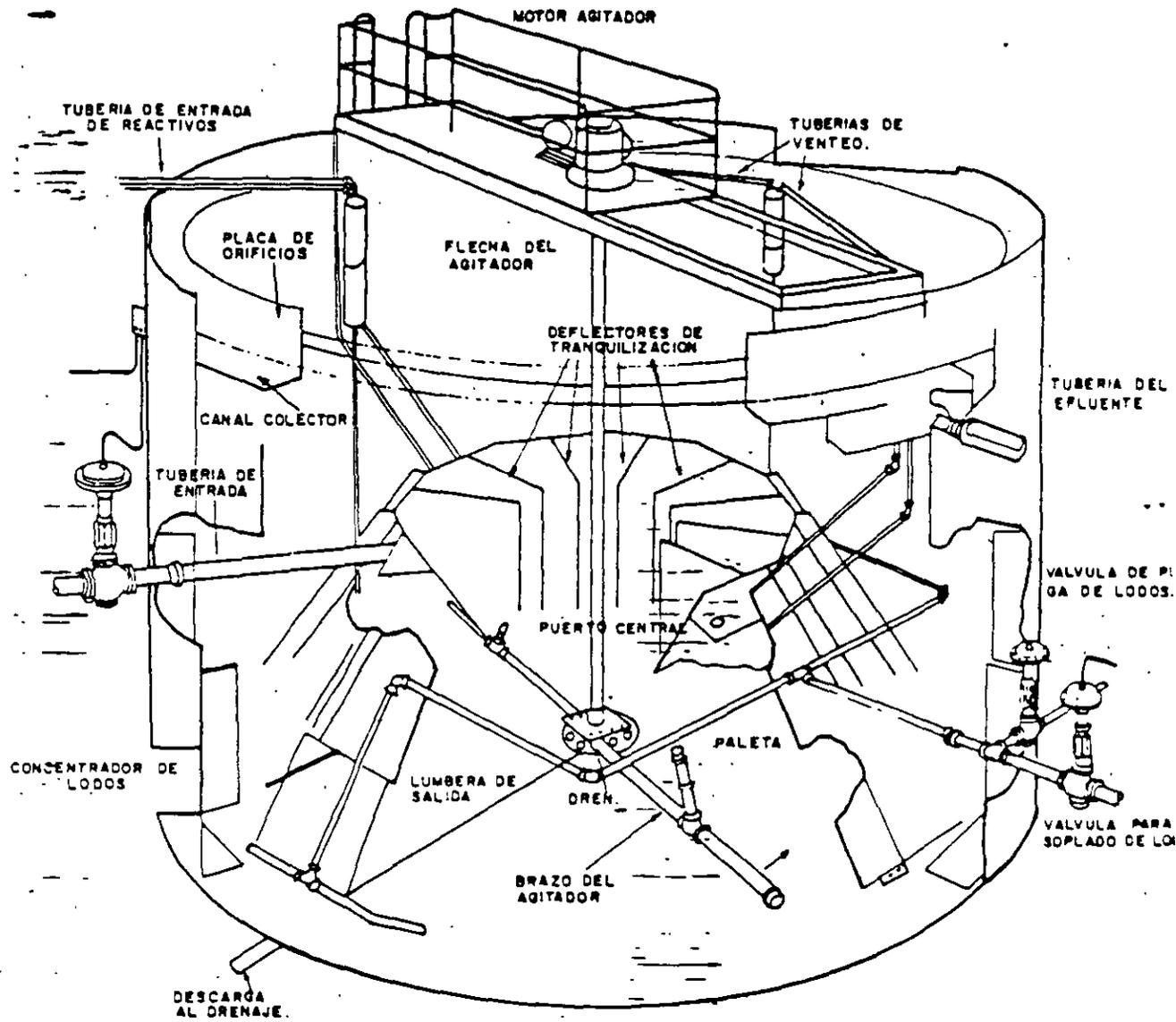
DOSIFICADOR EN SECO.



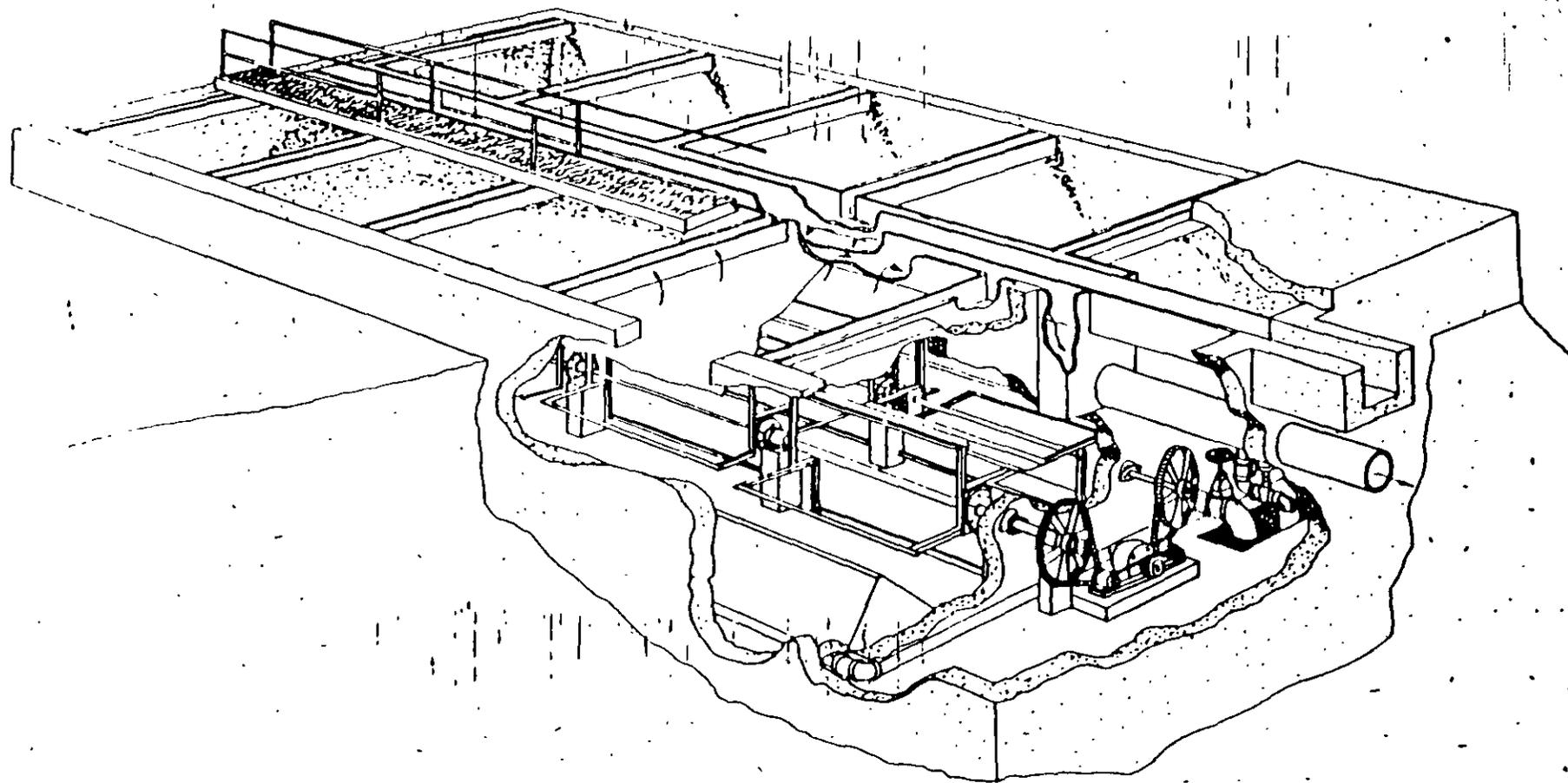
DOSIFICADOR EN HUMEDO



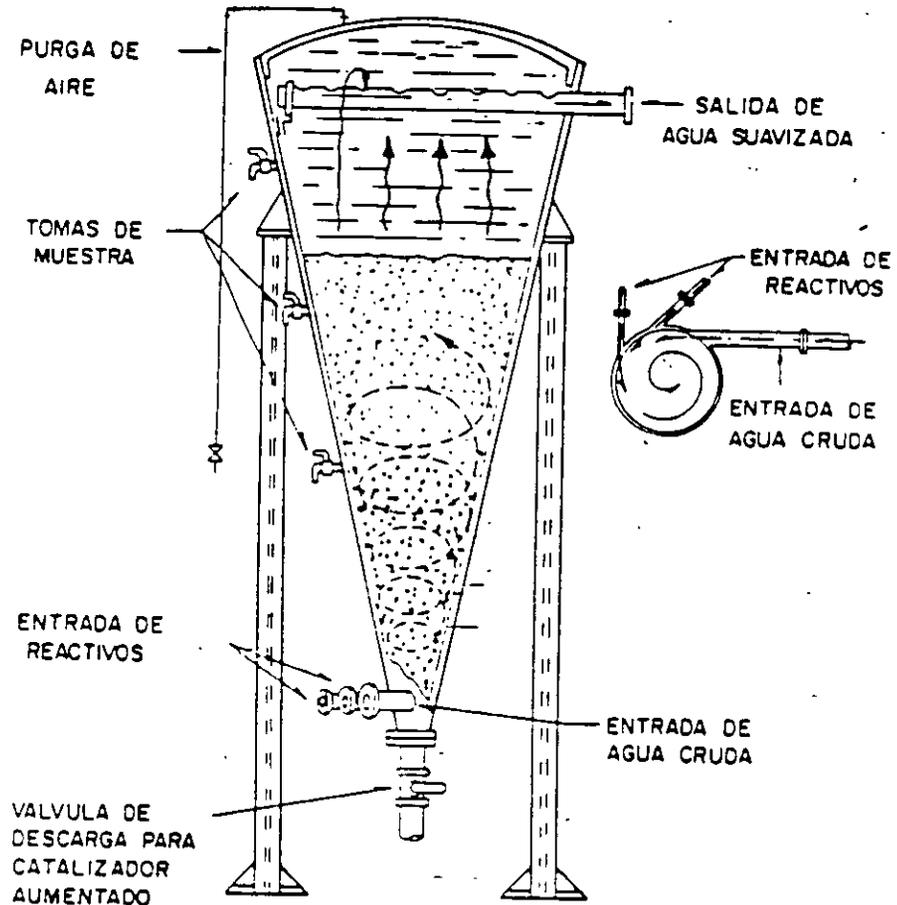
PRECIPITADOR DE TIPO CONVENCIONAL



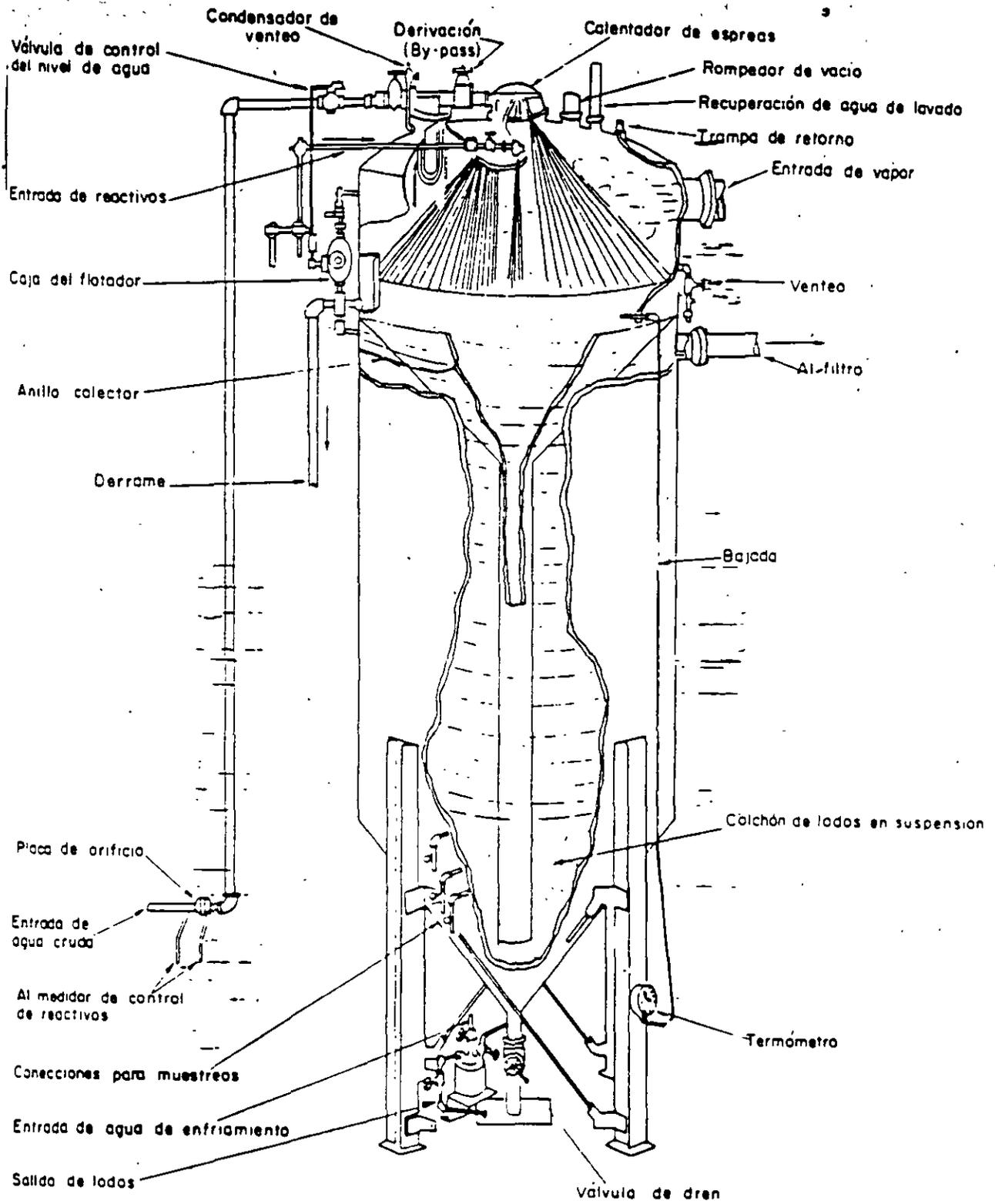
CORTE PARCIAL DE UN PRECIPITADOR VERTICAL METALICO MOSTRANDO SU CONSTRUCCION INTERNA.



CORTE DE UNA SECCION DE UN PRECIPITADOR HORIZONTAL  
DE CONCRETO



CORTE DE UN SPIRADOR MOSTRANDO EL FLUJO.



ABLANDADOR DE AGUA EN CALIENTE DEL TIPO DE COLCHÓN DE LODOS

## INTERCAMBIO IONICO

Los intercambiadores de iones son sustancias granulares insolubles, que tienen, en su estructura molecular, radicales ácidos o básicos, capaces de permutar, sin modificación aparente de su aspecto físico y sin alteración alguna o solubilización, los iones positivos o negativos, fijados previamente a estos radicales, por otros iones del mismo signo, que se encuentran en solución en el líquido puesto en contacto con ellos. Mediante esta permutación, llamada INTERCAMBIO IONICO, puede modificarse la Composición iónica del líquido a tratar, sin alterar el número total de iones existentes en este líquido, al iniciarse el tratamiento

Otra manera de expresar el intercambio iónico, es la remoción de los iones indeseables de un agua cruda, transfiriéndolos a un material sólido llamado intercambiador de iones, el cual los acepta cediendo un número equivalente de iones de una especie deseable que se encuentra almacenada en el esqueleto del intercambiador de iones.

Este intercambiador de iones, tiene una capacidad limitada de iones almacenados en su esqueleto. A esta se le llama "Capacidad de intercambio"; en virtud de esto, llegará finalmente a saturarse con iones indeseables. Entonces se lava con una solución fuertemente regeneradora que contiene la especie deseable de iones, los que sustituyen a los iones indeseables acumulados, quedando el material de intercambio en condiciones similares a la iniciales (útil).

• Esta operación es un proceso químico cíclico y el ciclo completo incluye normalmente:

- Retrolavado
- Regeneración
- Enjuagado
- Servicio

Los intercambiadores iónicos, son estructuras en forma de esqueleto que poseen muchos sitios para el intercambio.

Es un ion de plástico insoluble, enorme y cargado electricamente para retener iones de carga opuesta. Es porosa, permeable por lo que participa en el proceso.

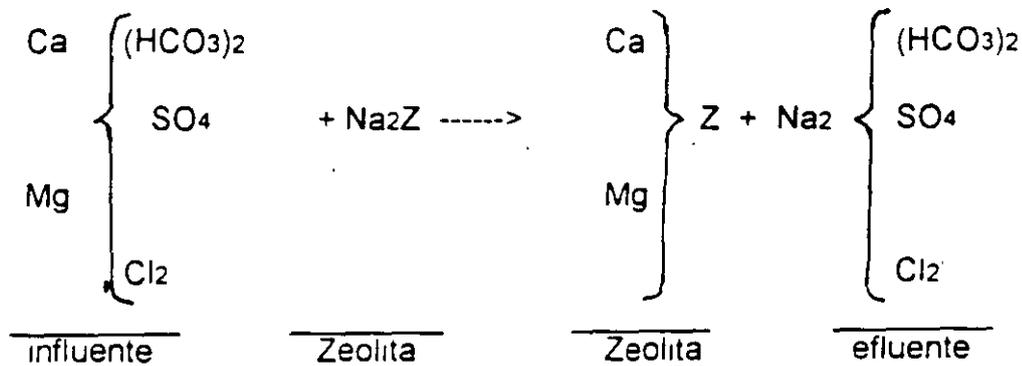
La mayor parte de los intercambiadores iónicos comerciales actuales son de materiales plásticos sintéticos, por Ej: Copolímeros de estireno y divinil benceno.

Este proceso de intercambio iónico, puede ser:

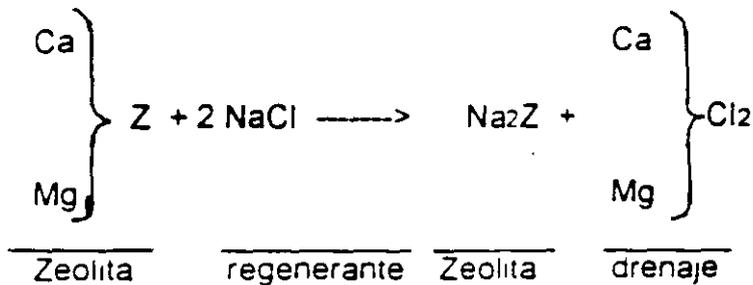
- Suavización con Zeolitas
- Desalcalinización
- Desmineralización

## SUAVIZACION CON ZEOLITA

Llamado también ablandamiento, es el proceso de intercambio iónico más antiguo y más sencillo. Elimina la dureza del agua principalmente. Al saturarse se regenera con una sal muera de Cloruro de Sodio. Las reacciones químicas que se suscitan en el equipo suavizador, son las siguientes:



Para restituir la capacidad de intercambio de la resina se regenera:



El intercambio que sucede durante la operación, produce un efluente con sales de sodio, en vez de las sales de Ca y Mg del influente. La dureza en el efluente puede llegar hasta 2 a 4 ppm, dependiendo de la dureza del influente. (en ocasiones llega a cero)

El efluente con sales de sodio, de un suavizador con Zeolita, puede abastecer calderas de baja presión.

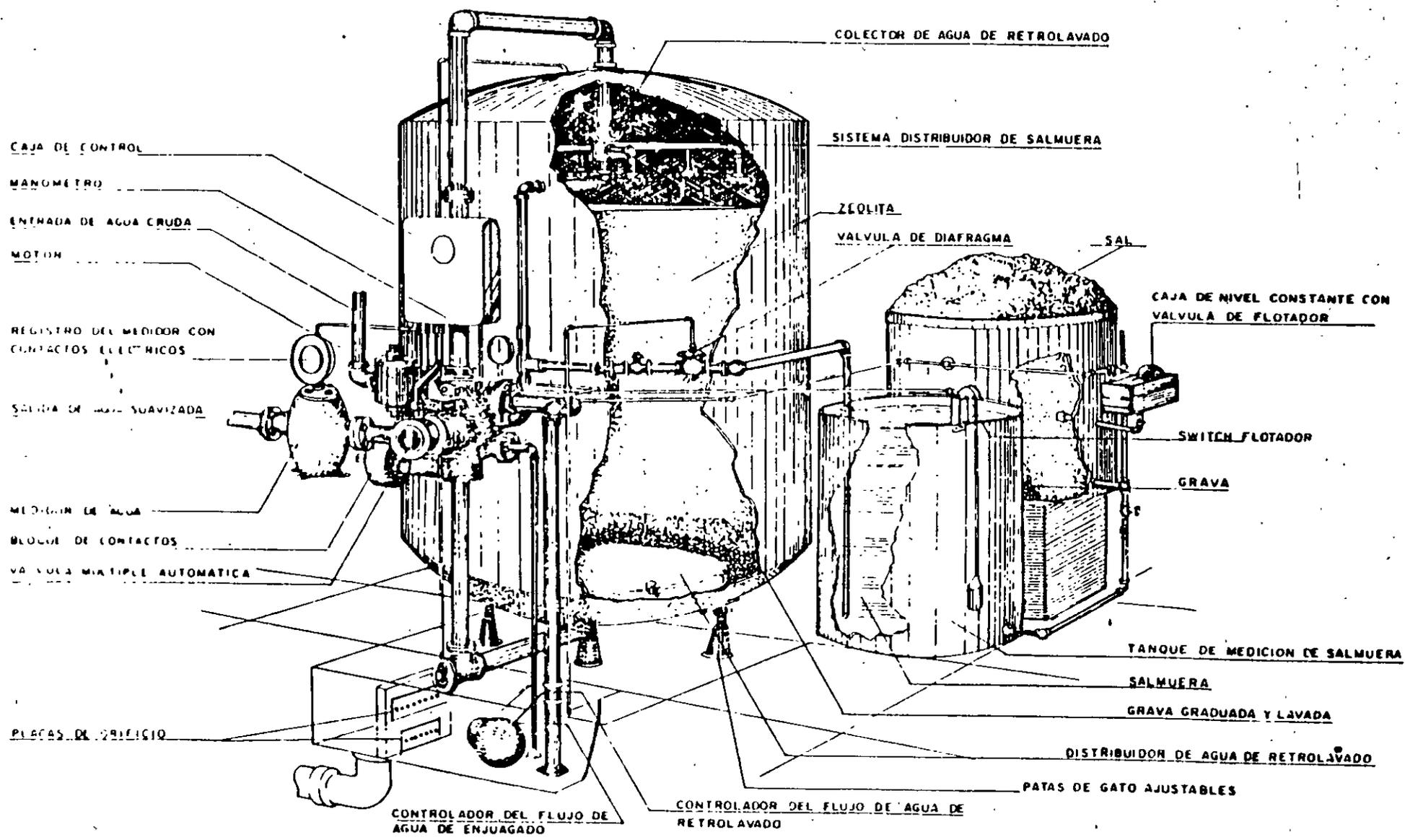
La cantidad de sal que necesita un suavizador para su regeneración está determinada por los límites aceptables para la calidad del efluente y la capacidad que la planta desea lograr para programar adecuadamente la regeneración del sistema basado en la mano de obra disponible.

Por su diseño y forma de operación, un suavizador actúa también como filtro, esto obliga a efectuar un retrolavado cuidadoso.

En el caso de que el efluente contenga turbidez y lodo, la Zeolita se irá recubriendo y su capacidad disminuirá gradualmente.

Si el influente proviene de un tratamiento cal en frío, la Zeolita puede ser incrustada por Carbonato de Calcio o hidróxido de Magnesio, etc.

En este caso, será necesario "lavar" la resina con soluciones diluidas de ácido clorhídrico y después regenerar (2 veces) con la sal muera en forma normal.  
(Algunas Zeolitas no resisten este lavado)



**EQUIPO SUAVIZADOR DE AGUA**

72

## DESALCALINIZACION

La alcalinidad en evaporadores o en calderas, causan problemas, ya que al aumentar la concentración, también aumenta la alcalinidad. Cuando el agua hierve y la alcalinidad es alta, existe la tendencia de formar espuma con el consiguiente arrastre que provoca contaminación del vapor.

Para evitar esto, se deberán efectuar purgas frecuentes para mantener baja la alcalinidad. Estas purgas ocasionan pérdida de calor. (\$)

Cuando el agua cruda contiene alta alcalinidad, es recomendable el uso de la desalcalinización. En este proceso se reduce la dureza y también la alcalinidad.

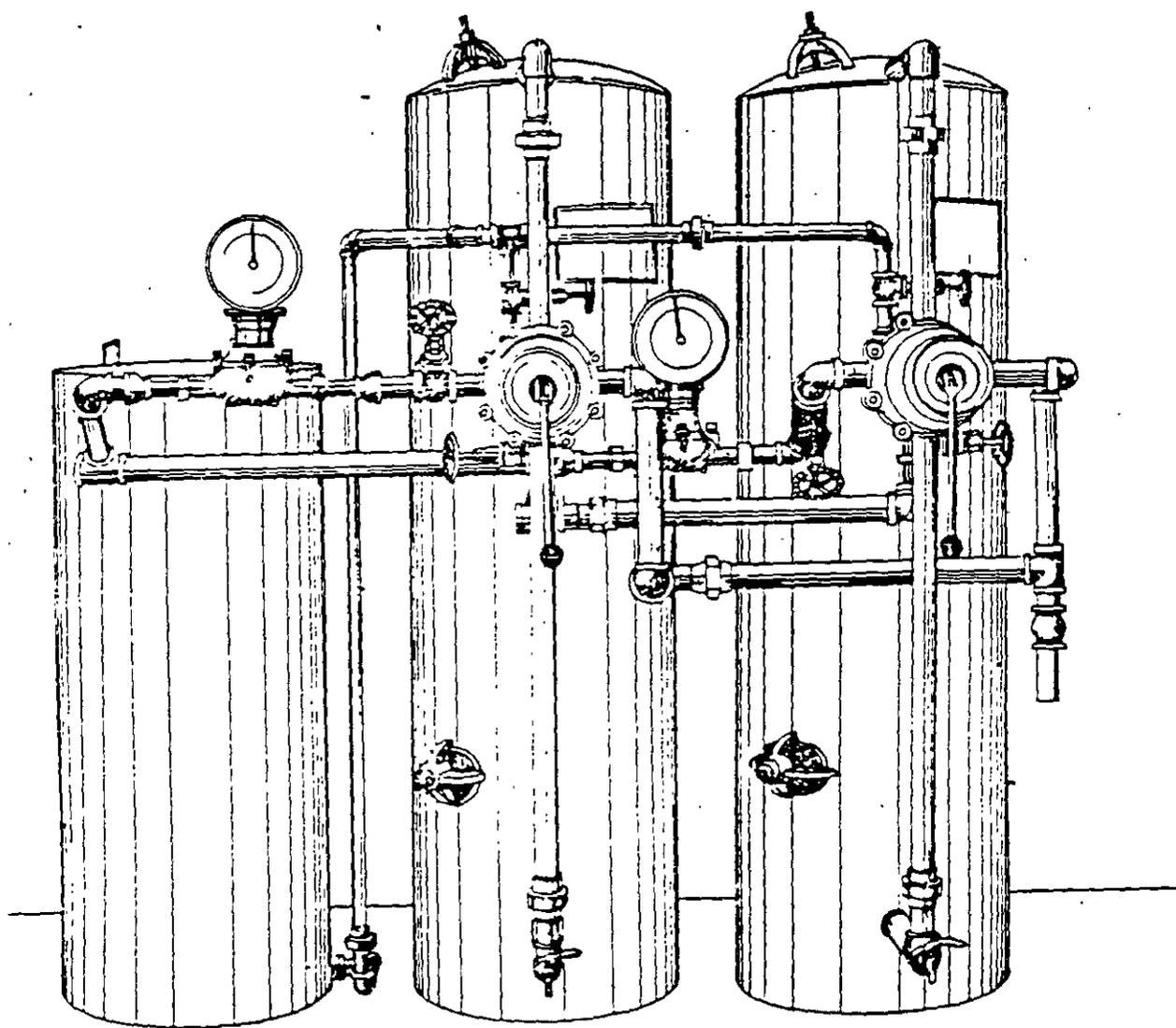
Basicamente, consta de una unidad catiónica regenerada en ciclo sodio y una unidad aniónica regenerada, también con sal, en ciclo cloruro. En estas unidades, el agua al pasar por la unidad catiónica, cambia el Calcio y el Magnesio por Sodio; después pasa a la unidad aniónica donde intercambia los aniones por cloruros, resultando un efluente con sales de cloruro de Sodio.

Algunos desalcalinizadores tienen ambas resinas en una sola unidad, totalmente mezcladas.

Otra alternativa es la de dos unidades catiónicas: una en ciclo sodio y la otra en ciclo hidrógeno. Sus efluentes se mezclan proporcionalmente para obtener un efluente final neutralizado, y este a un desgasificador para eliminar el CO<sub>2</sub>.

La alcalinidad puede neutralizarse también, adicionando ácido sulfúrico al efluente de un suavizador de Zeolita.

Otro arreglo es el de una unidad catiónica debilmente ácida regenerada con ácido, desgasificador y Zeolita de Sodio.



DESALCALINIZADOR

## DESMINERALIZACION

Dado que las sales que se encuentran disueltas en el agua se encuentran disociadas en iones, con carga eléctrica positiva llamados "cationes y con carga eléctrica negativa llamados aniones", las soluciones son eléctricamente neutras, debido a la igualdad de ambas cargas.

El proceso de Desmineralización o desionización consiste en la eliminación de ambos iones contenidos en el agua. La pureza que se llega a obtener a través de este proceso en el efluente es de aproximadamente del orden de 0.10 a 0.20 ppm de sales totales disueltas y de menos de 10 ppb de Sílice.

Esta eliminación de iones la efectúa en dos pasos:

1º.- Intercambio iónico para el intercambio de cationes por iones

Hidrógeno ( $H^+$ ).

2º.- Intercambio iónico para el intercambio de aniones por iones

oxhidrilo ( $OH^-$ ).

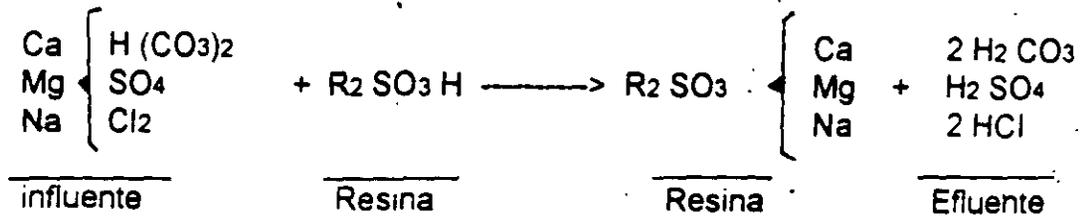
Para lograr ésto la resina se encuentra en ciclo hidrógeno y ciclo oxhidrilo, respectivamente. Por lo tanto sus regenerantes deberán contener  $H^+$  y  $OH^-$ .

Para la regeneración de la resina catiónica generalmente se utiliza ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) o ácido clorhídrico ( $HCl$ ) y para la regeneración de la resina aniónica se utiliza sosa cáustica ( $NaOH$ ).

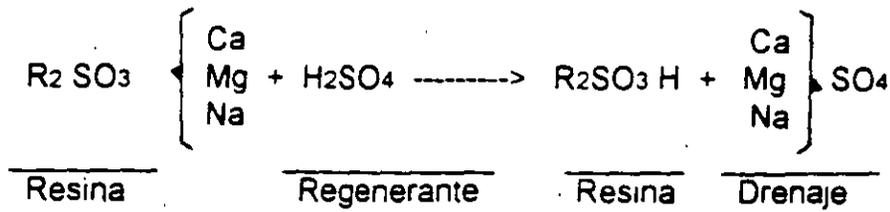
Las reacciones químicas de la desmineralización son:

### REACCIONES QUIMICAS

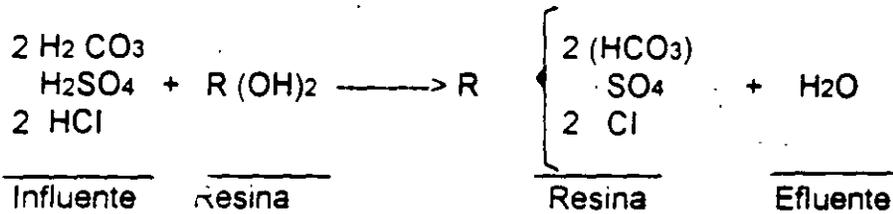
Unidad Catiónica :



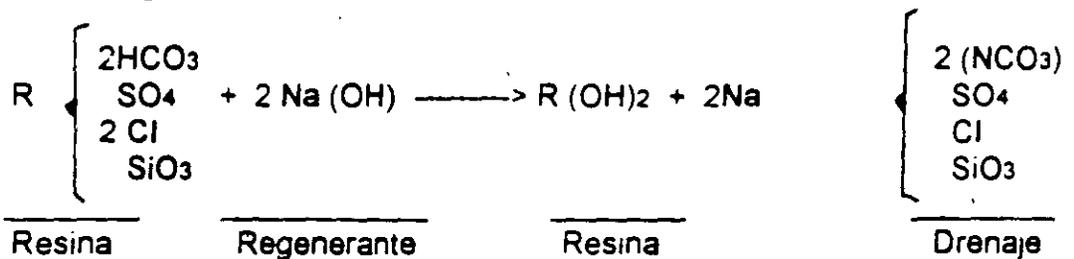
Regeneración:



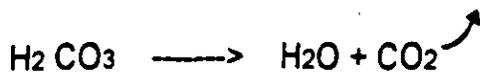
Unidad Aniónica:



Regeneración:



Generalmente el ácido Carbónico ( $H_2CO_3$ ) se elimina en un descarbonatador:



así se aumenta

la capacidad de la Unidad Aniónica.

La resina anterior, con grupo funcional sulfónico ( $-SO_3H$ ) se denomina Resina Catiónica fuertemente ácida y la aniónica Resina Aniónica fuertemente básica.

Cuando la resina Catiónica tiene un grupo funcional carboxílico ( $-COOH$ ) se denomina Resina Catiónica debilmente ácida. Elimina unicamente los cationes que se encuentran como bicarbonatos.

Las resinas Aniónicas debilmente básicas intercambian unicamente los aniones de los ácidos altamente disociados o ácidos fuertes (sulfúrico, clorhídrico y nítrico). No remueven los ácidos débiles, como el carbónico, silícico, etc. Tienen mejor capacidad de intercambio que las fuertemente básicas y tienen además la propiedad de atrapar la materia orgánica, eliminándola durante la regeneración. La resina fuertemente básica absorbe la materia orgánica que le causa ensuciamiento y pérdida de capacidad por acumulación.

Por otra parte, la Resina debilmente Básica tiene mejor capacidad de intercambio que las fuertemente básicas.

Por lo anterior, el uso de una resina debilmente básica ahorra regenerante y protege a la resina fuertemente básica.

La selección de las resinas, así como del arreglo específico para un proceso depende de:

- Calidad del agua cruda o influente.
- Cantidad de agua necesaria.
- Calidad del agua tratada o efluente.

La Resina de intercambio iónico, físicamente esta formado por granos esféricos o irregulares de 0.4 a 0.6 mm de diámetro aproximadamente y, como muestra la figura de su estructura esquelética, posee muchos puntos de intercambio, que atrae los iones de carga eléctrica contraria a la carga que poseen los puntos de la estructura. De esta manera, los iones de Calcio que se aproximen

a la estructura de intercambio que posee iones de Hidrógeno o Sodio, en atrapados y liberados estos últimos. Los anterior obedece a un fenómeno de SELECTIVIDAD de iones. El orden selectividad de iones en agua < 1000 mg/lit de Sólidos totales disueltos.

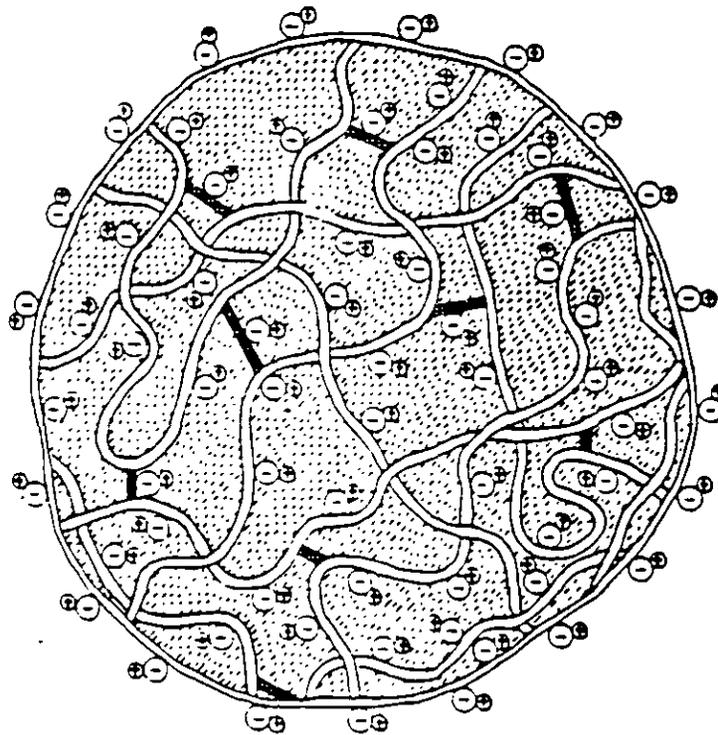
Para Cationes monovalentes:  $K > NH_4 > Na > H > Li^+$

Para Cationes divalentes:  $Pb > Ba > Cd > Zn > Cu > Fe > Mn > Ca > Mg^{++}$

Para Cationes trivalentes:  $Fe > Al^{+++}$

Para Aniones monovalentes:  $NO_3 > NO_2 > Br > Cl > CN > HCO_3 > HSiO_3 > OH > F^-$

Para Aniones divalentes:  $CrO_4 > SO_4 > SO_3 > HPO_4^{=}$



- ⊖ Sitio fijo de cambio cargado negativamente, por ejem.  $SO_3^-$
- ⊕ Cation móvil de intercambio cargado positivamente, ejem.  $Na^+$
- ≡ Cadena poliestirénica
- ▬ Eslabón de cruce de divinilbenceno
- ▨ Agua de hidratación

ESQUEMA DE INTERCAMBIO DEL CATION FUERTE HIDRATADO

En general, la selectividad esta afectada por:

- La valencia iónica  $3 > 2 > 1$
- El número atómico  $Ba > Sr > Ca > Mg$
- Radio iónico hidratado. (a mayor radio menor selectividad)

En el caso de una resina en ciclo sodio, el calcio desplaza al sodio, por tener Concentraciones normales. Pero para la regeneración, el Sodio desplaza al Calcio, debido a su alta concentración en la solución regenerante.

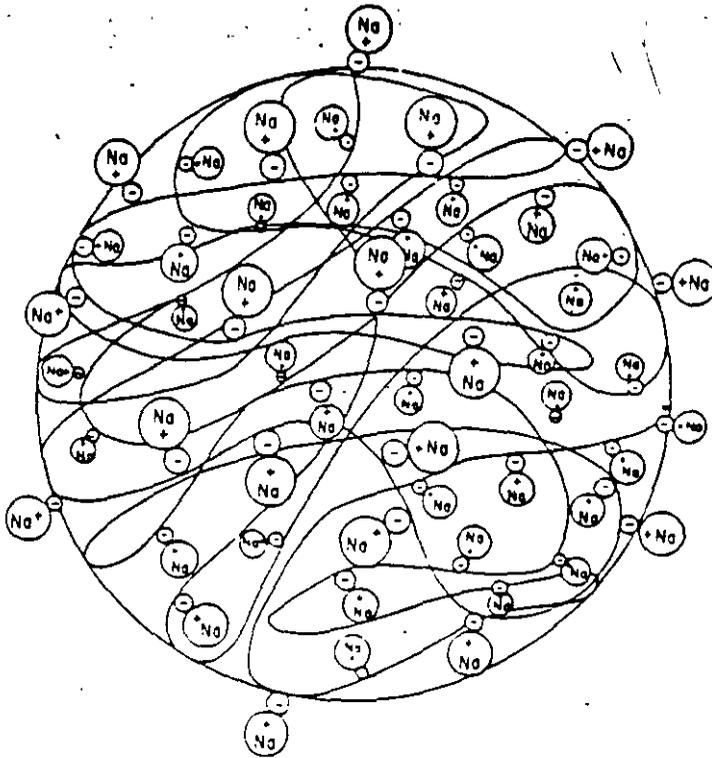
La mayor parte de las unidades de intercambio iónico son simples recipientes que contienen un lecho de resina de intercambio iónico que opera por flujo descendente. Como se mencionó anteriormente, sobre una base ciclica:

- Operación: Se trabaja la unidad hasta un nivel de fuga pre-determinado, donde se considera que esta agotada.
- Regeneración: Ahora se regenera la unidad. Este paso se inicia con una limpieza de la resina, con un flujo ascendente (retrolavado) y luego por elución química, con flujo descendente se le da nuevamente su capacidad inicial de intercambio a la Resina.

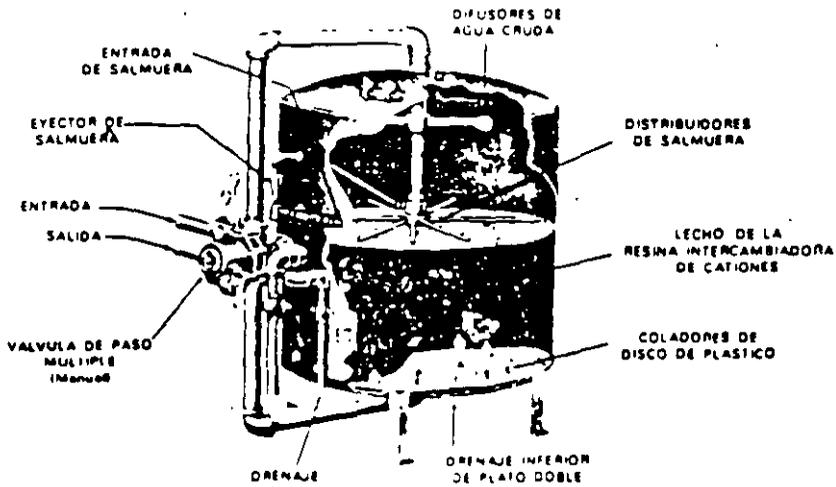
- **Enjuague:** En esta etapa el lecho de resina es enjuagado por flujo descendente, desplazando y enjuagando la resina y el tanque.
- **Operación:** Al término del enjuagado, la unidad esta lista para entrar en servicio.

Recordando que el diámetro efectivo del material de intercambio iónico es de 20-50 mallas (0.5 mm), hace que el lecho de resina funcione como un filtro muy efectivo, con las ventajas y desventajas correspondientes.

En ocasiones, la calidad del agua obtenida por unidad una catiónica, desgasificador y unidad aniónica o algún arreglo diferente, no es cumplida, se recurre a una segunda etapa desmineralizadora que pula el agua producida en la primera etapa. Otra posibilidad es el empleo de un lecho mixto, ya sea para servicio primario o para pulido. En este tipo de unidad las resinas catiónicas y aniónicas, se mezclan íntimamente, después de la regeneración, con objeto de ofrecer cientos de etapas para la desmineralización.

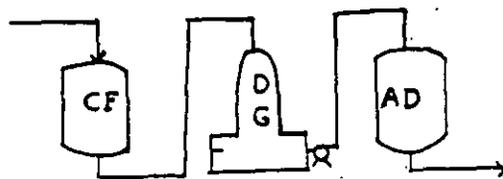


Modelo de un intercambiador de cationes, mostrando los sitios de intercambio negativamente cargados sobre el esqueleto que sostiene los iones de sodio como uvas en un racimo.



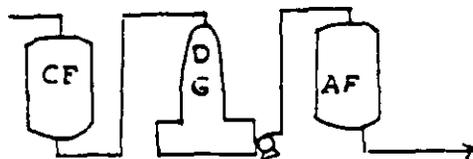
Corte de una unidad intercambiadora de iones, mostrando los detalles del diseño de las partes internas dispuestas para la regeneración a corriente paralela. (Cortesía de The Permutit Company)

## DIFERENTES ARREGLOS DE SISTEMAS DE INTERCAMBIO IONICO

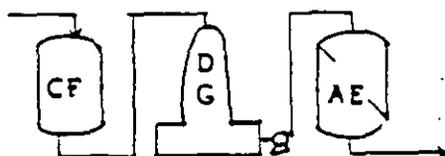


Características del efluente

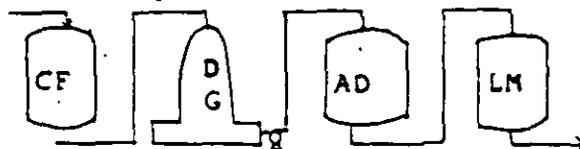
Produce un efluente que puede contener de 2-10 ppm de STD y no elimina la sílice.



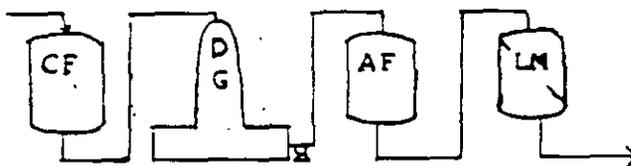
Agua de 2 a 3 ppm de STD y sílice de 0.02 a 0.10 ppm.



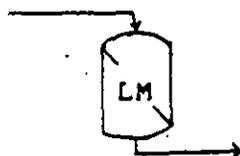
Eficiente en el consumo de regenerante aniónico. Influyente con altos  $SO_4$  y Cl. Elimina la sílice.



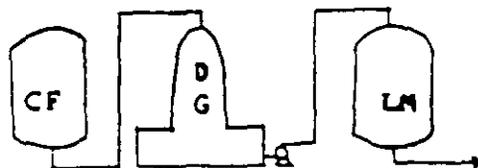
Efluente con 0.2 a 1.0 ppm de STD  
Bajo consumo de Na(OH)



Eficiente eliminación de sílice hasta valores de 0.1 a 0.05 ppm. (Muy buena calidad)



Su influente debe provenir de evaporadores, osmosis inversa, electrodiálisis. Efluente de muy buena calidad.



Puede tratar agua con alta alcalinidad y bajo contenido de sílice. Efluente de buena calidad.

En los criterios finales para la selección definitiva de un sistema de desmineralización, deberán considerarse los siguientes factores:

- Requerimiento de remoción de Sílice
- Calidad o pureza del efluente en sólidos totales disueltos
- Calidad o composición del agua disponible
- Capacidad de producción
- Costo de la inversión, operación, etc

Además del arreglo seleccionado, deberá incluirse, una fosa de neutralización para los efluentes de la regeneración y la fosa de recuperación de ácido (opcional)

Cuando las necesidades de agua demineralizada son elevadas, es aconsejable disponer de dos o tres sistemas o trenes de desmineralización.

Uno de los principales problemas de las resinas es que suelen contaminarse con algunas sustancias, con la consiguiente pérdida de la capacidad de intercambio.

Algunos de los contaminantes más frecuentes son:

- Materia orgánica (Se recomiendan lavados de desinfección con solución de sosa cáustica al 5% y sulfito de sodio al 1%)
- Fierro (Lavados con soluciones diluidas de HCl)
- Sulfato de Calcio (Idem a Fierro)
- Cloro libre (Pretratamiento para evitarlo. Si llega a la resina la deteriora)
- Oxígeno, Altas temperaturas, etc.

Otro tipo de fallas son las mecánicas en distribuidores y toberas.

También las producidas por corrosión, dado las características de los regenerantes, en particular el ácido sulfúrico.

Debido a esto se deberá contar en la planta, con las refacciones necesarias y con la resina suficiente para reponer en caso de pérdida.

### Algunas Consideraciones sobre el tratamiento de los desechos:

Un factor importante en la selección de cualquier proceso de intercambio iónico es la disposición del desecho producido por la regeneración de las unidades. En algunas ocasiones, es reutilizable el desecho catiónico o aniónico. Generalmente, se almacenan ambos en una fosa de construcción especial, para recibir ambos desechos, alternativamente.

La capacidad de la fosa debe ser capaz de almacenar el volumen de hasta dos regeneraciones aproximadamente. La solución podrá disponerse al tener un pH entre 6 y 9.

## OSMOSIS INVERSA

La osmosis es un proceso en el cual un solvente fluye a través de una membrana separando una solución mas fuerte de una solución más débil. El solvente fluye en la dirección que reducirá la concentración de la solución mas fuerte.

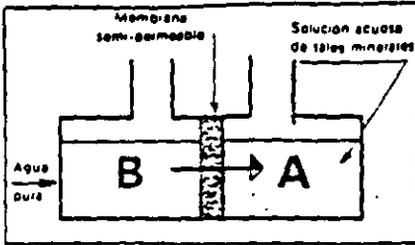
La OSMOSIS INVERSA es un proceso de membrana que actua como un filtro molecular para eliminar del agua:

- Minerales disueltos.
- Compuestos orgánicos disueltos.
- Materia Coloidal
- Bacterias

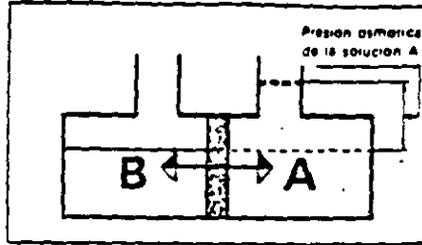
En este proceso de O.I., el agua es introducida a presión a través de una membrana separando en dos partes:

- El filtrado, permeado o producto (diluido)
- El rechazo o no permeado (concentrado)

# ÓSMOSIS INVERSA



Ósmosis directa

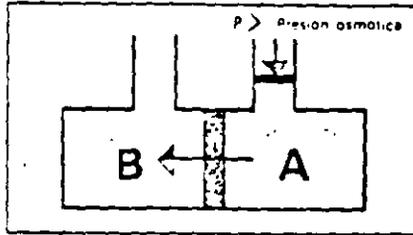


Equilibrio osmótico.

La ósmosis inversa tiene su origen en la comprobación de la reversibilidad del fenómeno de ósmosis directa o natural.

La figura representa una solución acuosa de sales minerales (compartimiento A) y agua pura (compartimiento B). La ósmosis natural o directa se traduce por una transferencia de agua pura del compartimiento B hacia el compartimiento A. El nivel asciende en el compartimiento A hasta que la presión engendrada por la columna de líquido anula el flujo de agua pura; se alcanza el equilibrio osmótico y, como se ha indicado

al valor de esta presión hidrostática se le denomina presión osmótica de la solución A.

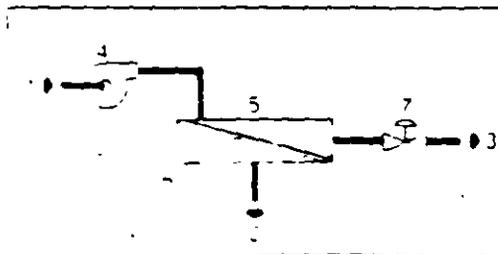


Ósmosis inversa

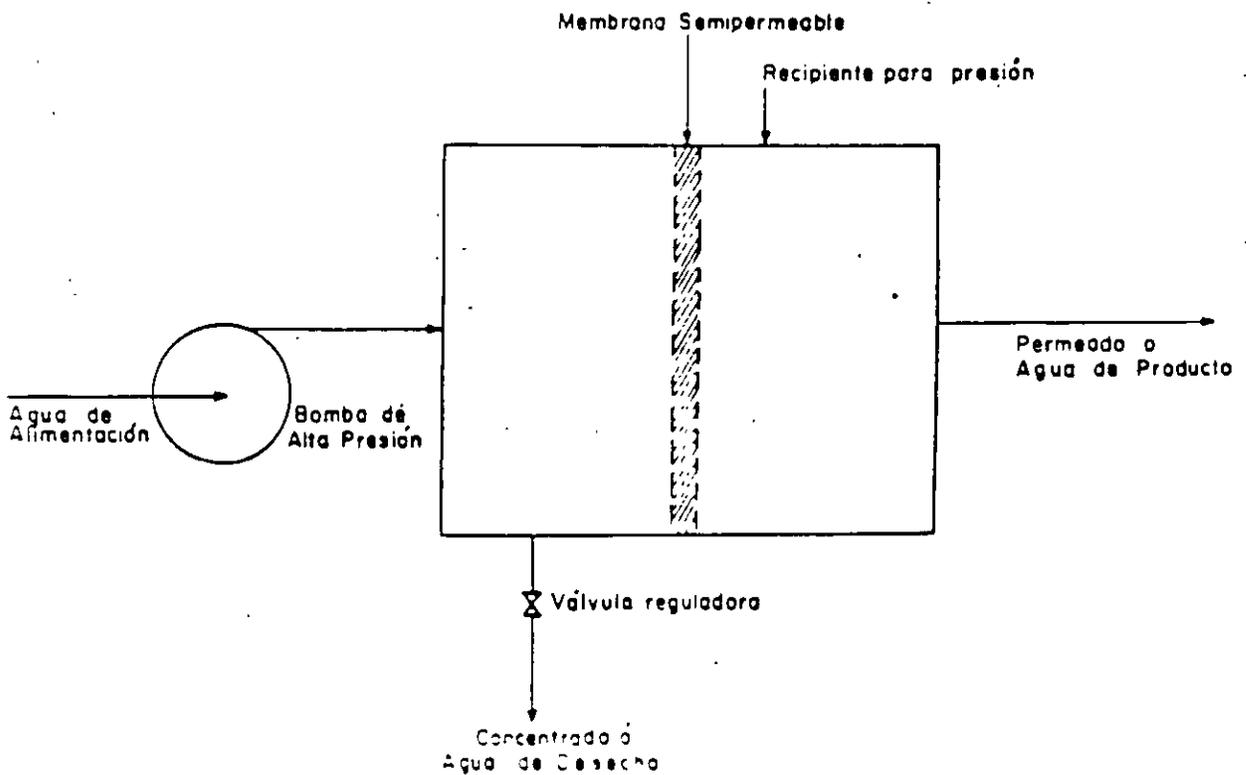
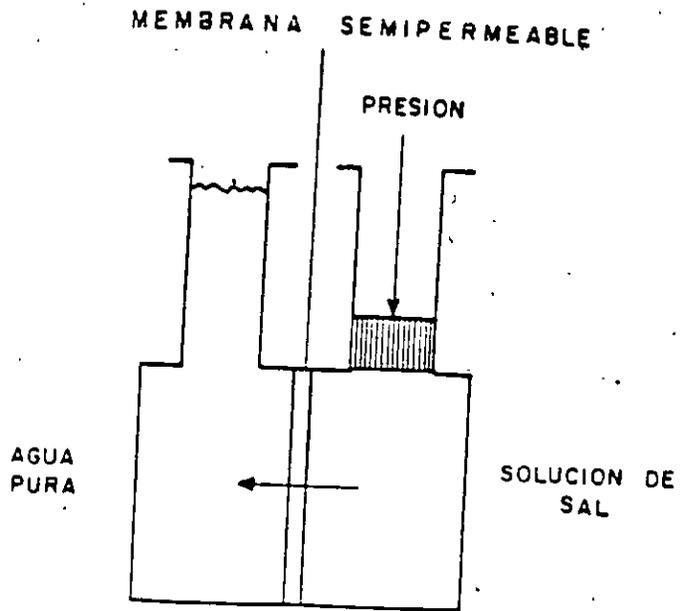
Si se aplica ahora por encima de la solución salina, una presión hidrostática superior a su presión osmótica se observa un flujo de agua pura en sentido inverso al anterior quedando las sales retenidas por la membrana. Este fenómeno recibe el nombre de ósmosis inversa.

- 1 - Agua bruta
- 2 - Agua depurada
- 3 - Venido concentrado
- 4 - Bomba de alta presión
- 5 - Módulo de ósmosis inversa
- 6 - Membrana semi permeable
- 7 - Válvula de regulación

Sistema típico de funcionamiento de una unidad de ósmosis inversa



# OSMOSIS INVERSA



ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL FLUJO EN EL SISTEMA OSMOSIS INVERSA

Por esto, la OSMOSIS INVERSA es la reversibilidad del fenómeno de OSMOSIS directa o natural.

La O.I., utiliza membranas semipermeables, que dejan pasar el agua, reteniendo del 90 al 99% de todos los minerales disueltos del 95 al 99% de la mayoría de los elementos orgánicos y el 100% de la materia coloidal (bacterias, virus, sílice coloidal .....)

Tomando en cuenta las variables de comportamiento, para este proceso, podemos mencionar:

- El flujo de agua a través de una membrana, es proporcional a la diferencia de presión aplicada a través de la membrana (400 a 1200 lb /pulg<sup>2</sup>).
- El flujo de sales a través de la membrana es proporcional a la diferencial de Concentraciones a través de la membrana, es decir, si se aumenta la presión de operación se aumenta el flujo de agua.

La conversión o recuperación es el porcentaje de agua de alimentación que es convertido en producto o permeado. Mientras más alta es la conversión mayor es el rendimiento. Sin embargo no siempre es recomendable una alta recuperación por la posibilidad de la precipitación de sólidos disueltos en la membrana, esta baja recuperación oscila entre 40-50% de conversión

Además, las membranas no son totalmente impermeables y siempre se tendrá cierta cantidad de materiales disueltos que pasarán a través. A ésta cantidad de material se le conoce como PASO DE SALES.

En la actualidad, se comercializan dos tipos de membranas:

- De acetato de celulosa (mezcla mono, di, triacetato).
- Membranas de poliamidas aromáticas.

Las primeras (A de C.) proporciona un fuerte caudal por unidad de superficie. Su diseño es tubular, espiral o fibras huecas. Las de poliamida tienen menor caudal específico y para obtener un máximo de superficie por unidad de volumen del permeador, tiene un diseño particular.

**MEMBRANAS DE ACETATO ESPIRALES  
Y MEMBRANAS DE POLIAMIDA DE FIBRAS HUECAS**

Membranas	Tratamiento de aguas de salinidad < 15 g/l	
1. Naturaleza	poliamida aromática B-9	acetato de celulosa
2. Configuración	fibras huecas	espiral o fibras huecas
3. Resistencia física		
— Presión normal de funcionamiento	28 bar	30 a 42 bar
— Contrapresión máxima del agua producida	3.5 bar	
— Temperatura máx de funcionamiento	35 °C	30 °C
— Temperatura máx de almacenamiento	40 °C	30 °C
4. Resistencia química.		
— pH tolerados	4 a 11	4.5 a 6.5
— Hidrólisis	insensible	muy sensible
— Ataque bacteriano	insensible	muy sensible
— Cloro libre — dosis máxima admisible en continuo	pH ≤ 8 0.1 mg/l pH > 8 0.25 mg/l	0.5-1 mg/l
— Otros agentes oxidantes	buena resistencia	resistencia mediana
5. Duración	3 a 5 años	2 a 3 años
6. Paso de sal (NaCl)	5 a 10 %	5 a 10 %

También existen unas membranas llamadas «agua de mar», las cuales, partiendo de polímeros de base, tienen una estructura más «apretada» por lo que pueden desalinizar, en una sola fase, soluciones de varias decenas de gramos de sal por litro, como el agua de mar. Este es el caso de la membrana B-10 de fibras huecas de poliamida que, desde 1975, ha permitido la construcción de varias plantas de desalinización de agua de mar, especialmente en parques.

-La resistencia a los agentes químicos y biológicos es mayor en las membranas de poliamida que en las de acetato, en las que se presenta la hidrólisis, si no se respetan rigurosamente las condiciones de operación.

Los dos diseños más importantes de Osmosis Inversa son:

- Módulos de arrollamiento en espiral:

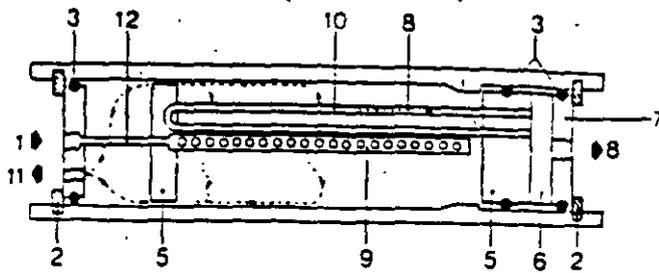
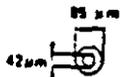
Las membranas se arrollan por pares sobre un tubo central en el que se colecta el permeado. El agua que será tratada circula paralelamente al tubo central, por los espacios acondicionados entre las dos caras activas de las membranas por medio de unos espaciadores (de plástico)

El producto atraviesa un material y llega al tubo central.

- Módulos de fibras huecas:

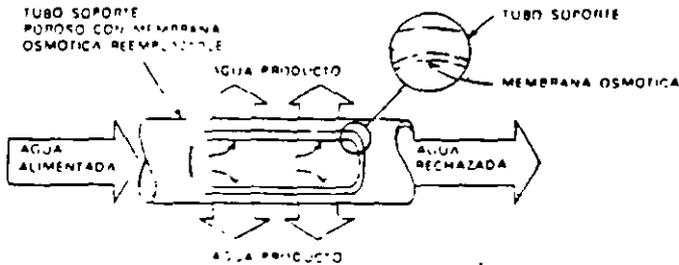
Una fibra hueca puede asimilarse a un cilindro poroso de pared gruesa, cuya resistencia es función de la relación diámetro exterior / diámetro interior. Si esta relación permanece constante cuando sus diámetros decrecen, el cilindro conserva sus propiedades de resistencia aun cuando disminuya el espesor de la pared (de esta manera se aumenta el caudal del agua que la atraviesa). Así se logra tener una membrana de superficie máxima por unidad de volumen, capaz de resistir, sin soporte mecánico, altas presiones

MÓDULOS DE FIBRAS HUECAS.

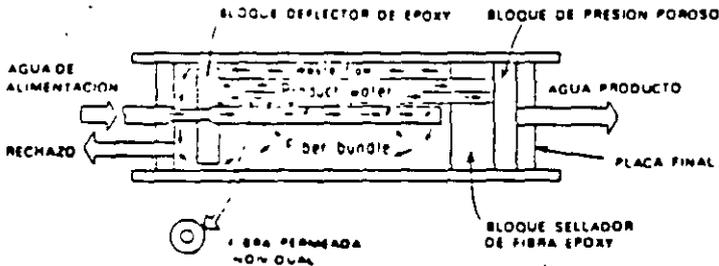


- 1 - Agua bruta.
- 2 - Fijación.
- 3 - Juntas tóricas.
- 5 - Placa epoxy.
- 6 - Disco poroso.
- 7 - Placa de cabeza
- 8 - Agua pura
- 9 - Tubo poroso distribuidor.
- 10 - Fibra hueca.
- 11 - Rechazo
- 12 - Tubo no poroso

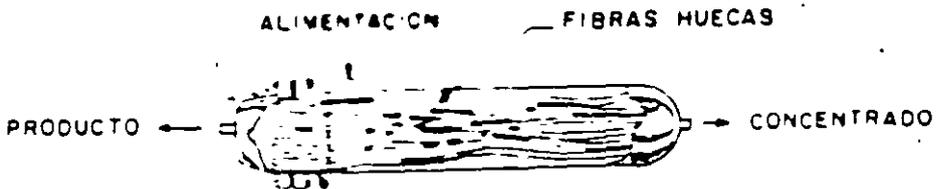
- Esquema de principio de un módulo de fibras huecas tipo B-9 PERMA SEP



El diseño tubular emplea una membrana de acetato de celulosa con un recubrimiento en la superficie interior de un tubo soporte. El agua alimentada fluye a través del tubo, el líquido purificado pasa a través de la membrana tubular y los contaminantes que permanecen dentro del tubo se descargan en el extremo opuesto. Varias unidades de membranas de tubo se conectan en paralelo dentro de un recipiente con tubos múltiples para alimentación, concentrado y producto. (Cortesía de The Permutit Company)



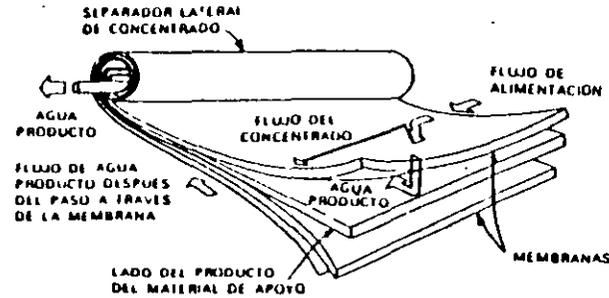
Las barreras de fibras delgadas huecas están atadas en un haz cilíndrico que contiene muchos pies cuadrados de área. Este ensamble está montado en un casco con entrada, salida del concentrado y salida del agua purificada. El agua se encuentra bajo presión alrededor de las fibras de modo que el agua pura pasa a través de las paredes de las fibras y fluye a través del diámetro de la fibra. El rechazo es descargado a través de la salida del concentrado. (Cortesía de The Permutit Company)



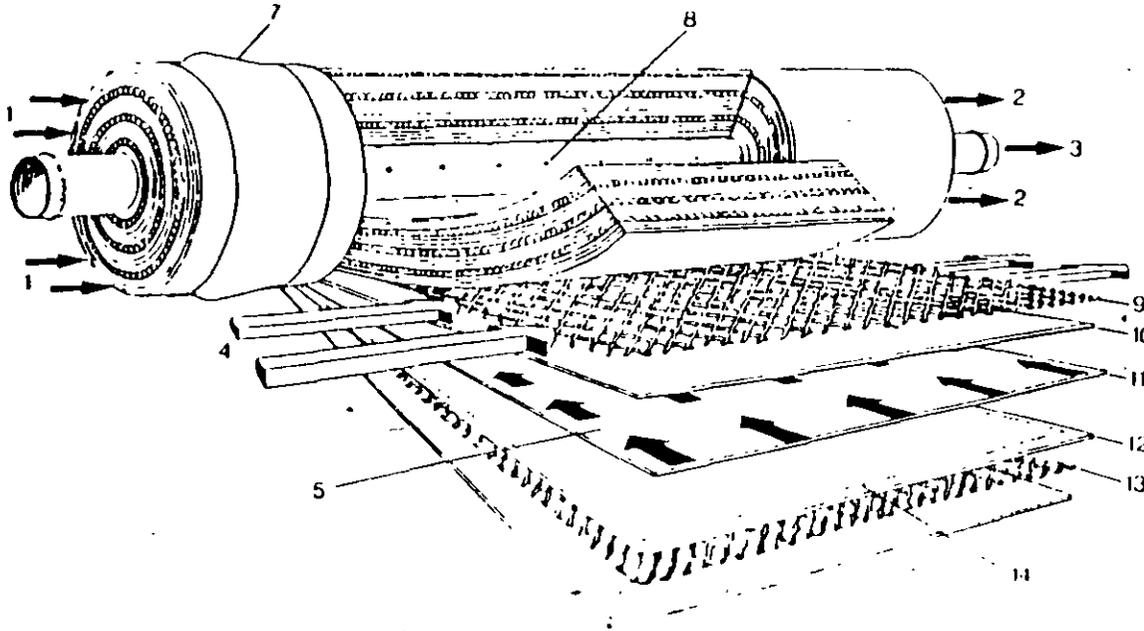
- SELLO DE PLASTICO

MÓDULOS DE ARROLLAMI. I'ESPIRAL

Las membranas se enrollan por pares sobre un tubo central, en el que se recoge el permeado. La solución que debe desmineralizarse circula paralelamente al tubo central, dentro de los espacios acondicionados entre las dos caras activas de las membranas por medio de unos espaciadores (en general, rejas de plástico)



Barreras OI enrolladas en espiral son membranas del tipo lámina de acetato de celulosa modificado enrolladas alrededor de un tubo colector permeado y cubierto con un revestimiento exterior. Los elementos se hallan alojados en un recipiente que contiene los sellos, las salidas y las entradas necesarias. El agua de alimentación pasa a través de las membranas al tubo colector y sale del elemento. Los contaminantes son desechados a través de la salida del concentrado. (Cortesía de The Permut Company)



1. Agua de alimentación  
2. Salida de agua producto  
3. Salida de concentrado  
4. Espaciador  
5. Membrana  
6. Membrana  
7. Espaciador  
8. Membrana  
9. Membrana  
10. Membrana  
11. Membrana  
12. Membrana  
13. Membrana

Las fibras son del grueso de un cabello humano, con un agujero a todo lo largo.

La membrana consiste en un soporte poroso con un centro hueco, una capa soporte de polímero poroso y en el exterior un forro delgado densamente empacado. La separación ocurre sobre la superficie de la fibra. La armadura de resina epóxica y fibra de vidrio contiene al material de fibra hueca que los une en cada extremo.

En un permeador de cuatro pulgadas de diámetro hay un millón de fibras aproximadamente, que soportan una presión de 400 lb/pulg<sup>2</sup> del agua de alimentación que entra por el tubo central y fluye radialmente pasando por las fibras para fluir por el interior hacia la placa epoxi como producto.

Las sales concentradas salen en el rechazo por el interior del módulo hacia el otro extremo para su desecho.

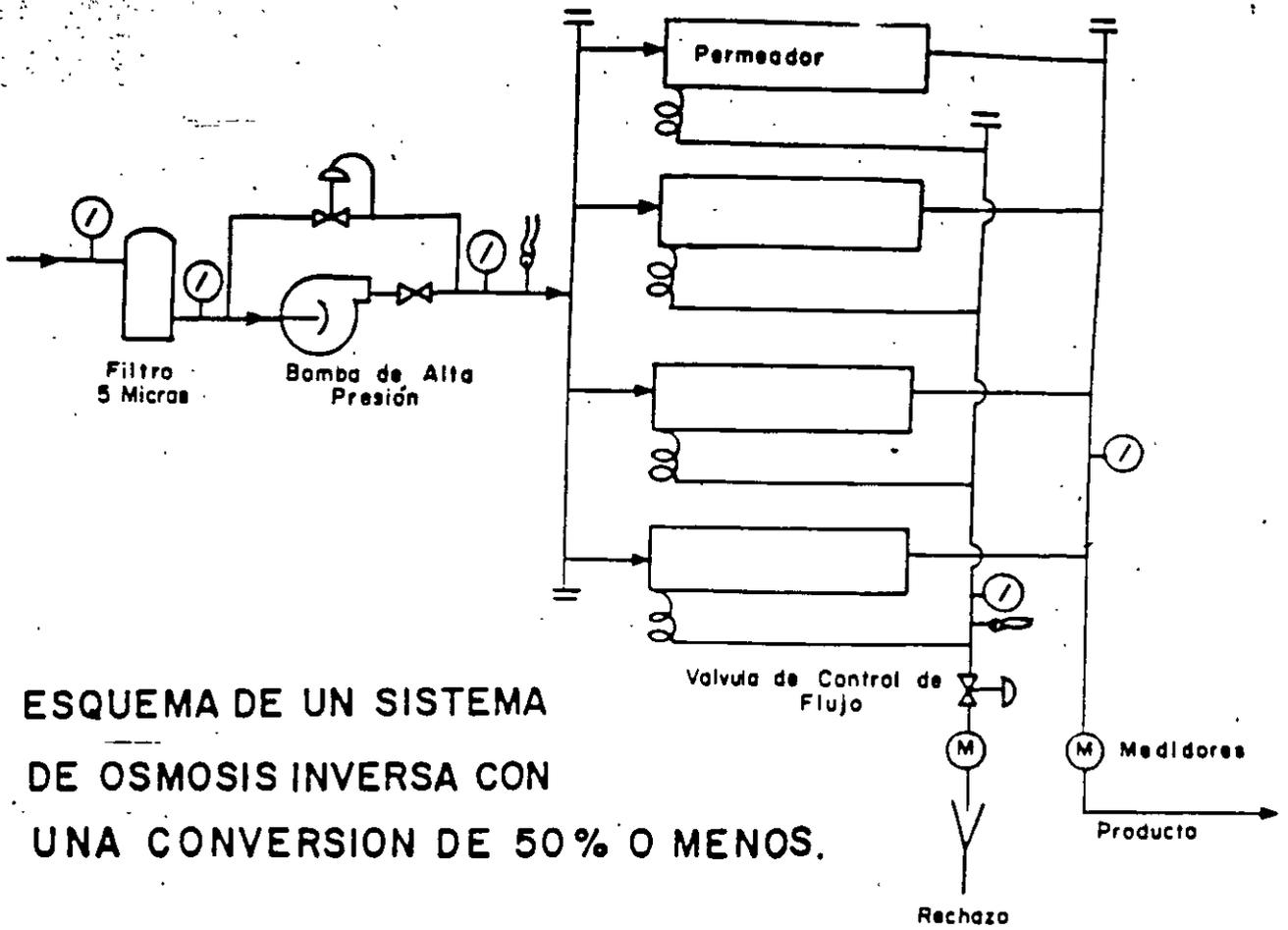
### **Instalaciones de Osmosis Inversas.**

Una instalación de O.I., puede constar desde un pequeño y único módulo hasta una yuxta posición de módulos elementales para lograr una geometría determinada y obtener la cantidad de agua necesaria y de una calidad determinada.

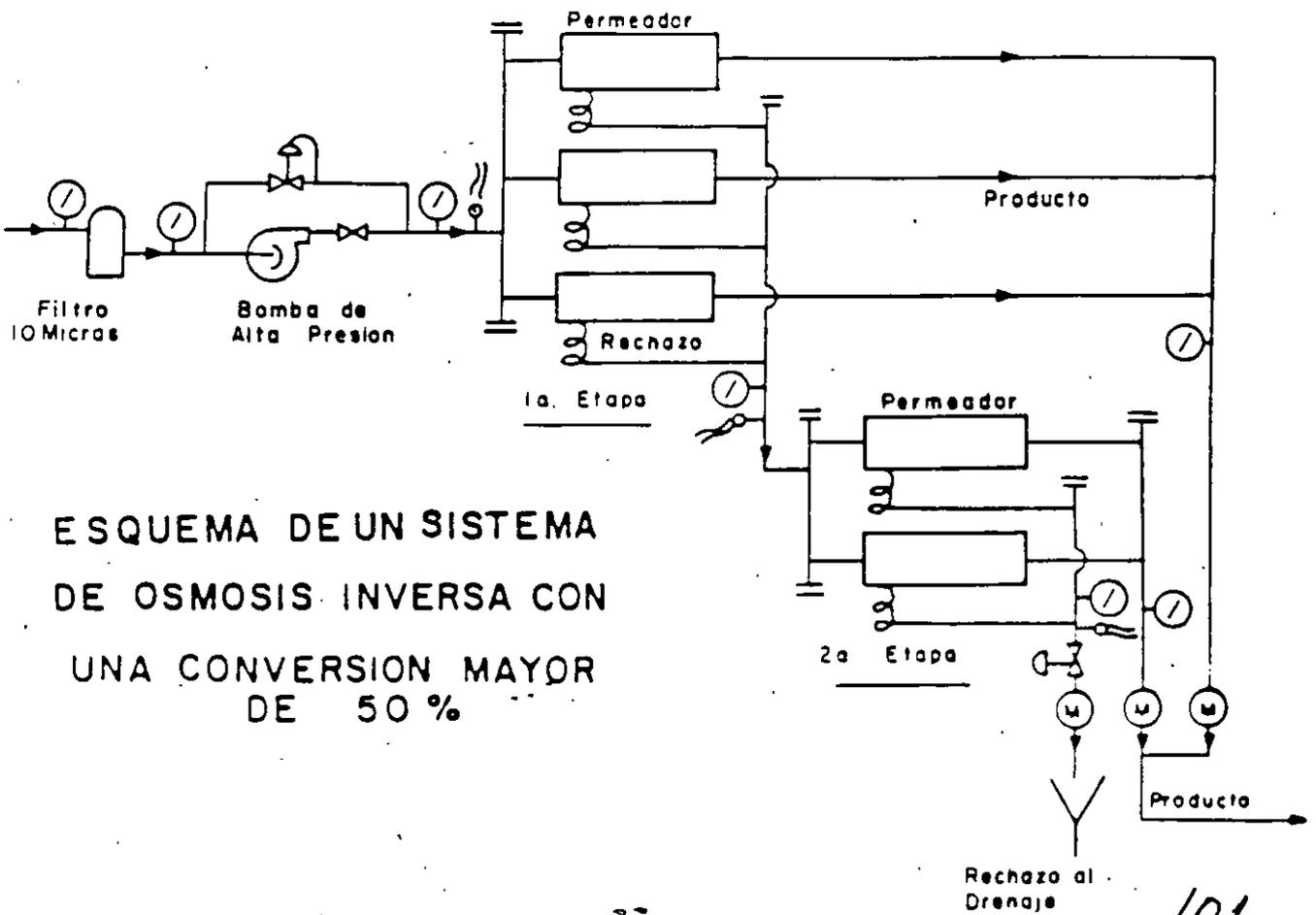
- **En Paralelo.-** En este tipo de instalaciones todos los módulos trabajan en las mismas condiciones de operación (presión y conversión). Generalmente son de baja capacidad y mediante filtros de cartuchos se protege la bomba de alta presión y las membranas, al evitar materias en suspensión. El grado de conversión es de 50%.
- **En Serie.-** Con esta disposición se aumenta el % de conversión. El rechazo de la primera etapa, alimenta a la segunda etapa, sin necesidad de rebombeo. Este sistema puede alcanzar 70 a 90 % de conversión, con 2 o 3 etapas.

Existen otros arreglos de instalaciones que dependen de la necesidad específica de la calidad del agua a utilizar, ya que la O.I., es aplicable a casi todos los casos en los que se pretende una desmineralización o una concentración de iones o de moléculas orgánicas. En la actualidad, existen algunas aplicaciones más importantes:

- **Abastecimiento de agua potable o a la industria.-** Esto en localidades en donde se dispone solamente de agua salobre (1500 a 6000 mg/lit de sólidos totales disueltos)



ESQUEMA DE UN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA CON UNA CONVERSION DE 50% O MENOS.



ESQUEMA DE UN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA CON UNA CONVERSION MAYOR DE 50%

- Producción de agua de alta calidad.- Para calderas de media y alta presión, industria electrónica, farmacéutica, nuclear....., así como laboratorios, hospitales, etc.
- Agua de mar.- Dado que algunas membranas tienen una conversión de 98% de iones monovalentes, pueden producir agua potable al desalinizar el agua de mar, en un sólo paso de O.I.
- Aguas residuales industriales.- Con este sistema de O.I., pueden recuperarse metales en los aclarados de los baños de galvanización, como el niquelado, cobrizado, cadmizado....., directamente a la salida del proceso que produce los efluentes ricos en iones recuperables.

## **VII.- TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA DE CALDERAS**

### **Dosificación Química para Control del Ciclo Agua-vapor**

Para evitar que se presenten los daños por impurezas, es necesario llevar un control del ciclo a base de dosificación química y análisis para mantener las concentraciones de las impurezas dentro de los límites de control requeridos para cada unidad dependiendo de sus condiciones de operación.

El tratamiento químico del ciclo se puede dividir en dos:

- A) TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA DE CALDERA Y
- B) TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA DE ALIMENTACION.

#### **A) Tratamiento Químico del Agua de Caldera.**

Existen varios tipos de tratamiento para el agua de Caldera.

## 1. Control por fosfatos:

Para evitar que las sales de calcio y magnesio formen una incrustación en la caldera, el tratamiento interno, debe precipitarlos como lodos, manteniéndose este lodo en forma fluida para eliminarlos mediante purgas. La eliminación del calcio se considera más problemática que la del magnesio ya que este es rápidamente precipitado por la alcalinidad del agua de caldera formando hidróxido de magnesio. La sustancia química más comúnmente usada para la precipitación de las sales solubles de calcio son los fosfatos, estos reaccionan con el calcio para formar fosfato tricálcico que es un lodo no adherente. para que ésta reacción tenga lugar, debe existir suficiente alcalinidad en el agua de caldera para mantener un pH superior a 9.5 y asegurar la precipitación del fosfato tricálcico, los fosfatos mono y dicálcico son precipitados adherentes difíciles de eliminar por la purga.

La dosificación del fosfato, se debe efectuar directamente al domo superior, ya que por la rápida reacción con el calcio, si se dosifica en la línea de agua de alimentación, puede ocasionar precipitados y depósitos en tubería y válvula, que pueden obstruir el flujo o la operación de los equipos de control.

La dosificación de fosfatos no es continua, sino que se dosifican de manera tal, que siempre se mantenga un residual de  $PO_4$  dentro de ciertos límites.

a. Tratamiento Cáustico:

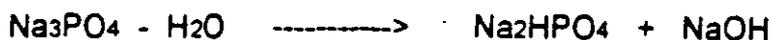
Se controla el pH para prevenir la formación de incrustación mediante la inyección de sosa cáustica y fosfato trisódico. Este tratamiento generalmente se utiliza en calderas de baja presión ya que el NaOH puede causar severos problemas de corrosión cáustica en calderas de alta presión.

b. Control Coordinado pH.- fosfatos:

Utilizado en unidades operando a una presión de 600 psig. en adelante, con el objeto de reducir al mínimo la corrosión cáustica.

Se ajustan las características del agua de caldera de tal manera que se tenga una relación fosfato-álcali aproximado a la hidrólisis estequiométrica del fosfato trisódico. Se selecciona el fosfato a dosificar de tal manera que al adicionar el fosfato el pH. se mantenga abajo de la curva en la gráfica pH -  $PO_4$  (ver figura N° IX.1).

De esta manera no existirá hidróxido de sodio libre, entendiéndose por hidróxido de sodio libre la cantidad de NaOH en solución en exceso derivada de la hidrólisis del fosfato trisódico de acuerdo con la siguientes ecuación:



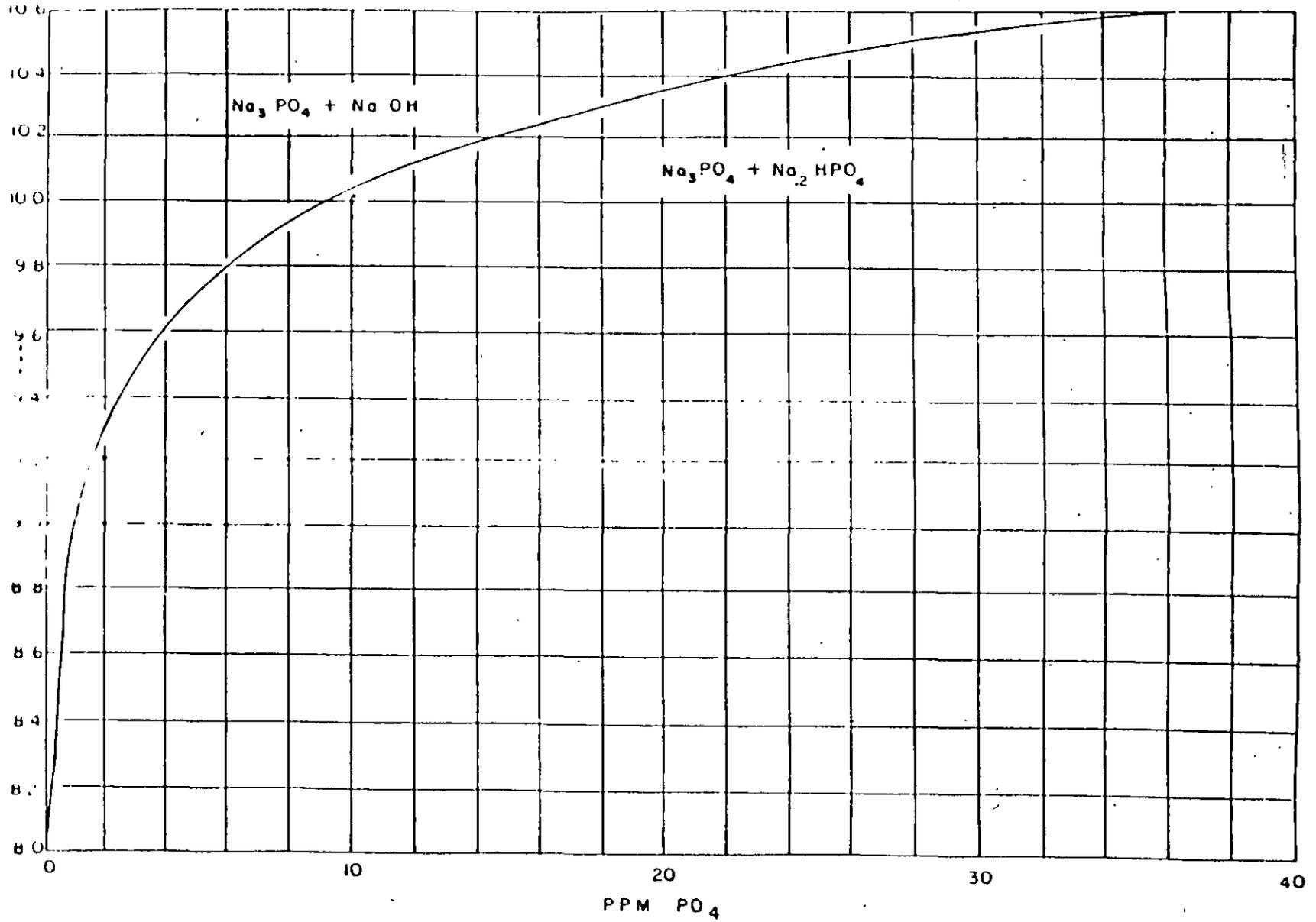
c. Control Congruente:

La corrosión cáustica se ha llegado a presentar aún cuando se observe estrictamente el control coordinado de pH-fosfatos.

Se han propuesto varias explicaciones a ello y la más aceptable establece que al precipitar el fosfato de una solución sobresaturada, no lo hace exclusivamente como fosfato trisódico sino como fosfato trisódico y disódico con el resultado de que el agua de caldera contendrá un exceso de hidróxido de sodio libre

Las composiciones congruentes, son aquellas en las cuales la fase sólida es igual a la fase líquida, y corresponden a las relaciones molares de sodio fosfatos de 2.65 a 68°F y de 2.85 a 572°F. Se prefiere mantener la relación Na a PO<sub>4</sub> debajo de 2.6.

Dependiendo de los contaminantes que entren a la caldera se puede mantener el control entre estos límites por adición adecuada de los diferentes tipos de fosfatos.



107

Figura IX.1 Curva para el Coef. Coordinado de Fosfatos-PH, Nivel

Bajo para Uso e as de Alta presión

La relación entre la razón de mezcla de fosfato de disódico y fosfato trisódico y la razón molar Na P<sub>2</sub> se muestra en la siguiente tabla.

RAZON DE MEZCLA		RAZON MOLAR	
No.	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	NaPO <sub>4</sub>
1	1.0	0	3/1
2	0.9	0.1	2.9/1
3	0.8	0.2	2.8/1
4	0.7	0.3	2.7/1
5	0.6	0.4	2.6/1
6	0.5	0.5	2.5/1
7	0.4	0.6	2.4/1

La Fig. N° IX.2 muestra la curva de control congruente pH - PO<sub>4</sub> Na/PO<sub>4</sub>. En ella se tienen los valores de pH en función de la concentración de fosfato para diferentes relaciones molares de Na/PO<sub>4</sub>.

Este tipo de control es utilizado en calderas que operan a presiones superiores a 1500 psig.

## 2. Tratamiento volátil

Es el control de pH del agua de caldera mediante productos volátiles tales como la hidrazina, amoníaco, morfolina y ciclohexilamina.

Este tipo de tratamientos son recomendados para calderas que operan a presiones hasta de 2400 psig. donde el fenómeno de hide-out (enmascaramiento) de fosfatos ocurre algunas veces.

Sin embargo el control congruente de fosfatos debe ser usado en el caso de posibles incrementos de dureza del agua de alimentación por fugas en el condensador.

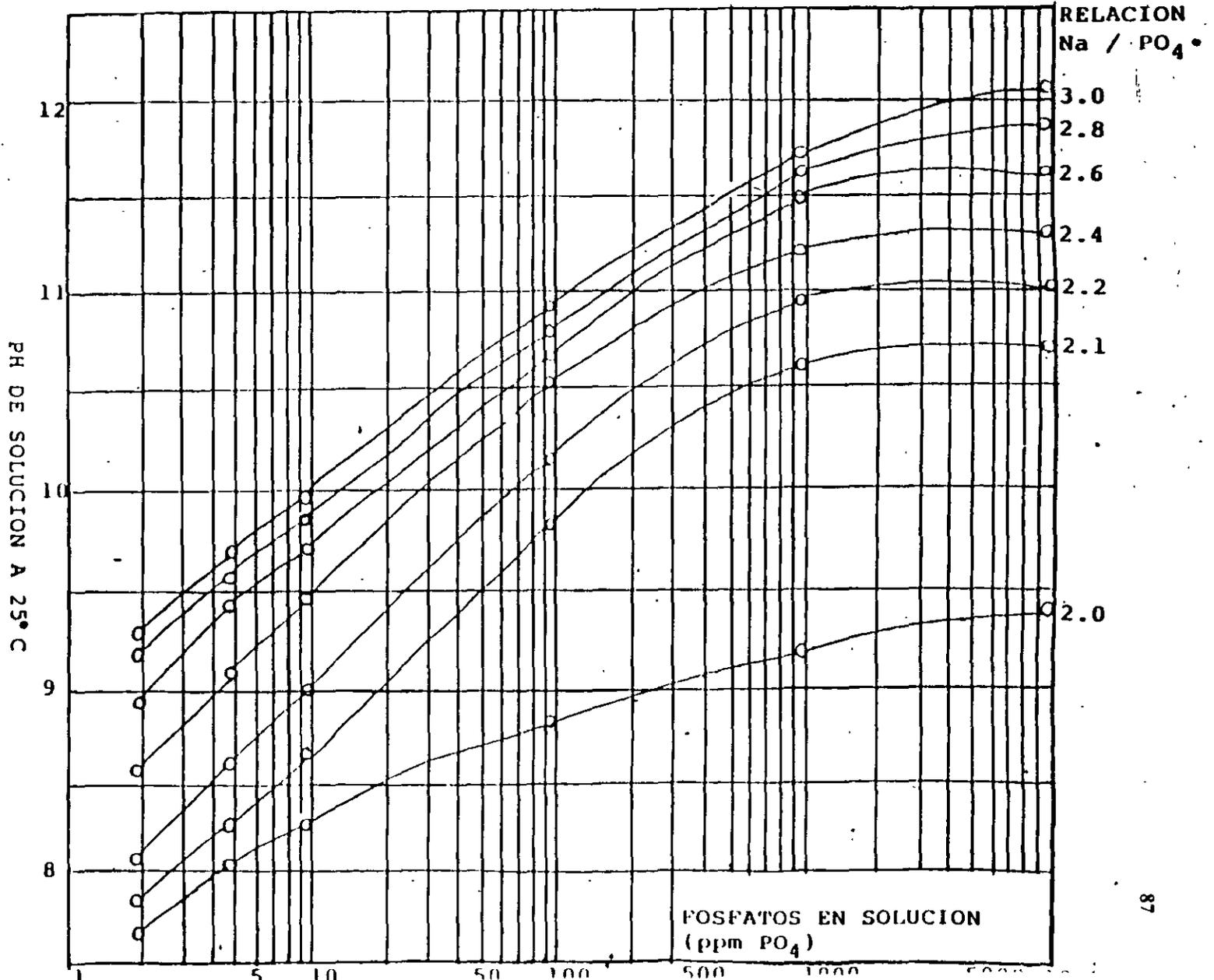
## 3. Control de quelatos:

Los quelatos reaccionan con los cationes divalentes y trivalentes para formar compuestos solubles complejos que son estables térmicamente, los quelatos más comúnmente utilizados con este fin, son sales del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y del ácido nitrilotriacético (NTA) Su reacción con el calcio se muestra a continuación.

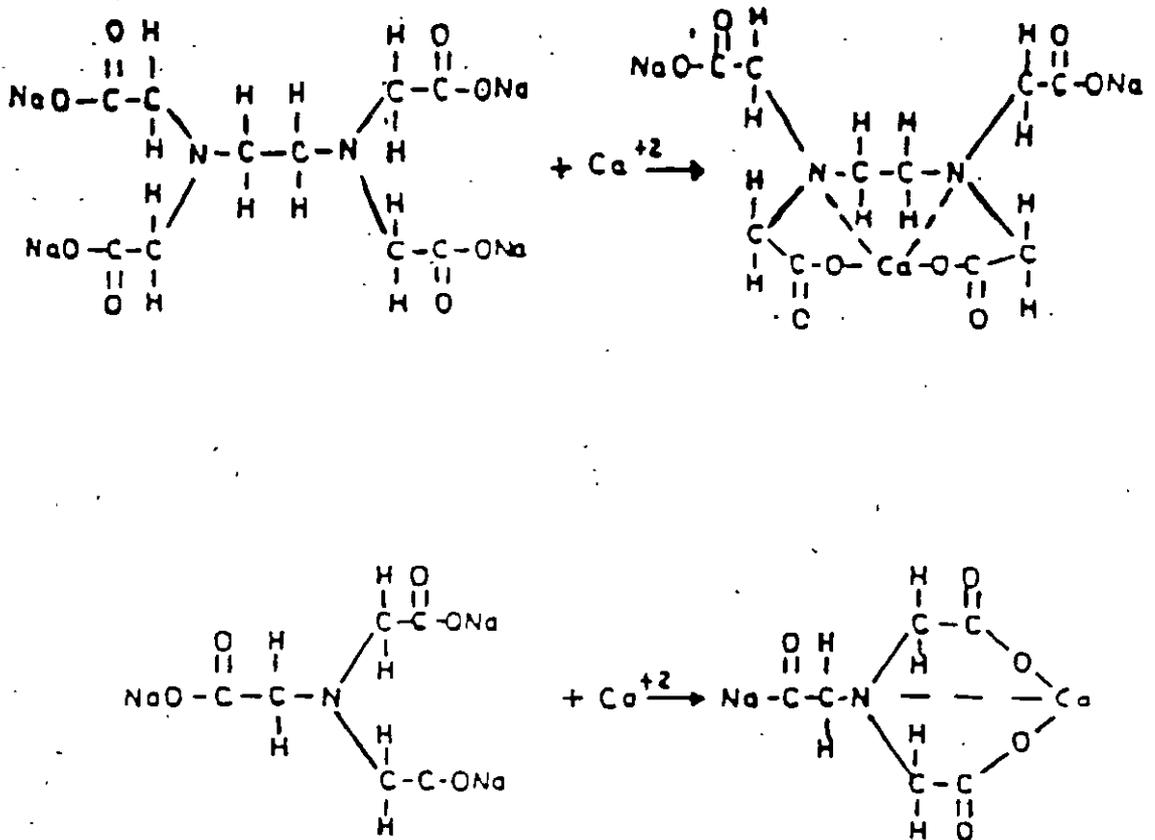
CONTROL CONGRUENTE

M A CASTILLO M TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA

FIGURA IX.2 PH de Solución a 25°C



110



**REACCION DEL NTA CON EL CALCIO**

Ambos quelatos se descomponen a temperaturas altas. Generalmente el NTA se emplea en calderas con presiones inferiores a 900 psig., mientras que el EDTA se emplea hasta 1200 psig. Los fosfatos constituyen un tratamiento por precipitación, mientras que los quelatos los constituyen por solubilización.

///

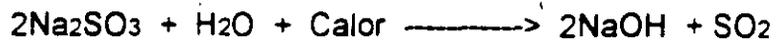
## **B) Tratamiento Químico del Agua de Alimentación**

Este se efectúa con la finalidad de eliminar principalmente el oxígeno que trae consigo. La presencia de este oxígeno ya en la caldera, ocasionará la corrosión por picaduras. Aparte este oxígeno puede favorecer otros tipos de corrosión como la corrosión de cobre por amoníaco. Es esencial la eliminación del oxígeno para evitar la corrosión del generador de vapor. Inicialmente se acostumbra su eliminación mecánica mediante desaeradores. Esta deaireación mecánica se aplica no únicamente al agua de repuesto, sino a toda el agua de alimentación. Bajo condiciones óptimas es posible reducir el oxígeno disuelto en el agua hasta concentraciones tan bajas como 0.007 ppm.

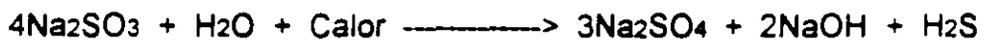
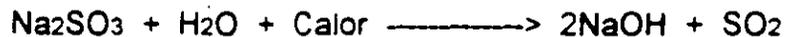
El remanente de oxígeno después de esta deaireación mecánica, será eliminado mediante medios químicos utilizando las siguientes sustancias químicas

## 1. Sulfito de sodio

El sulfito de sodio se ha utilizado desde hace mucho tiempo como un eliminador de oxígeno en agua de calderas. Reacciona rápido particularmente a elevadas temperaturas formando sulfato de sodio de acuerdo a la siguiente reacción:



Actualmente es utilizado en plantas con baja y moderada presión, siendo prohibitivo su uso en calderas de alta presión debido a una potencial descomposición térmica como sigue:

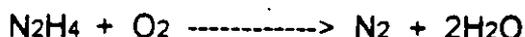


La reacción anterior se inicia a presiones de 600 psig., aún cuando usualmente no crea problemas sino hasta presiones mayores de 900 psig. El principal problema asociado con la descomposición del sulfito de sodio es la formación de gases corrosivos como el bióxido de azufre y el ácido sulfhídrico. Otra desventaja es el aumento del contenido de sólidos disueltos por presencia del sulfato de sodio, lo que propicia el arrastre y la necesidad de purgas.

En calderas que utilizan el control coordinado pH - PO<sub>4</sub> el uso de sulfito de sodio no es deseable ya que la introducción de iones altera el balance entre Na y PO<sub>4</sub>.

## 2. Hidrazina

Para calderas de alta presión se emplea como agente reductor la hidrazina (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>). Reacciona con el oxígeno disuelto del agua de acuerdo a la siguiente reacción:



Es importante hacer notar que los productos de la reacción de la hidrazina a diferencia de los del sulfito de sodio, no añaden sólidos disueltos al agua de caldera y además son inertes. Aparte de lo anterior, formará magnetita y óxido cuproso que son los óxidos estables del hierro y del cobre haciendo a estos materiales y a sus aleaciones menos susceptibles a la corrosión.

La hidrazina se alimenta en forma continua después del condensador o a la salida del deareador en cantidad suficiente para mantener un residual en caldera entre 0.002 y 0.020 ppm., como N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

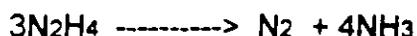


## Colección de muestras

Una parte importante del trabajo analítico, es la colección de muestras representativas, las cuales deben ser preservadas en su estado original hasta que pueda hacerse el análisis. Una muestra exactamente representativa es aquella que representa realmente el agua o al vapor en la parte del ciclo en que se ha tomado. No siempre es posible, la perfección a este respecto, pero hasta donde sea posible, las muestras se deberán tomar con este objeto en mente.

Las condiciones del agua y del vapor cambian de vez en cuando, y, en ocasiones, momentáneamente, por lo tanto, es necesario no solo tomar las muestras cuidadosamente, sino considerar también la influencia de las condiciones de operación en dicho momento, de modo que los resultados analíticos se puedan evaluar apropiadamente, o, en algunos casos, deberán tomarse muestras individuales durante dos periodos de carga promedio o bajo condiciones de carga en especial.

Entre 231 y 518°F la hidrazina aumenta su volatilización con lo cual protegerá el sistema post caldera al elevar el pH y pasivar las superficies del metal; a 518°F y arriba de esta temperatura la hidrazina se descompone conforme a la siguiente reacción:



Esta reacción ocurre relativamente despacio, pero se acelera conforme aumente el nivel de hidrazina. Un inconveniente de esta reacción, es la creación de amoníaco, el cual puede atacar el cobre y sus aleaciones en presencia de oxígeno.

### 3. Aminas neutralizantes

Normalmente se denominan aminas neutralizantes o volátiles y actúan neutralizando el ácido carbónico, elevando el pH. La morfolina y la ciclohexilamina, son las aminas neutralizantes más comúnmente usadas. La reacción para la morfolina es la siguiente:



Las aminas difieren en costo, reacción y relación de distribución vapor-líquido. Una utilidad muy interesante de las aminas neutralizantes es la prevención de la corrosión en el extremo húmedo de las turbinas. En esta sección la humedad condensada y la alta velocidad, tienden a eliminar la película protectora de óxidos, siendo necesario mantener un pH alto en esta zona. La morfolina es particularmente útil con este propósito porque es menos volátil que la ciclohexilamina.

#### 4. Aminas filmicas

Las aminas filmicas funcionan de manera distinta a las neutralizantes, en vez de neutralizar el bióxido de carbono, forman sobre la superficie metálica una película que actúa como barrera entre el metal y el condensado, protegiendo al primero del ataque del oxígeno y el bióxido de carbono.

Su dosificación, deberá ser continua y una vez formada la película, esta es durable y no se elimina en períodos cortos de suspensión del tratamiento.

Las aminas filmicas son valiosas en la prevención de corrosión, son aminas de alto peso molecular con cadenas rectas conteniendo de 10 a 18 átomos de carbón tales como la octadecilamina ( $C_{18}H_{37}NH_2$ ) y la hexadecilamina ( $C_{16}H_{33}NH_2$ ).

La película de las aminas filmicas, por ser muy delgada no impide la transmisión de calor y aparte de lo anterior, tiene la habilidad de remover depósitos antiguos de productos de corrosión.

### **Muestreo y Análisis**

Para llevar un adecuado control de la concentración de impurezas en el agua-vapor, así como de las especies químicas inyectadas para evitar problemas de corrosión e incrustación, es imprescindible la toma de muestras en distintos puntos del ciclo para su análisis.

El control satisfactorio de la calidad del agua en una planta de vapor depende de numerosos factores, entre los cuales, las pruebas frecuentes de control y su interpretación son de importancia fundamental.

AGUA DE ALIMENTACION CLASIFICACION	TIPO DE CALDERA	CILINDRICA		PARED DE TUBOS DE AGUA								
	PRESSION (kg/cm <sup>2</sup> )	1		< 10		10-20	20-30	30-50	50-75		75-100	
	RAZON DE EVAPO- RACION (kg/cm h)	< 30	> 30	< 50	> 50	-	-	-	-		-	
	pH. a 25°	> 7	> 7	> 7	> 7	> 7	> 7	8.0-9.0	8.0-9.0		8.0-9.0	
	DUREZA (PPM Ca CO <sub>3</sub> )	< 60	< 40	< 40	< 2	< 2	0	0	0		0	
	OXIGENO DISUELTO (PPM O <sub>2</sub> )	Mant. bajo	Mant. bajo	Bajo	Bajo	< 0.5	< 0.1	< 0.03	< 0.007		< 0.007	
	Fe Total (PPM Fe)	-	-	-	-	-	Bajo	Bajo	< 0.05		< 0.03	
	Cu Total (PPM Cu)	-	-	-	-	-	Bajo	Bajo	Bajo		< 0.02	
	NH <sub>4</sub> (PPM N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	-	-	-	-	-	-	0.01 0.05	0.01 0.03		0.01 - 0.03	
	SiO <sub>2</sub> (PPM SiO <sub>2</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-		-	
	Asbete (PPM)	0	0	0	0	0	0	0	0		0	
	Conductividad e- lectrica a 25°C	-	-	-	-	-	-	-	-		-	
AGUA DE CALDERA	METODO DE TRATAMIENTO	TRATAMIENTO CAUSTICO		TRATAMIENTO CAUSTICO					CAUSTICO	COORD.	CAUSTICO	COORD.
	pH. a 25°C	11.0 11.8	11.0 11.5	11.0 11.8	11.0 11.5	10.8 11.3	10.5 11.0	10.5 11.0	10.5 11.0	10.0 10.5	10.5 11.0	9.6 10.3
	ALCALINIDAD M (PPM CaCO <sub>3</sub> )	500 1000	500 800	500 1000	500 800	< 600	< 150	< 100	-		-	
	ALCALINIDAD F (PPM CaCO <sub>3</sub> )	300 800	300 600	300 800	300 600	< 400	< 120	< 70	-		-	
	Sólidos totales (PPM CaCO <sub>3</sub> )	< 4000	< 3000	< 3000	< 2500	< 2000	< 700	< 500	< 400		< 300	
	Cloruros (PPM Cl <sup>-</sup> )	< 800	< 500	< 500	< 400	< 300	< 100	-	-		-	
	Fosfato (PPM PO <sub>4</sub> )	20-40	20-40	20-40	20-40	20-40	20-40	10-20	5 - 15		3 - 10	
	SO <sub>3</sub> (PPM SO <sub>3</sub> )	-	-	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	5 - 10		1 - 3	
SiO <sub>2</sub> (PPM SiO <sub>2</sub> )	-	-	-	-	-	< 50	< 40	< 10		< 5		

119

CLASIFICACION	TIPO DE CALDERA	PARED DE TUBOS DE AGUA					
	PRESSION (kg/cm <sup>2</sup> )	100 - 125	125 - 150	>150			
AGUA DE ALIMENTACION	razón de evaporación sup. de cal (kg/m h)	-	-	-			
	pH. a 25°C	8.5 - 9.0	8.5 - 9.0	8.5 - 9.0			
	Dureza (PPM CaCO <sub>3</sub> )	0	0	0			
	Oxígeno disuelto (PPM O <sub>2</sub> )	< 0.007	< 0.007	< 0.007			
	Fe total (PPM Fe)	< 0.03	< 0.02	< 0.02			
	Cu total (PPM Cu)	< 0.02	< 0.01	< 0.005			
	NH <sub>4</sub> (PPM N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0.01 - 0.03	SOBRE 0.01	SOBRE 0.01			
	ácido (PPM SiO <sub>2</sub> )	< 0.02	< 0.02	< 40.02			
	Aserte (PPM)	-	-	-			
	Conductividad eléctrica a 25°C	-	< 0.3	< 0.3			
AGUA DE CALDERA	METODO DE TRATAMIENTO	CAUSTICO	COORDINADO	CONGRUENTE	VOLATIL	CONGRUENTE	VOLATIL
	pH. a 25°C	10.5-10.8	9.6-10.3	9.0-10.0	8.5-9.0	9.0-9.5	6.5-9.0
	Alcalinidad M (PPM CaCO <sub>3</sub> )	-	-	-	-	-	-
	Alcalinidad F (PPM CaCO <sub>3</sub> )	-	-	-	-	-	-
	Sólidos totales (PPM CaCO <sub>3</sub> )	< 100	< 50	< 2	< 20	< 2	< 2
	Cloruros (PPM Cl <sup>-</sup> )	-	-	-	-	-	-
	Fosfatos (PPM PO <sub>4</sub> )	3 - 10	0.5 - 5	-	0.3 - 3	-	-
	Sulfatos (PPM SO <sub>3</sub> )	0.5 - 2.0	-	-	-	-	-
ácido (PPM SiO <sub>2</sub> )	< 2	< 0.5	< 0.5	< 0.2	< 0.2	< 0.2	

120

La magnitud del trabajo analítico variará con el diseño de la planta, las facilidades suministradas para el tratamiento de agua y los controles químicos requeridos.

El programa de frecuencia de análisis de agua, y la selección de los métodos a seguir, requiere de un estudio adecuado para cada planta en particular.

Deberán proporcionarse facilidades para muestrear el agua a través de todo el ciclo: agua de alimentación, agua de caldera, vapor saturado y sobrecalentado, condensado de vapor, agua deareada y calentadores de agua de alimentación.

Debido a los problemas presentados en las unidades que operan a alta presión, en las nuevas plantas se instalan tableros de análisis continuos para tener medición todo el tiempo, de los parámetros más importantes a controlar. Así, en las nuevas centrales generadoras se tienen los siguientes análisis continuos:

**pH.-** Condensado, Agua de alimentación agua de caldera, deareador, vapor principal, vapor saturado.

**Conductividad específica** - en los mismos puntos que el anterior.

**Conductividad catiónica** - en los mismos puntos que el anterior.

**Oxígeno disuelto** - en salida del deareador.

**Hidrazina** - en agua de alimentación.

**Sodio** - en condensado y vapor principal.

**Sílice** - en agua de caldera.

**Fosfatos** - en agua de caldera.

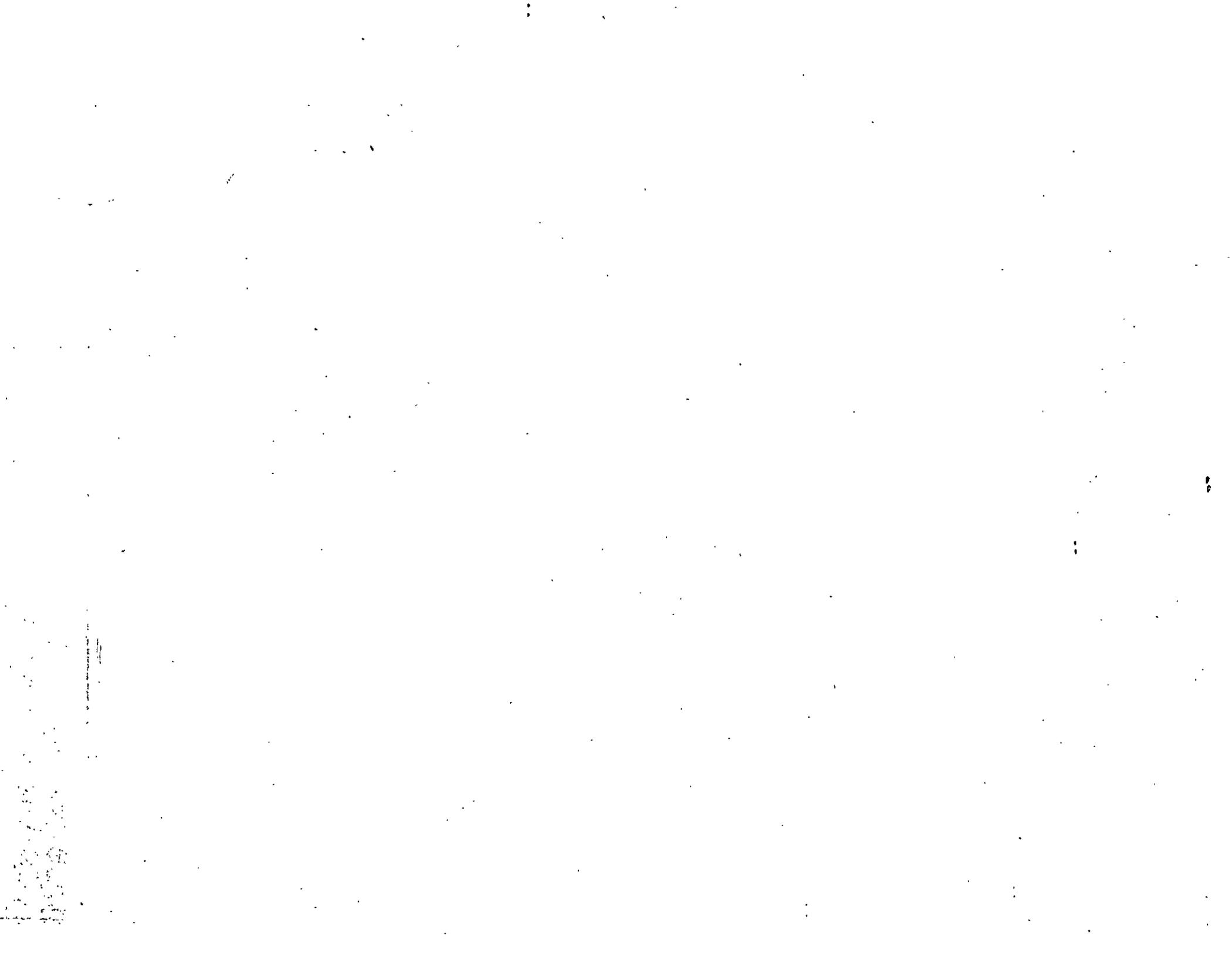
A lo anterior es necesario adicionar, que se pueden ajustar puntos de alarma de acuerdo a los límites de control alto y bajo, de tal manera que se pueda detectar oportunamente cualquier problema de contaminación

De esta manera en las plantas modernas, además de contar con el sistema de análisis continuos, se efectúan análisis de rutina cuya frecuencia recomendada, se puede apreciar en la tabla fig. No. IX-3

No.	PUNTO DE MUESTREO	TIPO DE ANALISIS Y FRECUENCIA DE MEDICION											
		pH.	CONDUCTIV.	O <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe	Cu	PO <sub>4</sub>	F	M	Cl	NH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>
1	DESCARGAS BOMBAS DE CONDENSADO	⊗	⊗	△	○		⊗				○		○
	DEAREADOR												
	ENTRADA	△	△	⊗									
	SALIDA	⊗	⊗	⊗									○
2	SALIDA DE CALENTADORES	⊗	⊗			⊗	⊗						
3	AGUA DE CALDERA	⊗	⊗		○	⊗		○	○	○	○	○	
4	VAPOR SATURADO	△	△		△								
5	VAPOR PRINCIPAL	⊗	⊗		○								
6	AGUA DE ALIMENTACION	⊗	⊗		○	⊗						○	

 INSTRUMENTO DE MEDICION CONTINUA  
 2 VECES A LA SEMANA  
 3 VECES AL DIA  
 EN MOMENTOS NECESARIOS

122





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**DIPLOMADO EN INGENIERÍA DE CALDERAS Y  
RECIPIENTES SUJETOS A PRESIÓN**

**MODULO IV: INGENIERÍA DE COMBUSTIÓN  
E INSTALACIONES**

**TEMA:**

**INSTALACIONES TÍPICAS EN  
CALDERAS TIPO PAQUETE**

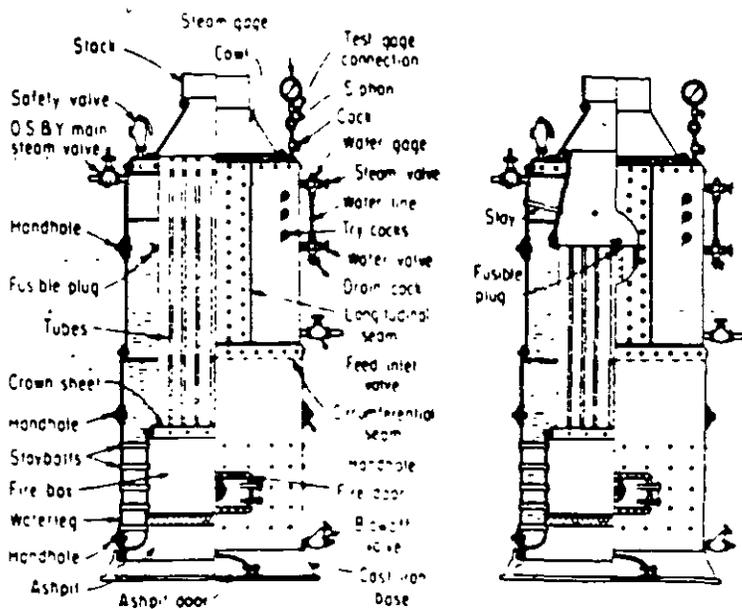
**EXPOSITOR: ING. ASCENSIÓN CASTAÑEDA CANO**

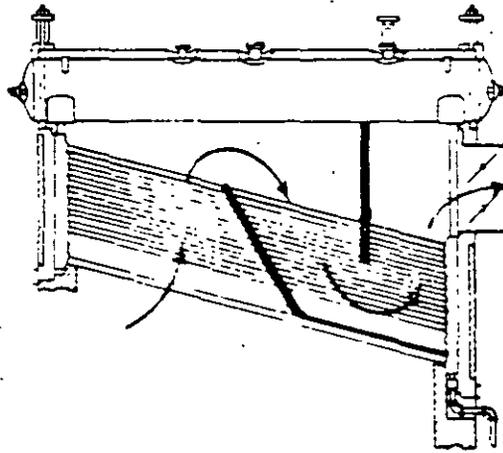
**PALACIO DE MINERÍA  
1997**



## **Instalaciones Típicas en Calderas tipo paquete**

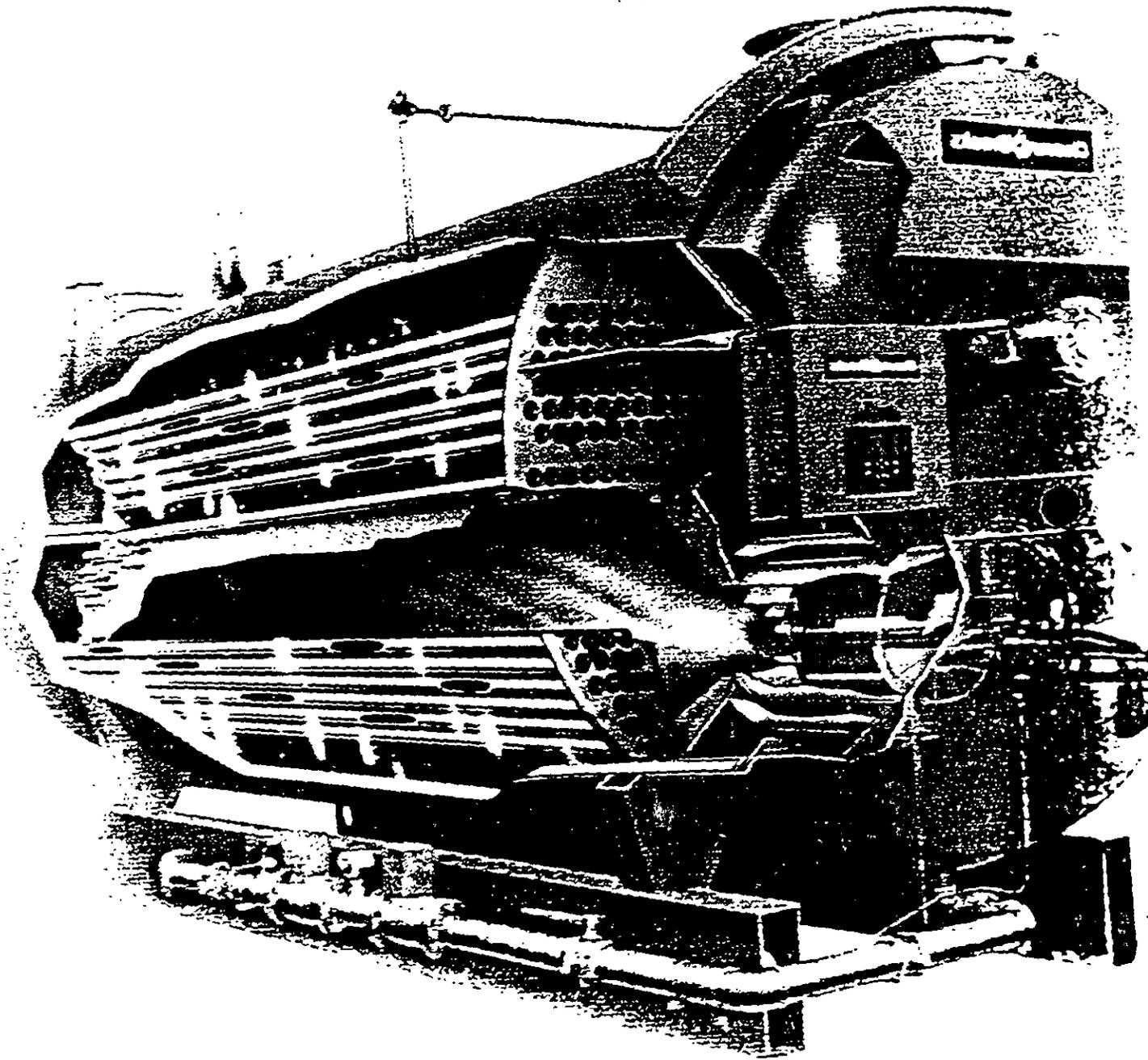
*Expositor:* Ing. Ascensión Castañeda Cano

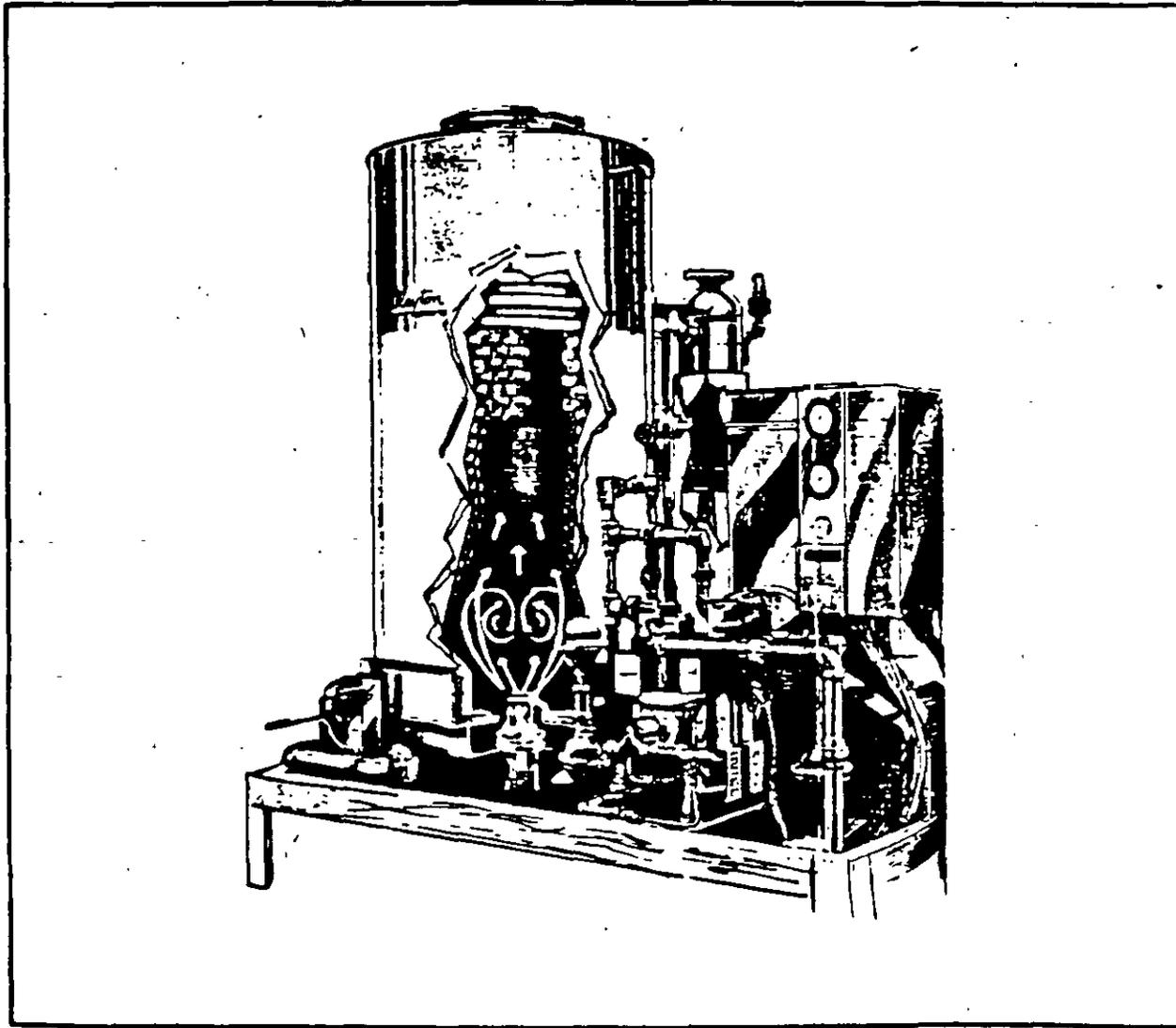




**1** In line-tube design with sectional, cast iron, vertical headers has been the work-horse of steam generation for nearly 100 years. Cross-tie at bottom of rear headers forms the mud drum. Several designs of this basic boiler are seeing service today.

**2** Bent-tube boiler using all-steel construction, first became popular around the turn of century. By moving the relative position of their two, three and sometimes four drums, they are quite flexible and are readily adapted to a variety of space limitations.





En conclusión podemos decir que para contar con la reserva mínima de agua de aliment es necesario tener un tanque de condensados, un desaerador o un sistema con la combinación de ambos.

#### Equipo de bombeo y control del sistema.

Existen cinco criterios de diseño que deben ser considerados antes de que una bomba de alimentación de agua sea seleccionada:

- 1.- Operación continua o intermitente.
- 2.- Temperatura del agua manejada inicialmente.
- 3.- Capacidad.
- 4.- Presión de descarga.
- 5.- Carga neta de succión positiva (NPSH) requerida.

1.- La primera consideración que hará tomar una decisión es determinar si la bomba va a funcionar en forma continua o intermitente; esta consideración depende de una serie de factores tales como, el tipo de servicio de la caldera, tubos de agua o tubos de fuego, marca, etc. En la mayoría de los casos de aplicación de bombas de alimentación de agua en calderas de tubos de fuego éstas están dentro de un ciclo de operación intermitente; mientras que, para calderas de tubos de agua el ciclo de trabajo para las bombas de alimentación es continua.

Las calderas de tubos de fuego son usualmente proporcionadas con un flotador sobre el cual actúa un switch, el cual para y arranca la bomba de alimentación entre cierto nivel. En este caso la línea de descarga a través de la bomba de alimentación debe dirigirse directamente a la caldera sin restricciones en esta línea.

Las calderas de tubos de agua son usualmente proporcionadas con un tipo de regulador de agua de alimentación el cual "modula" la cantidad de agua alimentada a la caldera entre ciertos niveles predeterminados, en este caso la bomba trabajará continuamente y ésta opera en los rangos de mínima y máxima capacidad.

Cuando la caldera de tubos de fuego es proporcionada con algún tipo de válvula motorizada en la línea de alimentación, la bomba de alimentación puede ser seleccionada para operación intermitente o continua dependiendo de las especificaciones. Es improbable que una caldera de tubos de agua sea proporcionada con un simple switch para operación intermitente de la bomba de alimentación de agua.

Es importante saber si la bomba opera en forma intermitente o continua, debido a que la capacidad, presión de descarga y tipo de la bomba seleccionada dependerá de esta consideración.

Existen dos tipos de bombas disponibles por seleccionar, éstas son:

#### Bombas tipo turbina y bombas tipo centrífuga.

Como una regla general la bomba tipo turbina es frecuentemente seleccionada para operación intermitente y la bomba centrífuga para operación continua.

Esto no implica que una bomba tipo turbina no pueda ser usada para operación continua, o que una tipo centrífuga no pueda ser usada para operación intermitente, sin embargo el criterio de selección será diferente.

Si usted encuentra ciertas especificaciones o ciertas aplicaciones especiales, reserve este procedimiento y consulte con el fabricante antes de hacer la selección.

2.- La temperatura del agua inicialmente manejada por la bomba es también un criterio importante en la selección de ella usualmente están disponibles bombas standard con rangos de temperatura entre aproximadamente 100°C (212°F) a 104°C (220°F), mientras que otras bombas son disponibles para temperaturas hasta de 121°C (250°F) o mayores con entriamiento de agua externo. Si la temperatura es mayor de 121°C (250°F) será necesario consultar al fabricante.

3.- Todas las bombas tipo turbina deben ser seleccionadas para una capacidad de 2.0 veces la capacidad de evaporación de la caldera para la que se va a utilizar, a menos que las especificaciones requieran valores más altos.

Las bombas centrífugas (operación continua) deben ser seleccionadas sobre la base de 1.15 veces la capacidad de evaporación de la caldera. Aumentar a este factor una determinada cantidad de litros (dependiendo de la bomba y el tamaño del motor seleccionado) requeridos para

el orificio de By-pass.

4.— La presión de descarga de la bomba es otro principio el cual requiere cuidadosa consideración. Si la tubería en la línea de descarga de la bomba esta conectada directamente a la caldera (sin válvula motorizada o regulador de alimentación de agua en ésta línea) solamente es necesario considerar la presión de operación de la caldera y las pérdidas a través de la línea para determinar la presión de descarga en la bomba.

La selección de la presión de descarga en bombas tipo turbina es menos crítica que en bombas centrífugas.

Se debe tener la seguridad de que la presión de descarga seleccionada es siempre mayor que la presión de operación de la caldera. Generalmente de 0.35 a 1.76 Kg/cm<sup>2</sup> (5 lbs/pulg<sup>2</sup> a 25 lbs/pulg<sup>2</sup>) por arriba de la presión de operación de la caldera es una buena consideración.

Si una válvula motorizada es requerida en la línea de descarga de la bomba aumente 1.41 kg/cm<sup>2</sup> ó 1.76 kg/cm<sup>2</sup> (20 lbs/pulg<sup>2</sup> ó 25 lbs/pulg<sup>2</sup>) a la presión de operación de la caldera para determinar correctamente la presión de descarga de la bomba.

Como se ha mencionado, prácticamente todas las calderas de tubos de agua están equipadas con reguladores de agua de alimentación, por lo tanto la selección de la presión de descarga de la bomba centrífuga debe ser hecha sobre la base de aumentar 1.76 kg/cm<sup>2</sup> ó 2.11 kg/cm<sup>2</sup> (25 lbs/pulg<sup>2</sup> ó 30 lbs/pulg<sup>2</sup>) a la presión de operación de la caldera, quedando también consideradas las pérdidas a través de la línea dentro de este incremento.

En algunos casos será conveniente mostrar dos selecciones de bombas para la misma capacidad y presión de descarga. Cuando existan dos selecciones, usted podrá preferir cualquiera de ellas de acuerdo a las condiciones de trabajo tales como la carga neta de succión positiva (NPSH), presión y capacidad del motor. Usualmente a menor NPSH en las bombas, se tendrán mayores requerimientos de capacidad, y a mayor NPSH se tendrá menor requerimiento de capacidad.

5.— El quinto criterio para la correcta selección de una bomba es la carga neta de succión positiva (NPSH). Cada diseño de bomba tiene un cierto requerimiento de NPSH.

Esta es la cantidad de líquido en cm. (pies) que deberá ser presentada en la succión de la bomba para prevenir la cavitación y para proporcionar una apropiada operación.

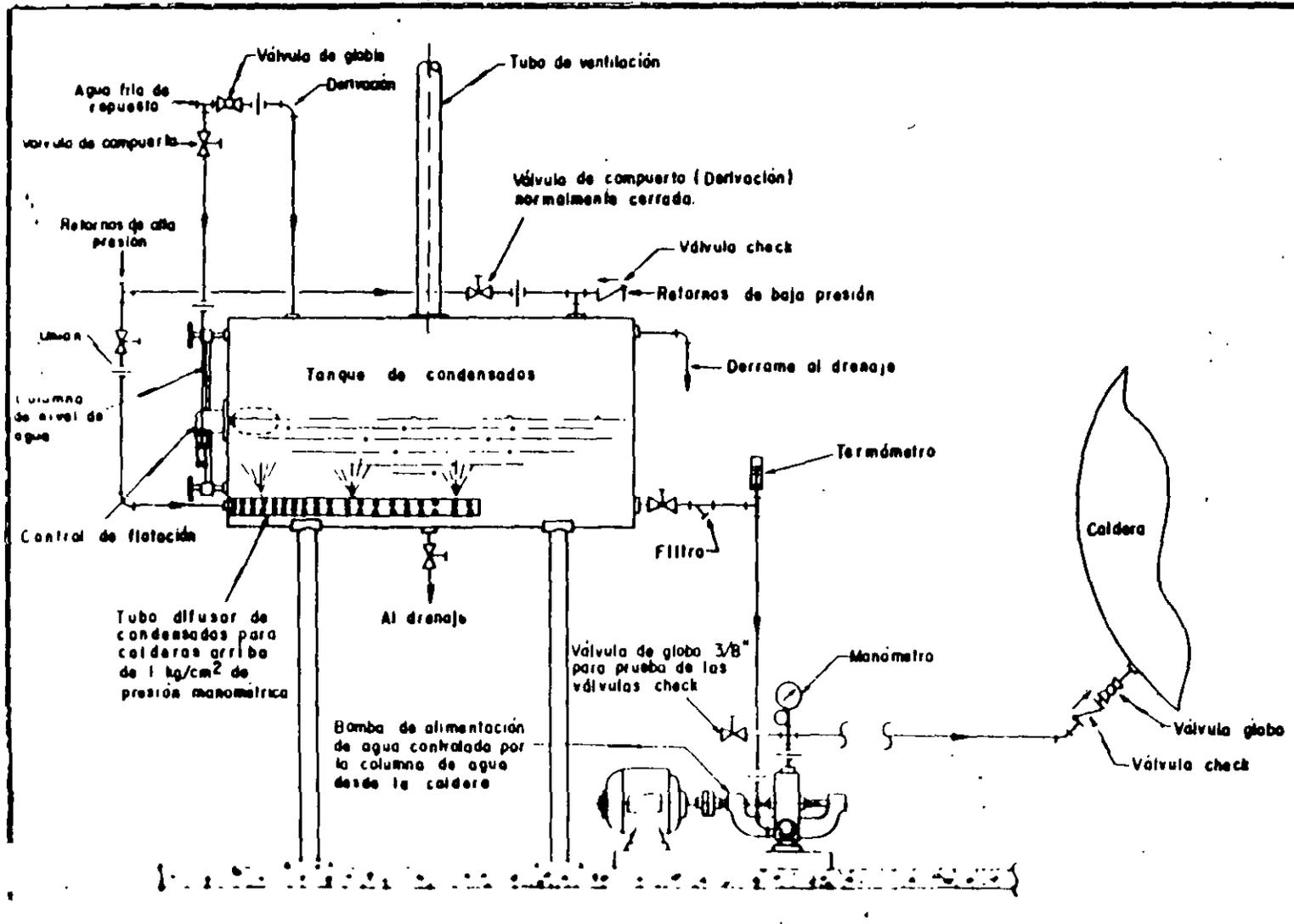
Es recomendable hacer una selección que tenga los más bajos requerimientos de NPSH posibles. Para cumplir con esto deben ser aceptadas una serie de limitaciones.

Usualmente una selección con un requerimiento de bajo NPSH, establece una bomba grande y consecuentemente requiere un motor de gran capacidad. Sin embargo hablando generalmente, es más importante mantener la altura total a un mínimo tal, que seleccionar una bomba con un elevado NPSH.

Las figuras 1 SAA y 2 SAA ilustran arreglos típicos de tanques de condensados y bomba de agua de alimentación.

La figura 3 SAA representa un sistema de desaereación Spraymaster y finalmente la figura 4 SAA ilustra cinco formas diferentes de arreglos en sistemas de desaereación.

Tipico arreglo del tanque de condensados con tapas planas y bomba de agua de alimentación.



## Arreglo de tanque de condensados con tapas abombadas y bomba de agua de alimentación.

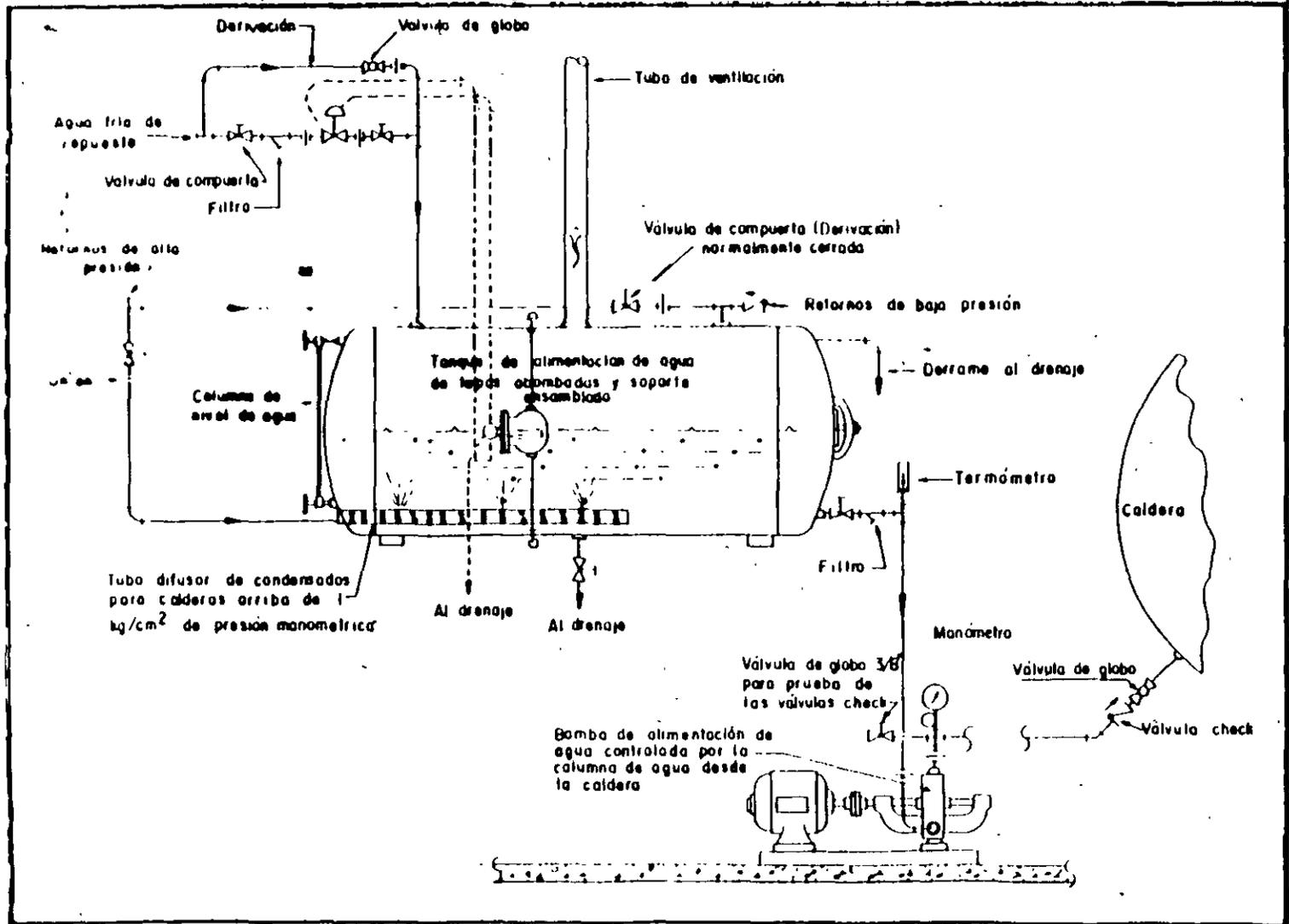
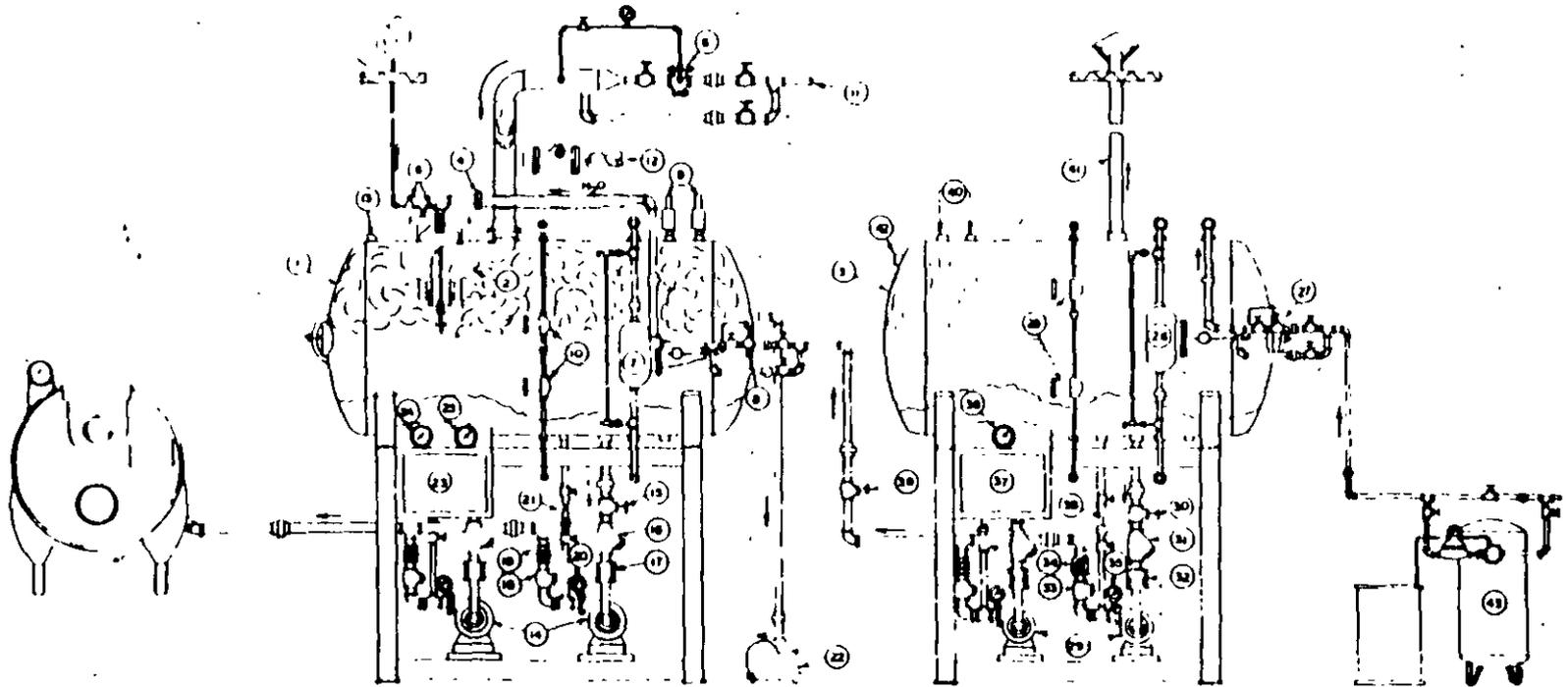


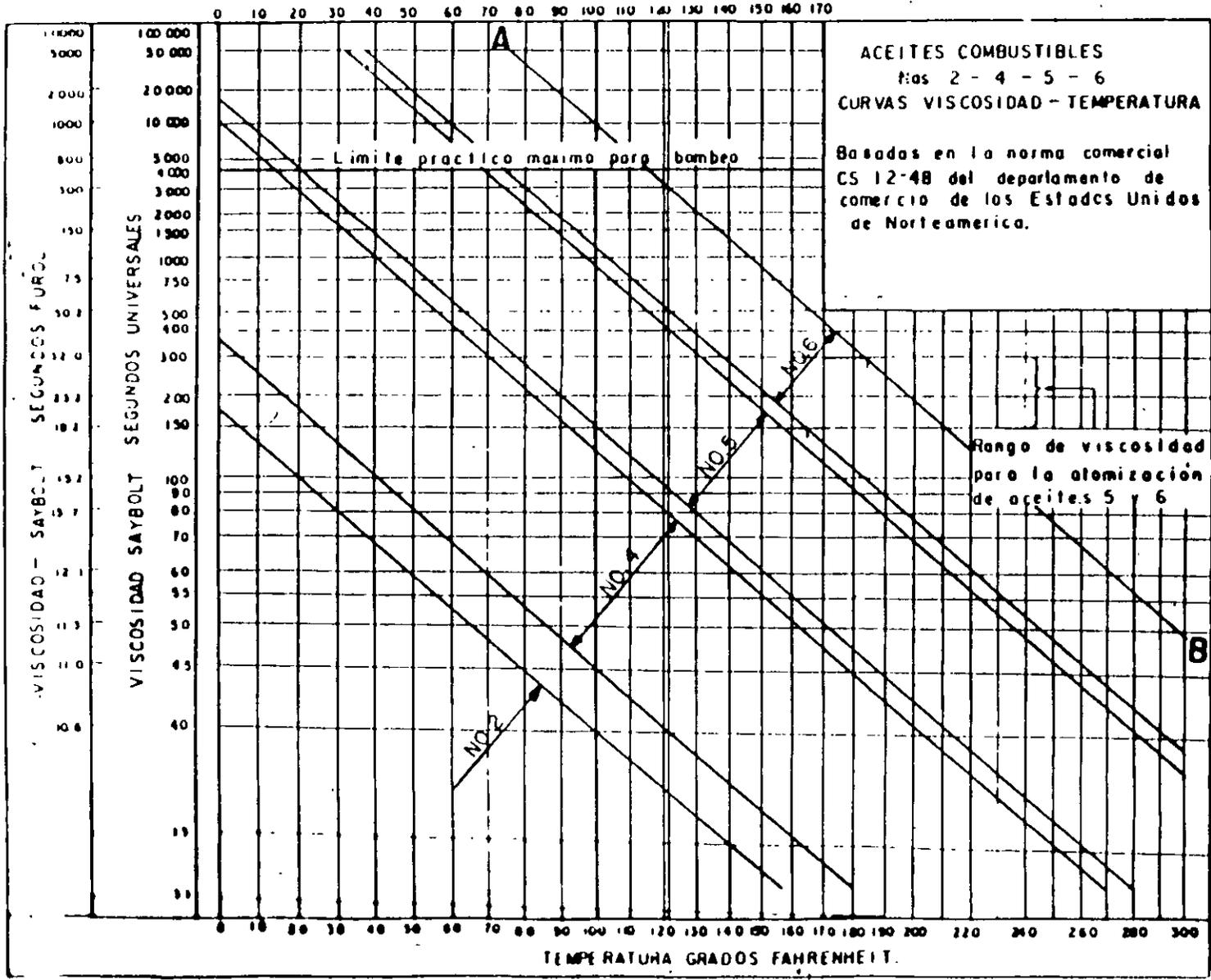
Fig. 2 SAA

10

## Deareador Spraymaster. Sistema de dos tanques



- (1) Tanque de almacenamiento del deareador (2) Deareador Spraymaster (3) Tanque igualador (4) Entrada de agua al deareador (5) Control de ventos, manual y automatico (6) Válvula reductora de presión de vapor (7) Flotador del nivel de agua (8) Control de la válvula de entrada al deareador (9) Válvulas de alivio (10) Alarmas (11) Suministro de vapor (12) Suministro de vapor.  
 (13) Retornos (vuelta de una temperatura de 227 °F) (14) Bombas de alimentación a la caldera (15) B.F.P. Válvula de paro y arranque en la succión (Una por bomba) (16) B.F.P. Filtro en la succión (Una por bomba) (17) B.F.P. Cople flexible en la succión (Una por bomba) (18) B.F.P. Válvula check en la descarga (Una por bomba) (19) B.F.P. Válvula de paro y arranque en la descarga (Una por bomba) (20) Manómetro. Presión de descarga (Una por bomba) (21) B.F.P. Orificio de derivación (Una por bomba, requerido en bombas con operación continua) (22) Derrame al drenaje (23) Panel de control (24) Manómetro (25) Termómetro (26) Flotador del nivel de agua (27) Válvula de suministro de agua (28) Alarmas (29) Bombas de transferencia (30) Válvula de paro y arranque en la succión (Una por bomba) (31) Filtro en la succión de las bombas de transferencia (Una por bomba) (32) Cople flexible (33) Válvula check (Una por bomba) (34) Válvula de paro y arranque en la succión (Una por bomba) (35) Manómetro (Una por bomba) (36) Orificio de derivación (37) Panel de control (38) Manómetro (39) Válvula de control de la bomba de transferencia (40) Retorno de condensado (41) Derrame al drenaje (42) Derrame al drenaje (43) Subcalentador de agua (cuando es requerido)



12

## SISTEMAS DE ALIMENTACION DE GAS

### Recomendaciones.—

Un regulador de presión de gas debe ser instalado en la tubería de cada caldera. Las siguientes recomendaciones deben ser consideradas en la selección de un regulador.

- a) El regulador debe tener un rango de presión equivalente al del sistema de distribución.
- b) Capacidad.— La capacidad del regulador debe ser 15% más de la cantidad de gas que puede quemar la caldera para que dé una regulación adecuada.
- c) Ajuste del resorte.— El resorte deberá ser apropiado para ajustarse en un rango del 50% abajo y 50% arriba de la presión de regulación seleccionada.
- d) Precisión en cierre instantáneo.— El regulador debe incluir como característica de fabricación el conservar la presión regulada entre la caldera y éste, y no permitir que se eleve en lo más mínimo la presión cuando se interrumpe el flujo de gas.

Como una observación en la presión de salida (entre el regulador y la caldera) por la elevación cuando no hay flujo de gas.

e) Regulador en paralelo.— Este tipo de instalación podrá ser usada si los requerimientos de volumen de gas son muy grandes y si la caída de presión deberá ser reducida a un mínimo.

f) Regulador en serie.— Este tipo de instalación podrá ser usado si la presión del gas disponible es de 5, 10 o 20 lbs/pulg<sup>2</sup> man., dependiendo de las características del regulador. Un regulador reducirá la presión a 2 o 3 lbs/pulg<sup>2</sup> man. Y el segundo regulador reducirá la presión necesaria de quemador.

g) Ubicación del regulador.— Por ambos lados del regulador deberá haber tubería recta para asegurar una regulación adecuada.

Esto es particularmente importante en los reguladores del piloto.

El regulador puede ser localizado cerca de la conexión de gas, pero con 2 o 3 pies de tubería recta del lado de alta presión.

Nota: Consultar al fabricante. El estudiará su aplicación y le recomendará el equipo adecuado para su trabajo.

### Coladores y compresores de gas.—

Colador de gas.— Es recomendable el uso de un colador para proteger el regulador y otros equipos de control contra alguna impureza que pueda ir a la línea de gas.

Compresor de gas.— Si el gasoducto no tiene la suficiente presión de gas para los requerimientos de su caldera deberá utilizar un compresor de gas "Booster".

Este compresor de gas incrementará la presión disponible a una presión satisfactoria.

### Precaución.—

El uso de un compresor de gas deberá ser discutido antes de efectuada la instalación con la compañía distribuidora de gas.

Es recomendable consultar al representante de compresores en su ciudad para una mejor aplicación del equipo en su sistema.

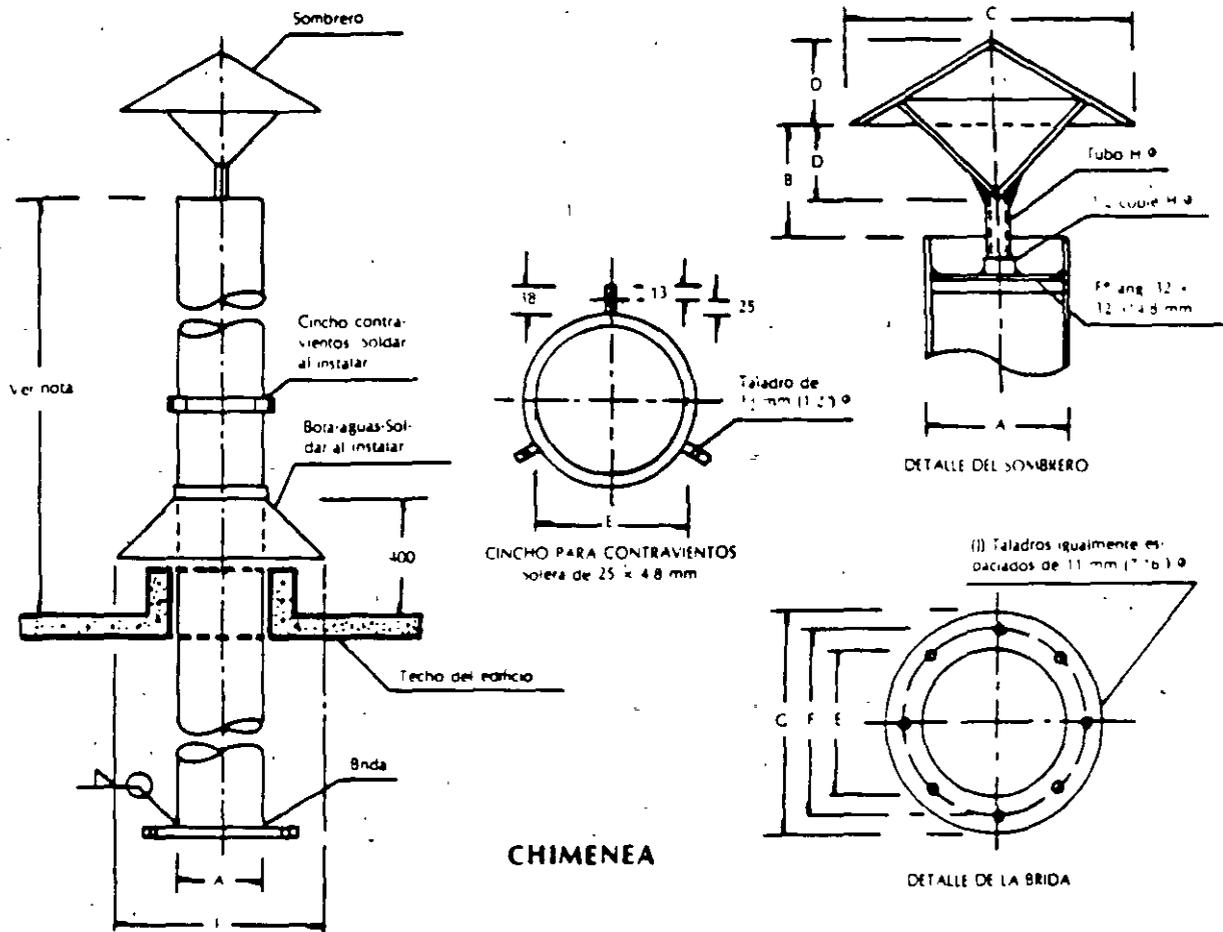
## ARREGLO TIPICO DE TUBERIAS DE GAS EN UNA CALDERA

Un tren estandar de gas incluye:

- (1) Válvula primaria de corte instantáneo —

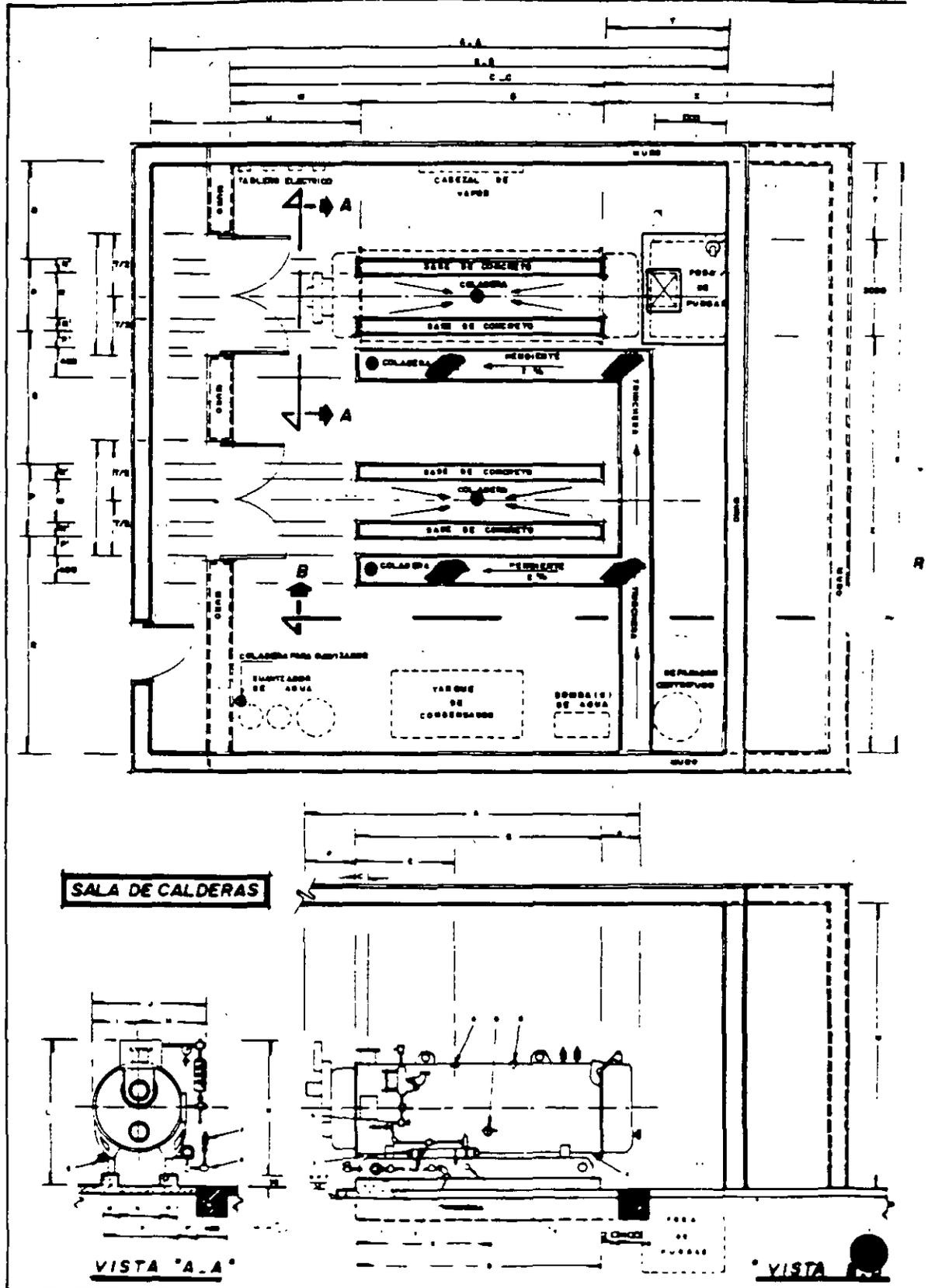
Una segunda válvula, podrá ser agregada, si se desea.

Una pierna de escurrimientos o cavidad de impurezas, deberá ser instalada, justamente antes del regulador de presión para proteger el equipo de control.



Capacidad de Placas la Caldera (señal)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	G (mm)	H (mm)	I (mm)	J (mm)
25	151 (6)	171 (6)	181 (6)	191 (6)	201 (6)	211 (6)	221 (6)	231 (6)	241 (6)	251 (6)
30	171 (6)	191 (6)	201 (6)	211 (6)	221 (6)	231 (6)	241 (6)	251 (6)	261 (6)	271 (6)
35	191 (6)	211 (6)	221 (6)	231 (6)	241 (6)	251 (6)	261 (6)	271 (6)	281 (6)	291 (6)
40	211 (6)	231 (6)	241 (6)	251 (6)	261 (6)	271 (6)	281 (6)	291 (6)	301 (6)	311 (6)
45	231 (6)	251 (6)	261 (6)	271 (6)	281 (6)	291 (6)	301 (6)	311 (6)	321 (6)	331 (6)
50	251 (6)	271 (6)	281 (6)	291 (6)	301 (6)	311 (6)	321 (6)	331 (6)	341 (6)	351 (6)
55	271 (6)	291 (6)	301 (6)	311 (6)	321 (6)	331 (6)	341 (6)	351 (6)	361 (6)	371 (6)
60	291 (6)	311 (6)	321 (6)	331 (6)	341 (6)	351 (6)	361 (6)	371 (6)	381 (6)	391 (6)

NOTA: A: Ancho nominal de las placas de las calderas. B: Altura nominal de las placas de las calderas. C: Distancia nominal entre las placas de las calderas. D: Distancia nominal entre las placas de las calderas. E: Distancia nominal entre las placas de las calderas. F: Distancia nominal entre las placas de las calderas. G: Distancia nominal entre las placas de las calderas. H: Distancia nominal entre las placas de las calderas. I: Distancia nominal entre las placas de las calderas. J: Distancia nominal entre las placas de las calderas.



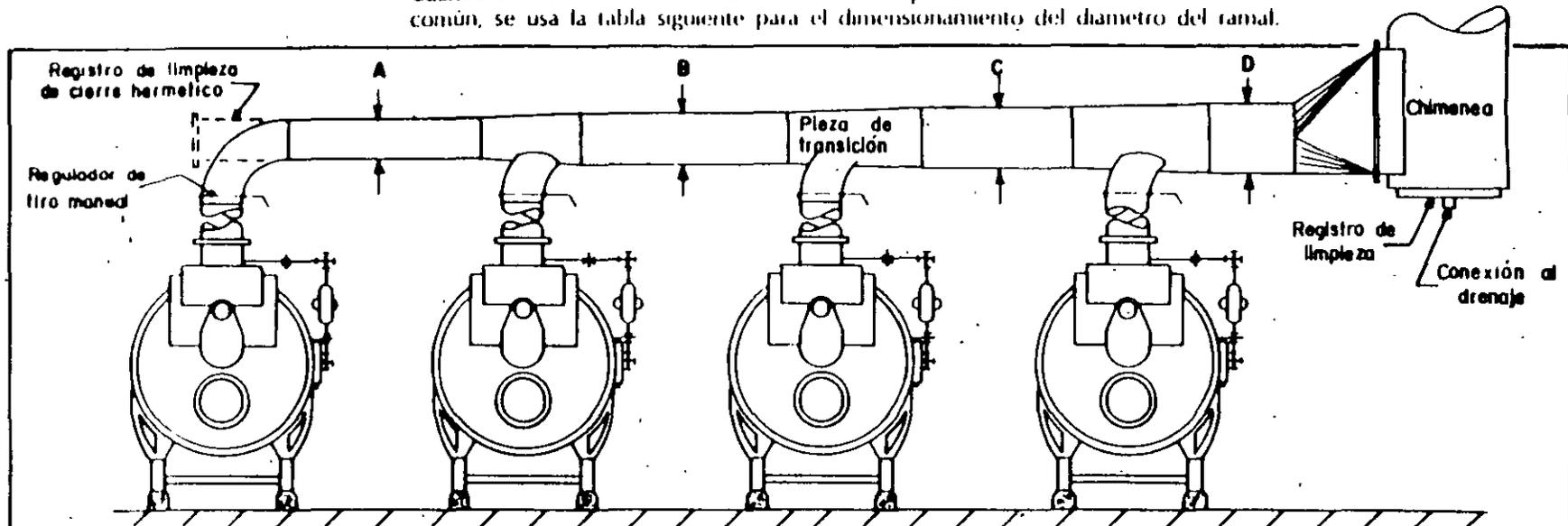
## RAMALES

a) Instalación de caldera única

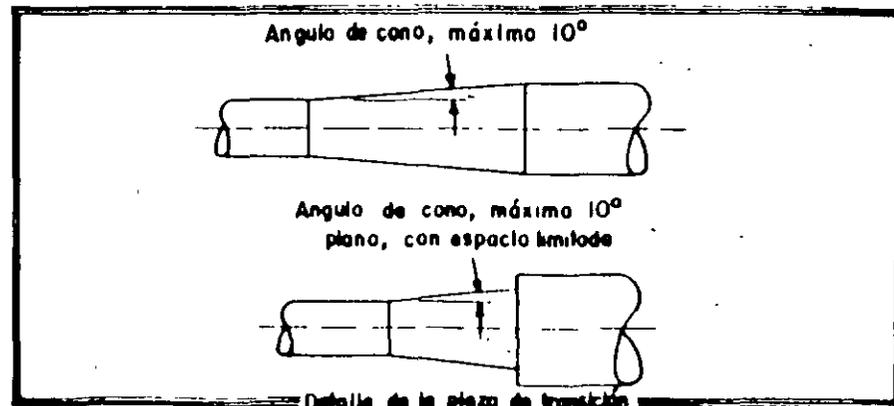
Se usa un ramal del mismo diámetro como el orificio de salida sobre la caldera.

b) Instalación múltiple de calderas

Cuando un número de calderas de la misma capacidad son conectadas a un ramal común, se usa la tabla siguiente para el dimensionamiento del diámetro del ramal.



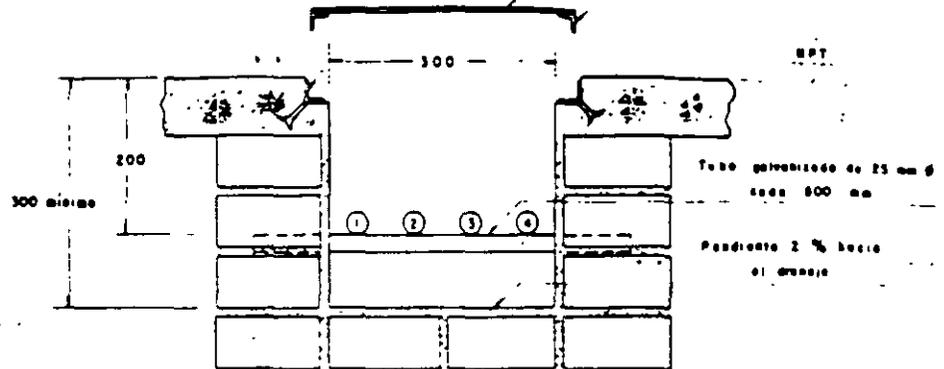
C C	Diámetro mínimo del canal (Pulgadas)			
	A (Pulg) Caldera	B (Pulg) 2 Calderas	C (Pulg) 3 Calderas	D (Pulg) 4 Calderas
15 20	6	8	9	9
40	8	10	11	12
60	10	12	14	15
100	12	15	17	18
125 - 200	16	20	22	24
250 - 350	20	25	28	30
400 - 600	24	30	33	36



1<sup>o</sup> ángulo corrido de 32 x 32  
x 3 mm (con cañal)

Lámina estirada  
o rejilla

1<sup>o</sup> ángulo en tramos de 800 mm,  
de 25 x 25 x 3 mm



- 1 - Alimentación de combustible a la(s) caldera(s)
- 2 - Retorno de combustible al tanque
- 3 - Tubos de escape de la(s) caldera(s)
- 4 - Alimentación de agua a la(s) caldera(s)

## DETALLE TRINCHERA

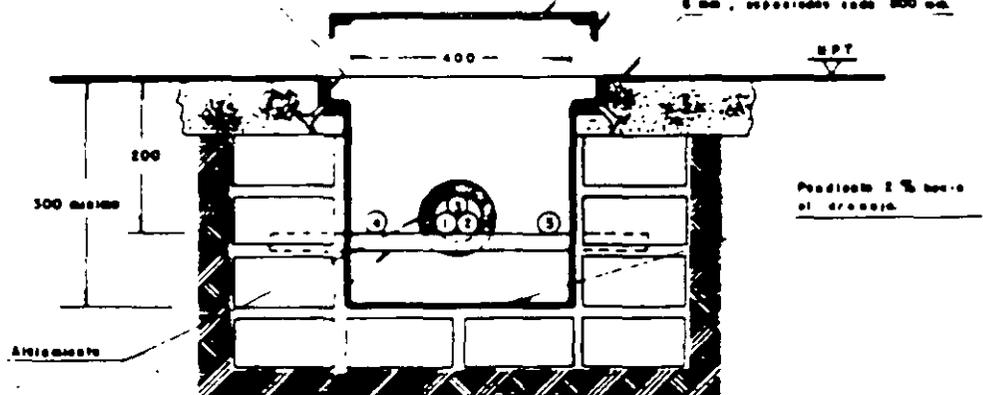
### DIESEL

1<sup>o</sup> ángulo en tramos de  
800 mm, de 25 x 25 x 3 mm

1<sup>o</sup> ángulo corrido de  
32 x 32 x 3 mm

Lámina estirada  
o rejilla

Acabos de cables de 51 x 75 x  
5 mm, espaciados cada 800 mm

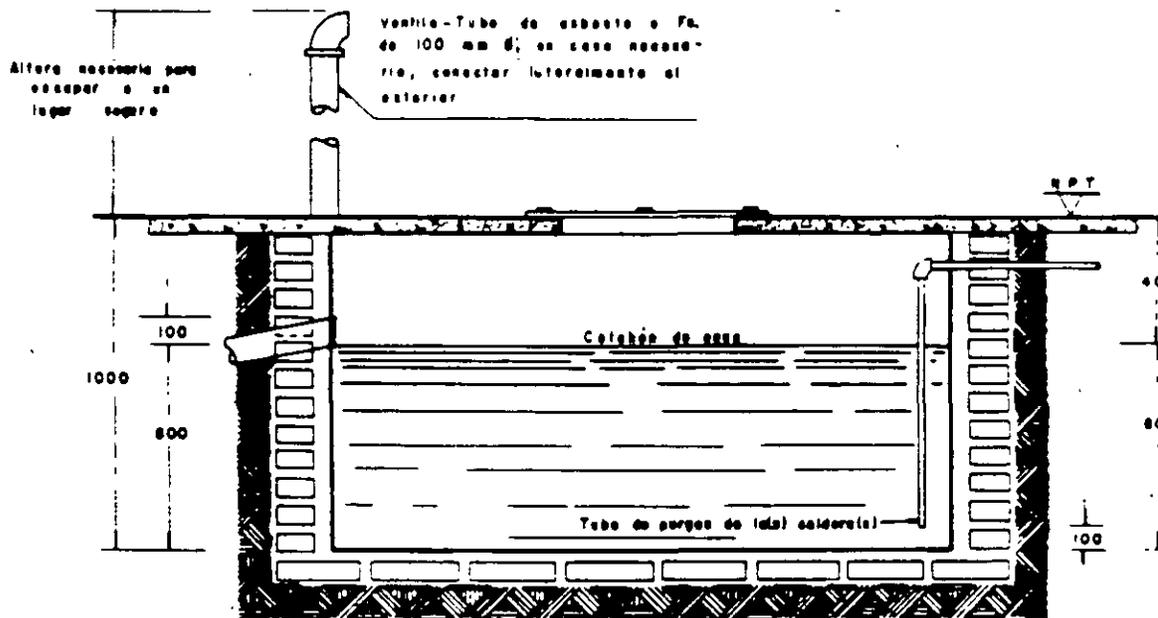
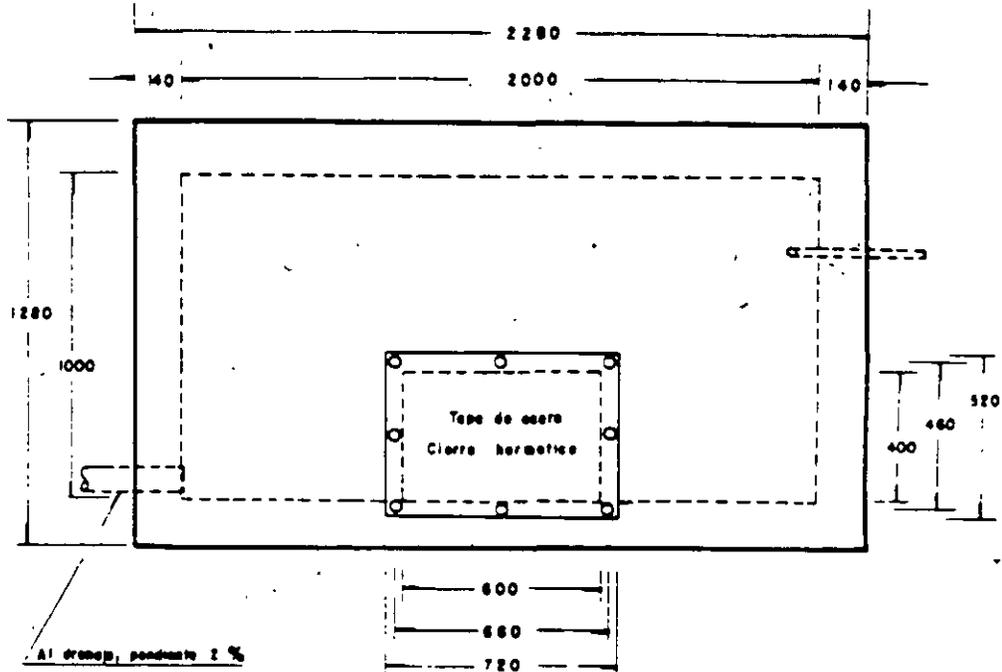


Tubo galvanizado de  
25 mm  $\phi$ , cada 800 mm.

- 1 - Alimentación de combustible a la(s) caldera(s).
- 2 - Retorno de combustible al tanque de almacenamiento.
- 3 - Tapa de escape al tanque de almacenamiento.
- 4 - Tubos de escape de la(s) caldera(s).
- 5 - Alimentación de agua a la(s) caldera(s).

## DETALLE TRINCHERA

### PETROLEO PESADO



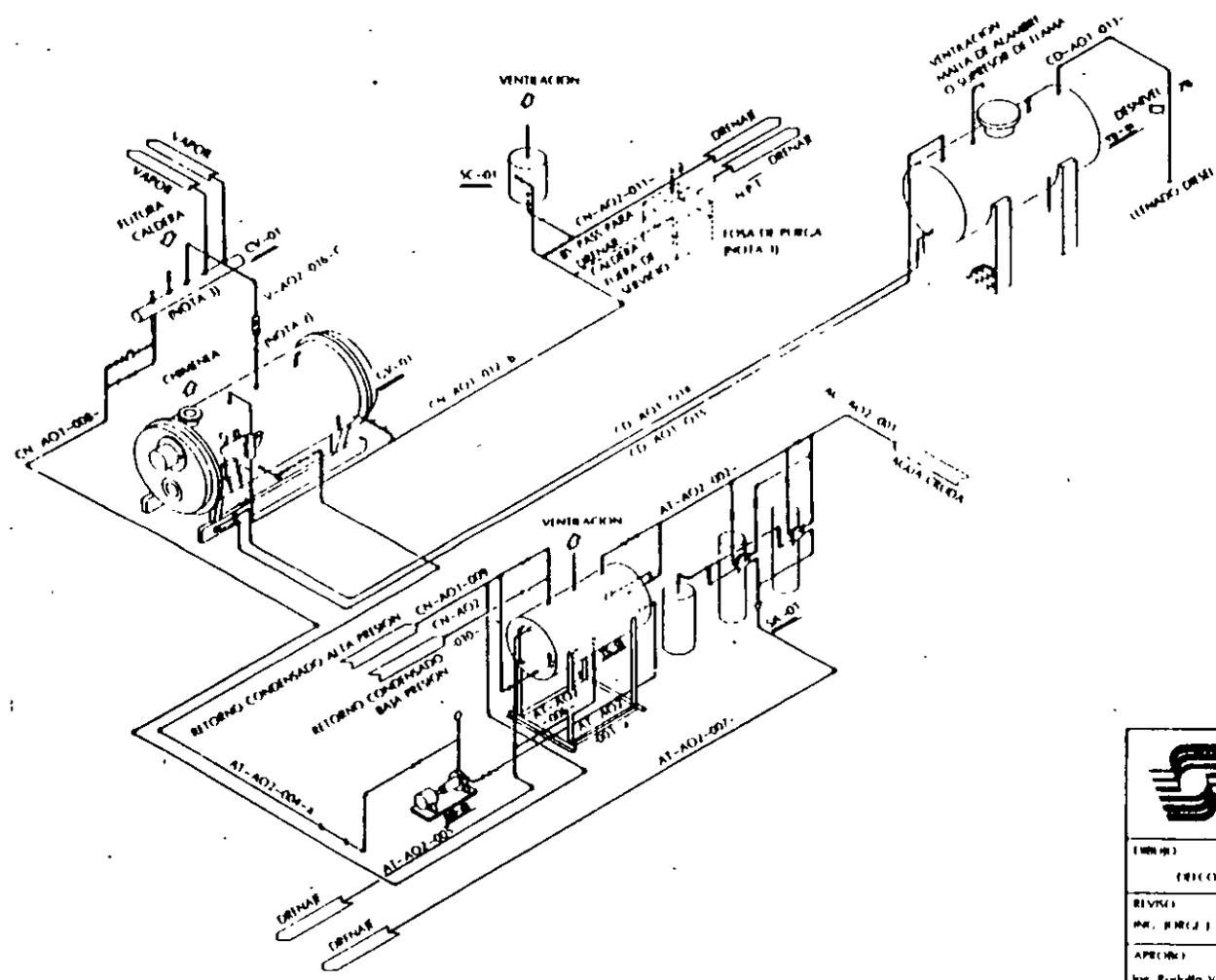
**FOSA DE PURGAS**



- 1- USAR SOLAMENTE TOSA DE PURGAS O SEPARADOR CENTRIFUGO SEGUN CONVENGA
- 2- VALVULAS DE GLOBO Y DE RETENCION PUEDEN SUSTITUIRSE POR UNA VALVULA STOP CHECK
- 3- EL DIAMETRO DEL CABEZAL DE VAPOR DEBERA SER TAL QUE SU AREA DE PASO SEA IGUAL O MAYOR A LA SUMA DE AREAS DE PASO DE TODAS LAS TUBERIAS QUE LE ENTREGUEN VAPOR
- 4- SE ENTIENDE POR BAJA PRESION A LA MENOR DE 1.05 KG/CM<sup>2</sup> Y ALTA PRESION A LA MAYOR QUE ESTA
- 5- VER ESPECIFICACIONES DE TUBERIAS EN EL PLANO 06 M20 60
- 6- LOS DIAMETROS DE LAS TUBERIAS NO INDICADAS DEBERAN SER IGUALES A LAS VALV Y CONEXIONES CORRESPONDIENTES
- 7- CONSIDERESE ESTE PLANO COMO GUIA DE INTERCONEXION LOS ACCESORIOS AQUÍ INDICADOS SON LOS MINIMOS REQUERIDOS POR LO TANTO UTILICE LOS QUE PARA SU INSTALACION SE REQUIERAN
- 8- PARA CASOS ESPECIALES O DUDAS EN SU INSTALACION, APOYESE EN SU AGENTE VENDEDOR, EL LE INDICARA EL CAMINO A SEGUIR

**SIMBOLOGIA DE TUBERIAS**

	TUBERIA ENDRA		VALV. DE GLOBO		VALV. DE STOP CHECK
	COBRO 90°		VALV. DE NEEDLE		VALV. DE GLOBO
	T		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA
	VALV. DE STOP CHECK		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA
	VALV. DE STOP CHECK		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA
	VALV. DE STOP CHECK		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA
	VALV. DE STOP CHECK		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA
	VALV. DE STOP CHECK		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA
	VALV. DE STOP CHECK		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA
	VALV. DE STOP CHECK		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA		VALV. DE GLOBO EN TUBERIA



DIAMETROS DE TUBERIAS	
TUBERIA ENDRAS	1.500
TUBERIA DE AGUA	2.000
TUBERIA	2.500
VALV. VAPOR	3.000

LISTA DE EQUIPOS	
CV-01	CALDERA
TC-01	TANQUE DE CONDENSADO
TD-01	TANQUE DE CONDENSADO
SA-01	SEPARADOR DE AGUA CALIENTA
CV-01	CABEZAL DE VAPOR
BT-01	BOMBA DE AGUA DE ALIMENTACION
SC-01	SEPARADOR CENTRIFUGO

**SEUNEC**  
Equipo Industrial SA de CV

PROYECTO EN

NO. DE SERIE

ELABORADO	ESTADIA	REVISADO
REVISADO	ACREDITADO	ELABORADO
APROBADO	FECHA	NO. DE PLANO
Ing. Eusebio Vazquez Sanchez      04/07/1988		

Capacidad de la Caldera	Placas del No	A mm(")	B mm(")	C mm(")	D mm(")	E mm(")	F mm(")	G mm(")	H mm(")	I mm(")	J mm(")
20	14	1521 61	1271 53	3051 23	761 31	156( 61/8)	200( 77/8)	232( 91/8)	19( 3/4)	301(11 5)	6
40	14	2031 83	1521 63	406(16)	1021 41	206( 81/8)	251( 97/8)	283(111/8)	19( 3/4)	500(200)	6
60	12	2541 101	2031 81	508(20)	1271 51	237(101/8)	302(117/8)	333(131/8)	19( 3/4)	632(25)	8
80-100	12	3051 121	2281 91	610(24)	1521 61	308(121/8)	352(137/8)	381( 15 )	19( 3/4)	762(30)	8
125-200	12	406(16)	305(12)	812(32)	203( 8)	410(161/8)	454(177/8)	486(191/8)	23( 1 )	1076(40)	12
250-350	12	508(20)	381(15)	1016(40)	254(10)	511(201/8)	556(217/8)	588( 23 )	32(11/4)	1270(50)	12
400-700	12	610(24)	457(18)	1219(48)	305(12)	612(241/8)	657(257/8)	686( 27 )	32(11/4)	1524(60)	16

NOTA. Altura mínima: 1250 mm., cuando no haya edificio cercano, o 3000 mm. del edificio más alto que se encuentre dentro del perímetro de 10 mts. alrededor de la chimenea.

### MONTAJE DE CALDERAS

#### Instalación de calderas tipo paquete. Tubos de humo.

En la práctica moderna de la ingeniería industrial, el objeto de la instalación de cualquier equipo, es obtener las óptimas condiciones de funcionamiento; es un hecho que ningún equipo es más bueno que la calidad de su instalación.

Para la instalación de una caldera es necesario considerar una serie de limitaciones y conocer perfectamente los requerimientos necesarios para una instalación de este tipo de equipo. Para esto es siempre recomendable consultar al fabricante del equipo.

De acuerdo a lo siguiente se mencionan los puntos fundamentales, en la instalación de una caldera.

- |              |         |                       |
|--------------|---------|-----------------------|
| AGUA         | CALDERA | VAPOR O AGUA CALIENTE |
| ELECTRICIDAD | PAQUETE | GASES DE COMBUSTION   |
| COMBUSTIBLE  |         | AGUA DE PURGAS O DE   |
| AIRE         |         | VALVULAS DE SEGURIDAD |

#### Cuarto de calderas.-

Para la determinación de las dimensiones necesarias del lugar de instalación existen una serie de limitaciones:

- Limitaciones legales.
- Limitaciones técnicas del equipo
- Limitaciones físicas del lugar de instalación.
- Limitaciones económicas
- Limitaciones de orden práctico.
- Limitaciones de servicio.
- Limitaciones de orden legal.- Estas limitaciones comprenden todas aquellas que son especificadas en Reglamentos editados por asociaciones y por las autoridades civiles correspondientes.

En la ciudad de México el principal reglamento es el Reglamento para la inspección de generadores de vapor y recipientes sujetos a presión el cual es editado por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (ver sección de Reglamentos). Siendo el capítulo VI, el que hace referencia a la instalación.

Este reglamento es de distribución gratuita y fácilmente obtenible en la STYPS.

Limitaciones técnicas del equipo.- Generalmente se refieren a los requerimientos para el mantenimiento o reemplazo de partes, para lo cual se requieren ciertos espacios libres. Estos datos los proporciona el fabricante de la caldera y equipo.

En las calderas Cleaver Brooks, el principal requerimiento es el de poder realizar la extracción de los tubos o fluses para darle un mantenimiento adecuado a la caldera. Para realizar esto existe criterios (ver sección el cuarto de calderas).

Limitaciones físicas del lugar de instalación.- Estas limitaciones hacen referencia a las limitaciones que en un momento dado tenga el espacio disponible para realizar la instalación.

Es conveniente para cada caso real, ver todas las conveniencias, factores y limitaciones, y de acuerdo a esto, tomar una solución adecuada.

**Limitaciones Económicas.**— Son las que nos obligan a tener la instalación con costo mínimo. Intervienen diversos factores:

Tener a la caldera lo más cerca posible del lugar donde se va a utilizar el vapor.

Aunado con esto, está también el tener el tanque de almacenamiento de combustible lo más cerca posible. Esto es para que las líneas de suministro tanto de vapor, como de combustible, sean lo más cortas posibles.

En conclusión, la determinación, de si la instalación va a ser más cerca y más barata, va a depender de la localización del cuarto de calderas y de la facilidad de suministro de combustible, de agua, y de electricidad.

**Limitaciones prácticas.**— Son orientadas para tener facilidad de realizar inspecciones de la caldera, así como también realizar un buen mantenimiento de todo el equipo.

**Limitaciones de servicio.**— Considerar el equipo de tratamiento de agua. (Obtenga una muestra o análisis de su agua disponible y envíela a un consultor en tratamiento de agua. El le hará las recomendaciones adecuadas).

Para la obtención de una correcta instalación es siempre preferible proponer y obtener en su caso, el espacio que se considere más favorable tomando como base el reglamento de instalación de calderas y las limitaciones del propio fabricante del equipo. En algunos casos, como en sustitución o ampliación el espacio se proporciona de antemano y se hace necesario sacrificar comodidad o rapidez en el mantenimiento del equipo. Situación que es definitivamente no recomendable.

#### **Abastecimiento de combustible.**—

El almacenamiento del combustible líquido, generalmente se hace en tanques cilíndricos, los cuales están al nivel del piso o por debajo de él.

Los tanques deben contar con registros pasa-hombre para limpieza y mantenimiento, así como también con los coples necesarios para llenado, ventilación, medición, extracción, retorno y purga. Cuando los tanques son subterráneos, es conveniente acondicionar el lugar para inspecciones periódicas.

Los diámetros de las líneas de succión y retorno, juegan un papel muy importante en la vida de la bomba de combustible, pues de ellas depende las restricciones que se le impongan a la bomba de combustible. (ver sección de: Alimentación de Combustible. Dibujos tanques de combustible)

#### **Abastecimiento de agua:**

Para este objeto siempre es conveniente tener un recipiente, el cual sirva para recibir

- a) Los retornos de condensados de alta y baja presión (si los hay).
- b) Mantener una reserva mínima de agua suficiente para sostener una caldera en operación durante 20 minutos.

Ejemplo: Determinar el volumen del tanque de condensados para una caldera de 100 CC. Para satisfacer la demanda de agua de 1 CC durante un minuto, se requieren 0.262 litros (0.069 galones).

Para 20 minutos y 100 C. C., se requerirán:  $0.262 \times 20 \times 100 = 524$  Litros.

Por lo tanto la capacidad mínima del tanque de condensados deberá ser de 524 litros. Generalmente las dimensiones de los tanques de condensados se elijen de acuerdo con las dimensiones económicas para el mejor aprovechamiento de las laminas con que se construyen, tomando en cuenta como límite inferior, el valor de la demanda de la caldera en 20 minutos.

El tanque para condensados debe incluir lo siguiente: tubo para ventilación de amplio diámetro control de nivel o flotación, bocas de admisión para condensados de alta o baja presión, tubo de succión en lo más profundo del seno del agua, para los retornos de alta presión, cristal de nivel, prueba, bocas para la salida del agua, para purga en el fondo y de derrame en la parte superior.

La conexión de estos tanques de condensados a la bomba de alimentación se debe hacer lo más corta posible, utilizando un diámetro cuando menos igual al del puerto de la bomba de alimentación. Nunca deberá reducirse este diámetro.

El filtro de la bomba de agua siempre se coloca en la línea de succión lo más cerca posible a la bomba, instalándolo en tal forma que se le pueda dar servicio al mismo con facilidad.

El termómetro para el agua, puede ir instalado en el tanque de condensados o bien en la línea de succión; éste nos indica la temperatura del agua. Aún cuando las bombas de alimentación pueden inyectar el agua a cierta temperatura, es conveniente tomar en cuenta ésta para elevar el tanque de condensados y producir así una carga positiva en la succión y evitar la evaporación del agua al funcionar la bomba.

Se sugieren las siguientes alturas de los tanques de condensados con respecto a la línea de centros de la bomba cuando la temperatura de agua exceda a 82°C. (180°F).

Temperatura en °C	Altura en m.
82 - 93	1.80 o más
93 - 96	2.40 o más
96 - 100	3.90 o más

La línea de alimentación de agua a la caldera deberá ser del mismo diámetro en la descarga de la bomba; en ella se instalará una válvula de globo lo más cercano a la caldera y junto a ésta, dos válvulas de retención (Checks). (Ver sección. Alimentación de Agua. Dibujo de un tanque de condensados)

#### Abastecimiento de energía eléctrica.—

Es casi un hecho general que las calderas pequeñas y de mediana capacidad tengan incorporadas las siguientes cargas eléctricas:

- Motor para el ventilador.
- Motor para la bomba de agua.
- Motor para la bomba de combustible (en calderas de mediana capacidad, más de 100 CC)
- Circuito de control.

Todos los motores deberán estar protegidos eléctricamente contra sobrecargas y cortocircuitos. Los interruptores se colocarán en un tablero adecuado.

No olvidar que el circuito de control a 100 Volts debe alimentarse con un transformador especial de baja capacidad. (500 a 1000 watts)

Para el correcto funcionamiento del equipo eléctrico, es conveniente que el voltaje se mantenga lo más constante posible. Esto es de vital importancia para el circuito de control, el cual no admite variaciones en  $\pm 10\%$  de los 110 Volts nominales.

Es indispensable que los controles eléctricos se encuentren protegidos contra el polvo, el calor y la humedad.

En general la instalación debe reunir los requerimientos del Reglamento de Instalaciones Eléctricas (Sección Eléctrica).

#### Chimeneas.—

El propósito principal de las chimeneas en las calderas de tiro forzado es el de llevar los gases hasta un lugar seguro. Este tipo de calderas no requieren tiro en la chimenea.

El diámetro de la chimenea debe ser igual al de la salida en la caldera. En las instalaciones múltiples, si el edificio lo permite, deberán usarse chimeneas individuales.

Las chimeneas serán fabricadas con laminas de un espesor mínimo de 2.5 mm. (No. 12) y en caso de ser inaccesible la chimenea, deberá ser fabricada de material no corrosivo.

Toda chimenea deberá tener un sombrero en la salida.

La condensación en una chimenea variara de acuerdo con el tipo de combustible usado y la temperatura de la chimenea; la temperatura de los gases de combustión que abandonan la caldera es de 52°C mas alta que la temperatura del agua dentro de la caldera.

Las condensaciones en la chimenea suceden con mayor frecuencia en los trabajos de calefacción en donde las cargas son ligeras y el encendido frecuente, causando la condensación de los gases en las chimeneas y ductos.

Con el objeto de disminuir la condensación en la chimenea es necesario:

- Seleccionar la caldera lo más cercana a la carga real del sistema, evitando el uso de una caldera de mayor capacidad esto es, caldera de sobra

b) Tómese en cuenta que las chimeneas de mampostería mantienen mejor el calor que las de lámina metálica.

c) Si la chimenea es metálica, aíslese para disminuir las pérdidas de calor.

d) Siempre que sea posible úsese una chimenea con salida lateral para evitar que las condensaciones penetren en la caldera.

Las calderas pueden soportar una carga vertical de chimenea hasta de 950 Kg. Este valor debe incluir el efecto del viento y vientos que sujetan la chimenea. (ver dibujos de chimeneas).

#### **Purgas.—**

**Purgas de fondo.—** En las calderas de vapor a alta presión generalmente se usan dos válvulas para este propósito, una es de cierre rápido colocada en la línea de purgas lo más cercano posible a la caldera y otra de cierre lento después de aquélla.

Algunas veces se instalan dos válvulas de cierre rápido en sendas descargas inferiores de la caldera, conectándose posteriormente ambas al drenaje a través de la válvula de cierre lento.

Todas las líneas de purgas como son las de:

La columna de nivel de agua, drenaje del inyector de agua y purgas de fondo, se deben descargar a un tanque de purgas con derrame al drenaje y un amplio tubo de ventilación conectado a la atmósfera o en su defecto a una fosa del mampostería, la cual debe contar con derrame al drenaje, tubo de ventilación y agujero para inspección y limpieza.

#### **Válvulas de seguridad.—**

Las válvulas de seguridad, que juegan un importante papel en la seguridad humana y del equipo, rara vez se les presta la atención debida.

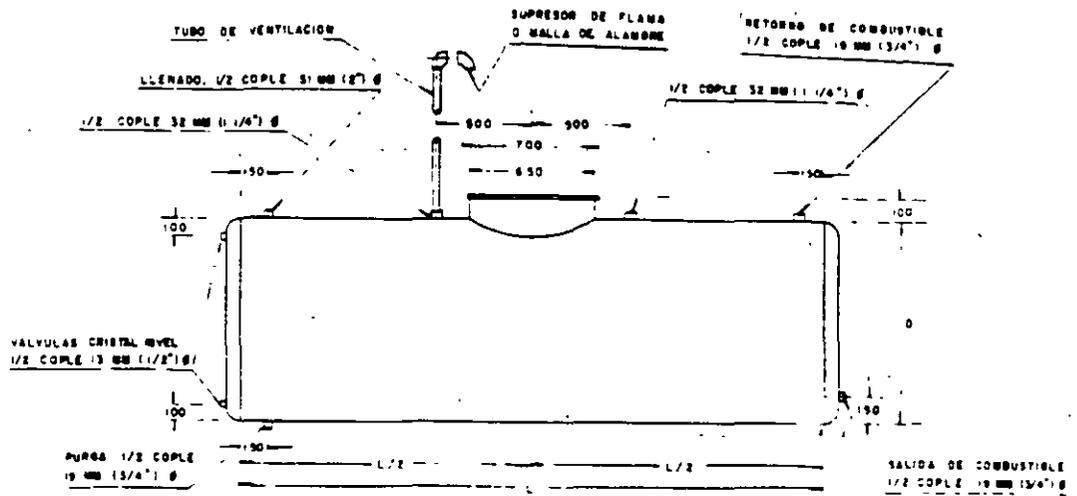
De su correcta instalación dependerá en gran parte el buen funcionamiento de las mismas. Es de recomendarse los siguientes cuidados:

a) No usar demasiado compuesto (permatex) en la rosca de entrada, éste puede ir a parar al asiento.

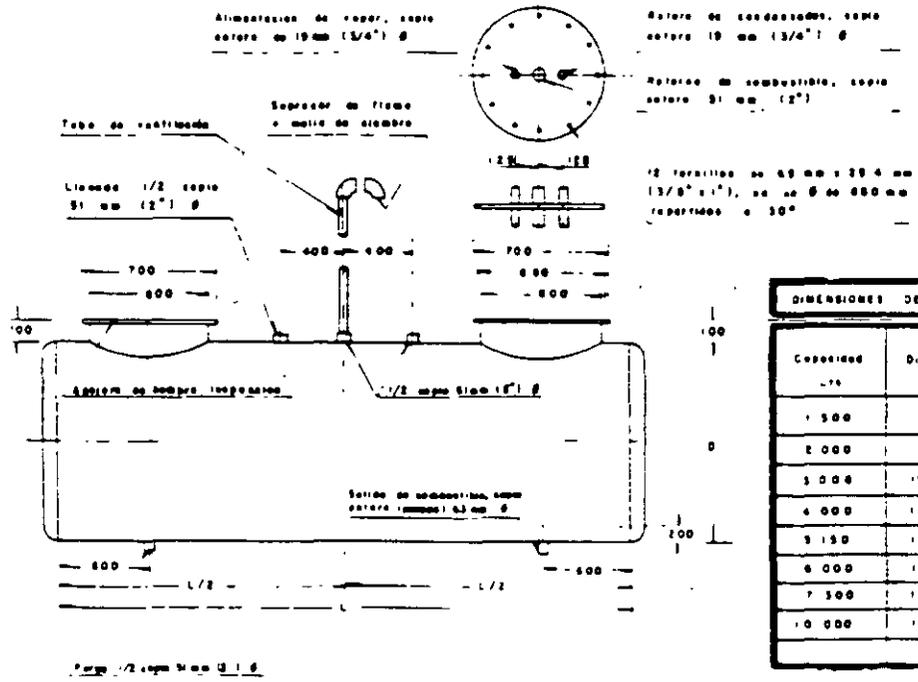
b) Nunca colocar las válvulas de seguridad con la ayuda de llave para tubo (Stillson) y menos usar el cuerpo de la válvula para hacer el apriete. Esto distorsiona el cuerpo de la válvula.

Para la colocación y apriete debe usarse una inglesa o llave perico.

c) Sobre la válvula de seguridad, no debe descansar el peso de la tubería de escape, debe usarse tubería suspendida independientemente.

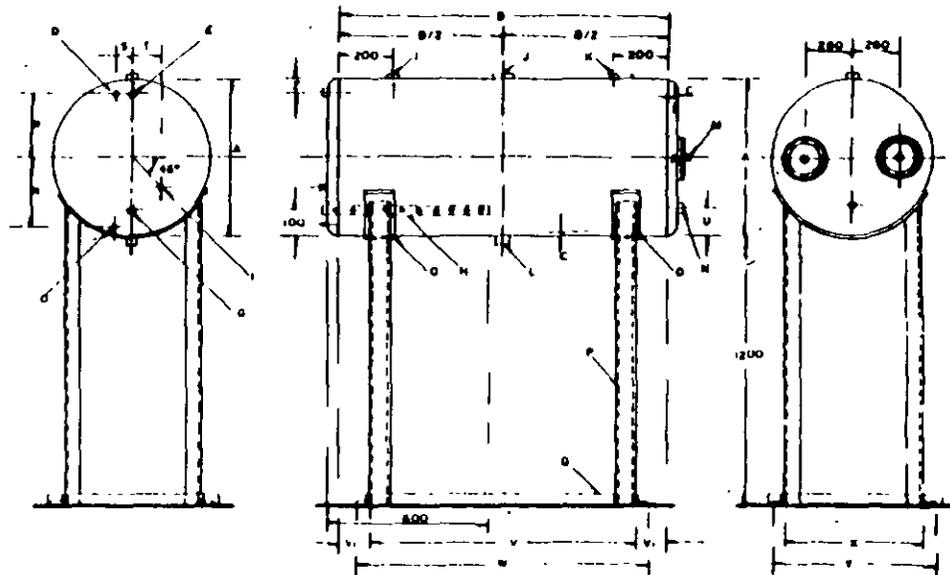


### TANQUE DE COMBUSTIBLE DIESEL



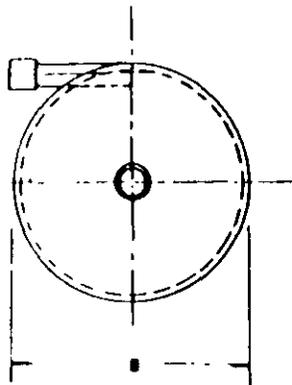
DIMENSIONES DEL TANQUE DE COMBUSTIBLE			
Capacidad Lts	Ø mm	L mm	Calibre mm
1 500	870	2 440	4
2 000	960	2 740	4
3 000	1 060	3 600	4
4 000	1 250	4 300	4
5 150	1 530	5 600	4
6 000	1 550	6 270	4
7 500	1 440	6 570	4
10 000	1 540	9 490	12 mm (1/2")

### TANQUE DE COMBUSTIBLE PESADO

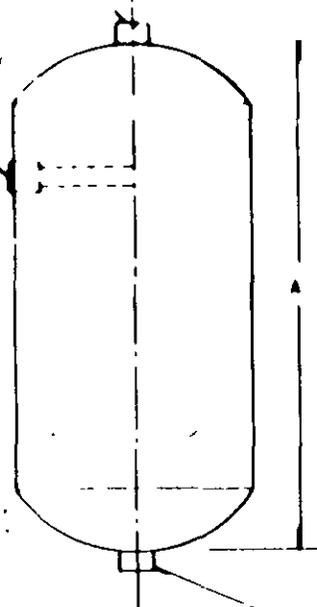


DIMENSIONES DEL TANQUE PARA RETORNO DE CONDENSADOS											
Capacidad en Cámara Condensadora	250, 300 y 350	400 y 500	600 y 700		250, 300 y 350	400 y 500	600 y 700		250, 300 y 350	400 y 500	600 y 700
Capacidad del tanque en lit.	1850	2650	3700		1850	2650	3700		1850	2650	3700
A Diámetro	1080	1080	1380	J Retorno condensado agua fría, 1/2" c	51 (2")	51 (2")	51 (2")	R Dimensiones	431	431	430
B Longitud	2088	3080	3080	K Vaciado, 1/2" cople std	63 (2 1/2")	63 (2 1/2")	63 (2 1/2")	S Dim	280	350	300
C Altura mínima	52 (1 7/8")	52 (1 7/8")	52 (1 7/8")	L Almacenamiento directo agua, 1/2" cople s	18 (3/4")	18 (3/4")	18 (3/4")	T Dim	208	260	310
D Cristales, 1/2" cople std	18 (3/4")	18 (3/4")	18 (3/4")	M Purge, 1/2" cople std	38 (1 1/2")	38 (1 1/2")	38 (1 1/2")	U Dim	100	100	100
E Carrocería, 1" cople std	51 (2")	51 (2")	51 (2")	N Alta agua automáticamente, 1/2" cople	25 (1")	25 (1")	25 (1")	V Dim	1888	2450	2480
F Termómetro, 1/2" cople std	18 (3/4")	18 (3/4")	18 (3/4")	O Salida de agua, 1/2" cople std	63 (2 1/2")	63 (2 1/2")	63 (2 1/2")	W Dim	200	300	300
G Reserva condensado agua fría, 1/2" c	51 (2")	51 (2")	51 (2")	P Placa de refuerzo	63 x 178	63 x 178	63 x 178	X Dim	1788	2332	2602
H Tubo de drenaje de Tubo std con	51 (2")	51 (2")	51 (2")	Q Piezas, conit de	152 (6")	152 (6")	152 (6")	Y Dim	820	820	1080
una 6.3" en el lado izquierdo				R Bases, después de los ajustes	63 x 31	63 x 31	63 x 78	Z Dim	1120	1120	1380
									80	80	80

TANQUE PARA RETORNO DE CONDENSADOS



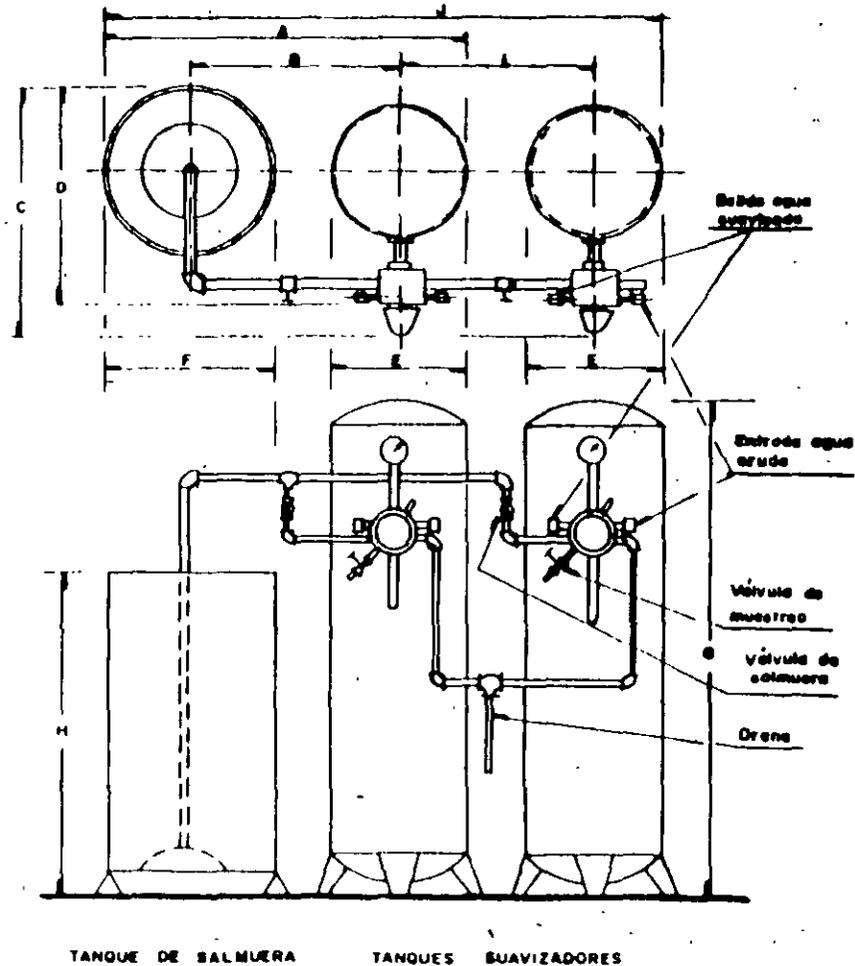
DIMENSIONES DEL SEPARADOR CENTRIFUGO									
Modelo	Cabeles Caldera	Presión Kg/cm <sup>2</sup> (libe/pulg <sup>2</sup> )	Volumen Lit.	Espeor placa mm (")	A mm	B mm	C mm (")	D mm (")	E mm (")
BC 6	128 a 380	10.5 (150)	75	7.9 (5/16)	664	366	38 (1-1/2)	162 (6)	102 (4)
BC 8	128 a 380	21.0 (300)	141	9.5 (3/8)	1422	366	38 (1-1/2)	162 (6)	162 (6)



## SEPARADOR CENTRIFUGO

DIMENSIONES DEL SEPARADOR CENTRIFUGO									
Modelo	Cables Cadena	Presión kg/cm <sup>2</sup> (100/pulg <sup>2</sup> )	Volumen litros	Espesor pla- ca mm (")	A mm	B mm	C mm (")	D mm (")	E mm (")
SC 5	125 x 350	10.5 (150)	75	7.9 (5/16)	864	356	38 (1-1/2)	152 (6)	102 (4)
SC 6	125 x 350	21.0 (300)	141	8.8 (5/8)	1422	356	38 (1-1/2)	152 (6)	152 (6)

DIMENSIONES DEL SUAVIZADOR DE AGUA												
Modelo (ET)	Capacidad en gal	Tubo de mm (")	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
250	100 000	51 (2)	1010	560	640	500	580	480	1500	810	530	1540
300	125 000	51 (2)	1010	560	640	500	580	480	1800	810	530	1540
400	175 000	75 (3)	1010	580	690	520	580	480	1800	810	530	1540
460	150 000	25 (1)	1110	630	790	620	480	480	1500	1220	630	1740
470	150 000	32 (1-1/4)	1110	630	840	620	480	480	1500	1220	630	1740
750	200 000	32 (1-1/4)	1440	870	960	725	570	570	1500	1220	870	2310
760	200 000	38 (1-1/2)	1440	870	860	725	570	570	1500	1220	870	2310
765	250 000	38 (1-1/2)	1440	870	860	725	570	570	1500	1220	870	2310
850	300 000	38 (1-1/2)	1840	1070	1160	915	770	770	1500	1220	1070	2910
1000	450 000	50 (1-7/8)	1950	1125	1160	915	770	880	1800	1220	1070	3020
1050	450 000	51 (2)	1950	1125	1410	925	770	880	1800	1220	1070	3020
1500	600 000	8-1/2	2280	1280	1580	1060	900	1060	1800	1220	1200	3460



SUAVIZADOR DE AGUA

## REGLAMENTO PARA LA INSPECCION DE GENERADORES DE VAPOR Y RECIPIENTES SUJETOS A PRESION

El reglamento para la inspección de Generadores de Vapor y Recipientes sujetos a presión, es fácilmente obtenible en la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, siendo su distribución gratuita. El contenido de este Reglamento, es el siguiente:

### CAPITULO I

Aplicación.

### CAPITULO II

Definiciones

### CAPITULO III

Clasificación General

### CAPITULO IV

Solicitudes y Autorizaciones

### CAPITULO V

Inspectores e inspecciones

### CAPITULO VI

Instalaciones

### CAPITULO VII

Reparaciones

### CAPITULO VIII

Presión máxima de trabajo

### CAPITULO IX

Aparatos auxiliares y accesorios.

### CAPITULO X

Jefes de Planta, Operadores y Fogoneros.

### CAPITULO XI

Obligaciones de los usuarios

### CAPITULO XII

Cuotas por derechos de inspección.

### CAPITULO XIII

Fórmulas

### CAPITULO XIV

Sanciones

### CAPITULO XV

Disposiciones Generales

Este es el reglamento principal en la Republica Mexicana, en lo que se refiere a la inspección de generadores de vapor y recipientes sujetos a presión. De acuerdo a esto y a la importancia que tiene transcribimos a continuación los puntos más importantes de este Reglamento.

biendo remitir a la Secretaría los originales de: acta e informe de inspección, orden de reparaciones y aviso de pago sellado por la Oficina Federal de Hacienda, ante la cual corresponda hacer el pago. El inspector entregará al usuario copia del acta, del aviso de pago y de la orden de reparaciones, debiendo proporcionar otra copia de la orden de reparaciones a la Comisión de Seguridad de la fábrica o empresa.

Si las reparaciones que ordene el inspector ameritan el paro inmediato del funcionamiento del generador, lo anotará así en el pliego de "Ordenes de reparación", y el usuario no podrá poner en servicio el generador hasta que las reparaciones hayan sido debidamente ejecutadas.

En todo caso el inspector fijará, de acuerdo con lo estipulado en el párrafo siguiente, el plazo dentro del cual deberán ser hechas las reparaciones al terminarlas, el usuario dará aviso por escrito a la Secretaría.

El plazo señalado por la Secretaría y por el inspector, y dentro del cual deban efectuarse una o más reparaciones, será fijado por escrito y se contará a partir de la fecha en que se conceda. Al fijarlo, se tomará en cuenta la facilidad para conseguir materiales en la localidad en que se encuentre el generador, y las comunicaciones normales.

Los inspectores nunca podrán fijar plazos mayores de 30 días y el usuario podrá solicitar por escrito a la Secretaría, presentando pruebas determinantes, la ampliación de dichos plazos.

Si el estado del generador de vapor o recipiente a presión no presenta seguridad, aún en el caso de haber sido reparados, el inspector marcará con punzón de letras, en un lugar perfectamente visible y al frente, las palabras: FUERA DE SERVICIO.

Artículo 17° Certificado de Inspección. Cuando el generador o el recipiente se encuentra en buen estado de funcionamiento, al terminarse la inspección y las reparaciones ordenadas, la Secretaría del Trabajo, extenderá un certificado de inspección, autorizando el funcionamiento, y que deberá ser colocado en un cuadro con vidrio en lugar visible, cercano al que ocupa el generador de vapor o recipiente a presión.

Artículo 18° Cuando un inspector comprueba debidamente ante la Secretaría que un generador o un recipiente exigen reparaciones o medidas de seguridad importantes, y que notoria y substancialmente están indicadas, se aplicarán sanciones al usuario, así como al jefe de planta o encargado, cuando hayan dejado de cumplir con lo prescrito en el artículo 84.

Artículo 19° Cuando un inspector no exija una reparación o medida de seguridad, que sea necesaria y notoria a juicio del jefe de planta o encargado del generador o del recipiente, esta última persona deberá hacer la anotación respectiva en el Libro Diario, y el usuario procederá como en el caso del artículo 84, pero poniendo, desde luego, los hechos en conocimiento de la Secretaría.

Artículo 20° Si un inspector no exige las medidas de seguridad o reparación notorias y substancialmente necesarias a juicio de la Secretaría ésta aplicará al jefe de planta o encargado a que se alude en el artículo anterior, las sanciones correspondientes cuando no hay las anotaciones de que habla el artículo, así como el usuario que no dé aviso a la Secretaría en el término de diez días.

Artículo 21° El usuario tiene la misma obligación que impone el artículo 19 al jefe de planta o al encargado, independientemente del aviso a que se refiere el propio artículo. La falta de cumplimiento será sancionada.

Artículo 22° Los usuarios y jefes de planta o encargados tienen la obligación de dar a los inspectores, especiales o generales, todas las facilidades para el desempeño de su función, así como los informes que la Secretaría les pida sobre la conducta de los inspectores.

Artículo 23° La Secretaría mantendrá los inspectores generales necesarios y organizará su servicio en la forma adecuada para realizar sus fines de vigilancia y supervisión.

Artículo 24° Las inspecciones a ferrocarriles de concesión federal, podrán ser efectuadas por inspectores especiales de la propia empresa, siempre que reúnan los requisitos fijados en el artículo 11, y que sean trabajadores de la empresa. Estos inspectores estarán registrados en la Secretaría del Trabajo, se ajustarán en todo al presente Reglamento, y sus inspecciones causarán los derechos respectivos.

#### Instalaciones

Artículo 25° Para la instalación de generadores de vapor y recipientes sujetos a presión, se tomará en cuenta su potencia y el lugar en donde se van a instalar, así como las prescripciones siguientes

**A.- Instalación, en poblado, de generadores de 201 metros cuadrados de superficie de calefacción o más.**

1.— Deberán ser instalados en un departamento o cuarto especial fuera de casa habitada o de local muy frecuentado, y no habrá encima talleres en que haya personal fijo.

2.— Las paredes, pisos y techos del departamento o cuarto para generadores de vapor, deberán ser contruidos con material incombustible.

3.— Las paredes del departamento o cuarto de generadores de vapor, deberán quedar a una distancia mínima de tres metros de la vía pública o predio vecino, si el generador se instala al mismo nivel exterior, y sólo podrán hacerse instalaciones en fosos, en casos especiales y con autorización de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social.

4.— La distancia mínima entre el generador de vapor y las paredes del departamento o cuarto de generadores, será de un metro.

5.— Deberá existir un espacio libre de dos metros, sobre la parte superior del generador y el techo o estructura del mismo.

**B.— Instalación, en poblado, de generadores de vapor comprendidos entre 76 y 200 metros cuadrados de superficie de calefacción.**

1.— Podrán ser instalados dentro de taller, pero fuera de local habitado.

2.— La distancia mínima entre el generador y la vía pública, predio vecino, o locales habitados, deberá ser de tres metros.

3.— La distancia mínima entre el generador de vapor y cualquier pared, que no sea del predio vecino o local habitado, será de un metro.

4.— El espacio libre mínimo sobre la parte superior de los generadores, será el señalado en el inciso 5, fracción A, de este artículo.

**C.— Instalación, en poblado, de generadores de vapor comprendidos entre 2 y 75 metros cuadrados de superficie de calefacción.**

1.— Podrá hacerse en cualquier sitio, a condición de que sean instalados a una distancia mínima de tres metros de la vía pública o predio vecino, y un metro de distancia mínima de cualquier pared.

**D.— Instalación, en poblado, de generadores de vapor portátiles.**

1.— Los que tengan una duración mayor de 2 años se registrarán por las disposiciones anteriores, de acuerdo con la potencia del generador y lugar de instalación.

**E.— Instalación, en poblado, de generadores de vapor del tipo llamado inexplosible.**

1.— Sin distinción de potencia, podrá hacerse en cualquier sitio y a distancias mínimas de un metro entre el generador y lugares transitados, de tres metros de predio vecino, y de un metro de cualquier otro muro o pared. En todos los casos, el generador deberá estar dotado de medios aislantes, que protejan las paredes del predio vecino o del lugar en que esté instalado, contra la acción del calor irradiante.

**F.— Instalación de generadores en despoblado:**

1.— Cualquiera que sea la potencia de un generador, éste podrá ser instalado a la distancia mínima de un metro entre el generador, o batería de ellos y los lugares transitados; de tres metros de predio vecino, y de un metro a cualquier pared.

**Artículo 26° Autorizaciones para instalar generadores y recipientes en poblado.** Toda autorización para la instalación de generadores o recipientes en el Distrito Federal y ciudades de más de cincuenta mil habitantes, estará condicionada a la licencia que expidan el Departamento del Distrito Federal o la autoridad municipal correspondiente, sólo en lo que se refiere a su ubicación.

**Artículo 27° CIMENTACION.** La cimentación o base sobre la que se pretenda hacer la instalación de generadores, deberá construirse con la solidez y rigidez necesarias para soportar todo el peso del generador, chimenea y demás accesorios, sin sufrir deformaciones.

**Artículo 28° REGISTROS EN LA MAMPOSTERIA.** En las mamposterías de los generadores deberán darse aberturas de cuarenta y cinco centímetros por lado como mínimo y en número necesario, a fin de permitir la inspección de las costuras longitudinales y el acceso a cualquier parte del generador, con el objeto de inspeccionarlo o repararlo sin necesidad de destruir la mamposte. Las aberturas deberán estar provistas de puertas u otros medios de cierre.

**Artículo 29° ESPACIO ENTRE PARTE DEL GENERADOR Y DE SU MAMPOSTERIA.** En los lugares en que partes del generador o sus conexiones deben atravesar la mampostería, deberán

dejarse espacios libres no menores de veinticinco milímetros, que se rellenarán con asbestos y otros materiales de cualidades semejantes.

**Artículo 30° CONDUCTOR DE GASES.** En la instalación de los generadores y construcción de sus mamposterías deberá tenerse especial cuidado en evitar la acumulación de gases en los recodos de los conductos, que constituyen un serio peligro y pueden ser causa de graves perjuicios a los generadores.

**Artículo 31° HOGARES.** En los generadores de hogar interior, que utilicen combustible líquido o gaseoso y cuya flama incida sobre la superficie de calefacción del generador, que se encuentre a una distancia menor de dos metros del quemador, las superficies de calefacción deberán estar protegidas con materiales refractarios en un espesor mínimo de diez centímetros.

**Artículo 32° HOGARES INDEPENDIENTES.** Todos los generadores que utilicen combustibles líquidos, gaseosos o bagazo, y cuyos hogares tengan dimensiones insuficientes para la completa combustión, deberán estar dotados, siempre que el tipo de construcción del generador lo permita, de hogares independientes que llenen los requisitos siguientes:

1.— Deberán tener las dimensiones suficientes para que la combustión sea completa, dejando pasar únicamente los gases producidos sin flama alguna.

2.— Deberán ser construidos de ladrillo u otro material refractario en un espesor mínimo que corresponda al material empleado, revestido en el exterior de ladrillo rojo de buena calidad o lamina de fierro.

3.— Entre el material refractario y el revestimiento exterior se dejará un espacio no menor de cinco centímetros que se rellenará con carbón vegetal sólido, asbesto, magnesio y otro material, a fin de evitar que el revestimiento exterior se caliente demasiado.

**Artículo 33° CHIMENEAS.** Deberán reunir los requisitos siguientes:

1.— Tendrán la capacidad suficiente para dar salida a todos los gases producidos por la combustión,

2.— Tendrán la altura necesaria para que llenen debidamente su objeto y, en todo caso, la mínima deberá ser tal, que sobresalga un metro veinticinco centímetros del techo del edificio o cuarto de generadores cuando no haya edificio cercano, o tres metros del edificio más alto que se encuentre dentro del perímetro de diez metros alrededor de ellas.

3.— Deberán ser construidas de manera que garanticen su completa estabilidad y podrán ser metálicas, de concreto armado, de piedra o de ladrillo con mortero de cemento. Cuando se usen materiales alterables al fuego, deberán revestirse interiormente con materiales a prueba de fuego, hasta la altura que fuere necesaria, según la temperatura de los gases de salida. Deberán estar convenientemente atirantadas para lograr su estabilidad.

4.— Cuando las dimensiones de la chimenea lo requieran deberá contar con aberturas practicadas en su base con puertas de cierre para que pueda fácilmente ser limpiada e inspeccionada.

**Artículo 34° PROTECCION DE TUBERIAS.** Todas las tuberías de servicio de un generador que pasen por los hogares o conductos de gases, deberán ser revestidas con un aislante de material refractario. Al atravesar las mamposterías se les deberá dejar alrededor un espacio que permita sus libres contracciones o dilataciones, y se rellenará este espacio con materiales aislantes.

**Artículo 35° COMBUSTIBLES LIQUIDOS.** Las instalaciones para el empleo de combustibles líquidos en generadores de vapor, reunirán los siguientes requisitos.

1.— Los tanques de abastecimiento de los quemadores deberán ser construídos completamente cerrados y provistos de un tubo de ventilación que lleve los gases que puedan formarse en aquéllos, fuera del local ocupado por los generadores. El tubo de ventilación, tendrá en su extremidad un cuello de ganso provisto con tela metálica de no menos de quince hilos por centímetro lineal. Queda estrictamente prohibido el uso de tanques abiertos, para el almacenamiento de combustibles fluidos en un perímetro de diez metros del lugar ocupado por el generador, o algún punto o calorífero.

2.— Los tanques deberán ser instalados solidamente, de manera que garanticen su estabilidad.

3.— No existiran fugas en las tuberías para el servicio del sistema, y éste deberá estar provisto de las válvulas necesarias para incomunicar el tanque y el quemador o quemadores en caso de incendio.

4.— Al apagar el generador, se tendrá cuidado de ventilar los lugares y conductos de gases, para evitar accidentes en el incendio.

5.— Para la ignición del combustible en los quemadores, deberán emplearse medios que permitan su fácil encendido sin que el combustible se derrame en el hogar, y eliminar así el peligro de que, al encenderse, lo haga bruscamente.

6.— Cerca del generador, y el alcance del operador, deberá tenerse siempre uno o más recipientes metálicos que en su máximo contengan arena, y cuya capacidad mínima en conjunto sea de un metro cúbico. Además se tendrá un extinguidor de incendio para cada generador o batería de ellos.

7.— Las válvulas de servicio de los tanques, así como las de entrada de vapor o los interruptores eléctricos de las bombas para el aceite combustible, deberán contar con medios eficientes para ser operadas.

8.— Los tanques para combustible deberán tener los medios necesarios para llenarlos, sin que existan derrames, y para calentarlos, se empleará el sistema de serpentines.

9.— Cuando, utilizándose combustibles sólidos se pretenda emplear combustible líquido, deberá solicitarse a la Secretaría del Trabajo el permiso respectivo, adjuntando los planos del proyecto y la memoria descriptiva correspondiente.

Artículo 36° COMBUSTIBLES SOLIDOS. Para usar combustibles sólidos, se deberán tener las herramientas necesarias para el manejo de los fuegos, y en lugar cercano al cuarto de generadores los extinguidores de incendio necesarios.

### Reparaciones

Artículo 37° Las reparaciones a los generadores, sistemas y materiales empleados en ellos, además de llenar las prescripciones del presente capítulo, deberán reunir los requisitos que para la construcción señalan las especificaciones tipo aceptadas universalmente.

Artículo 38° Los parches que hubiere necesidad de colocar en los generadores deberá reunir los requisitos siguientes:

1.— El procedimiento que se empleará para su colocación, será el de remachado a costura sencilla, o el de soldadura por medio del arco eléctrico, si el parche se utiliza en superficies atirantadas.

2.— Ninguna costura de más de tres pasos del remachado, en el sentido longitudinal del generador, podrá estar en contacto directo con la flama.

3.— Podrán ser proyectados mediante el sistema de costuras diagonales y serán calculados de acuerdo con las indicaciones contenidas en el Anexo de este Reglamento.

4.— Los parches circulares o semicirculares, sólo podrán colocarse cuando su diámetro no exceda de veinte centímetros y no serán tomados en consideración al calcularse la presión máxima de trabajo del generador.

5.— En reparaciones de carácter permanente, queda prohibido el uso del llamado "tornillo de parche", pudiéndose utilizar sólo en reparaciones provisionales y en las partes del generador en que no fuere posible la colocación de remaches, pero previa aprobación de la Secretaría.

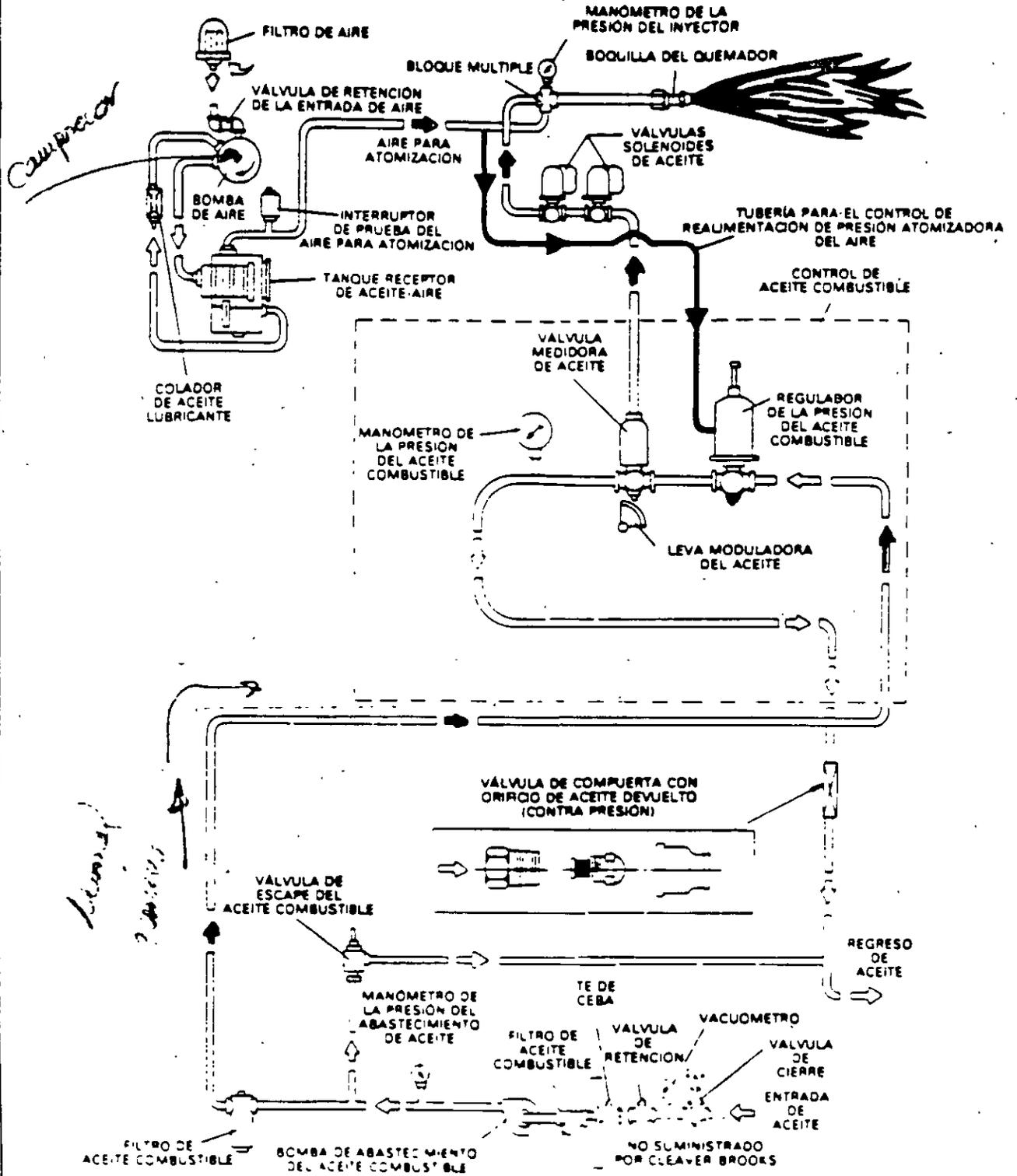
Artículo 39° SOLDADURA A FUSION. La soldadura a fusión sólo se empleará cuando la seguridad del generador no dependa únicamente de la resistencia de la soldadura. Se permitirá en superficies atirantadas, o en las que se atiranten para reforzar un parche, así como para recalcar las uniones. En general, se permitirá el uso de la soldadura a fusión en todos los casos previstos por los códigos de Calderas, universalmente reconocidos como autoridades en las materias, siempre que la soldadura sea aplicada por un perito que, además use los materiales adecuados.

Artículo 40° Cuando, por causas de fuerza mayor, hubiere necesidad de efectuar reparaciones en partes que afecten la seguridad de los generadores aún cuando éstos no hubieren sido inspeccionados o habiéndolo sido, no hubiere existido la necesidad de ordenar tales reparaciones, el usuario procederá a hacerlas desde luego y conforme a las prescripciones de este capítulo. Al concluir de hacer estas reparaciones, el usuario deberá dar aviso inmediato y por escrito a la Secretaría, especificando las, e indicando todas las pruebas que hubiere llevado a cabo.

### Aparatos Auxiliares y Accesorios

Artículo 43° VALVULAS DE SEGURIDAD Todo generador, cuya superficie de calefacción

## DIAGRAMA DE FLUJO DE ACEITE N.º 2 (DIESEL)





111 - Manómetro

207 - Switch de seguridad

411 - Manómetro (Vapor al calentador)

33 - Termostato

524 - Válvula solenoide  
Calentador de Vapor

605 - Válvula Reguladora  
o vapor

582 - Válvula Check  
( Vapor )

303 - Filtro

90 - Válvula de  
control ( Vapor )

305 - Termostato  
(Calentador de vapor)

520 - Colador  
( Filtro de vapor )

304 - (Orientador  
eléctrico y Vapor)

85 - Válvula de  
alivio

592 - Válvula check  
( Condensado )

131 - Trampa de Vapor

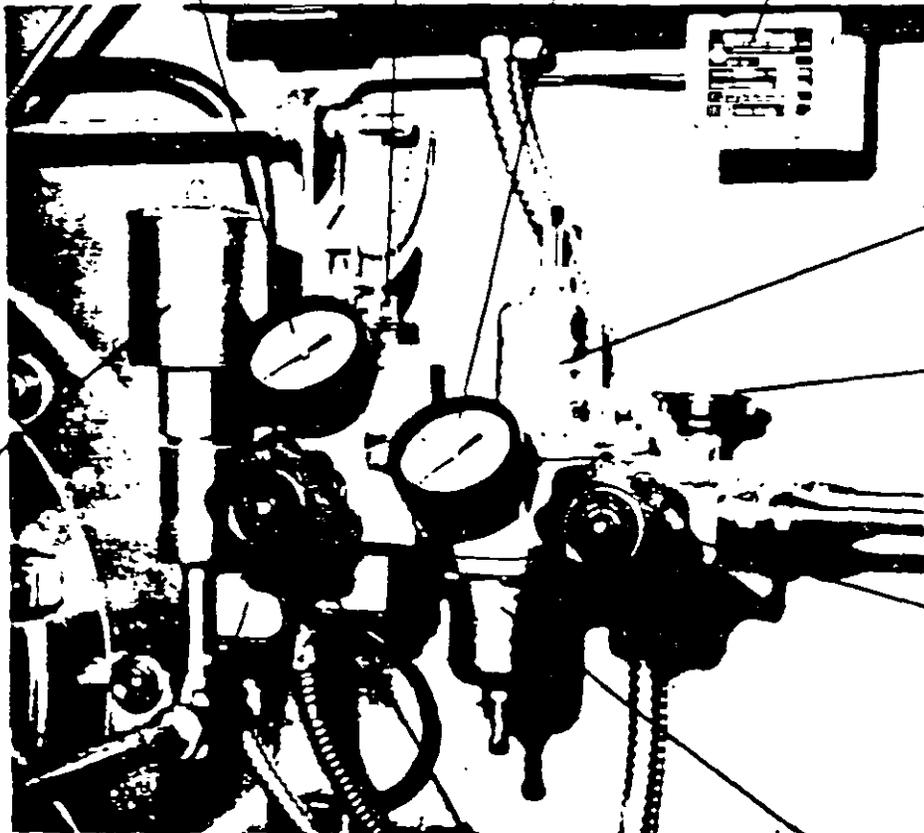
CALENTADOR DE COMBUSTIBLE

313.- SWITCH de seguridad

112.- Manómetro

75.- Válvula medidora

306.- Manómetro



108.- Válvula reguladora de Presión

126.- Term. ...

78.- Válvula solenoide de combustible

593.- Válvula de Control (By-Pass)

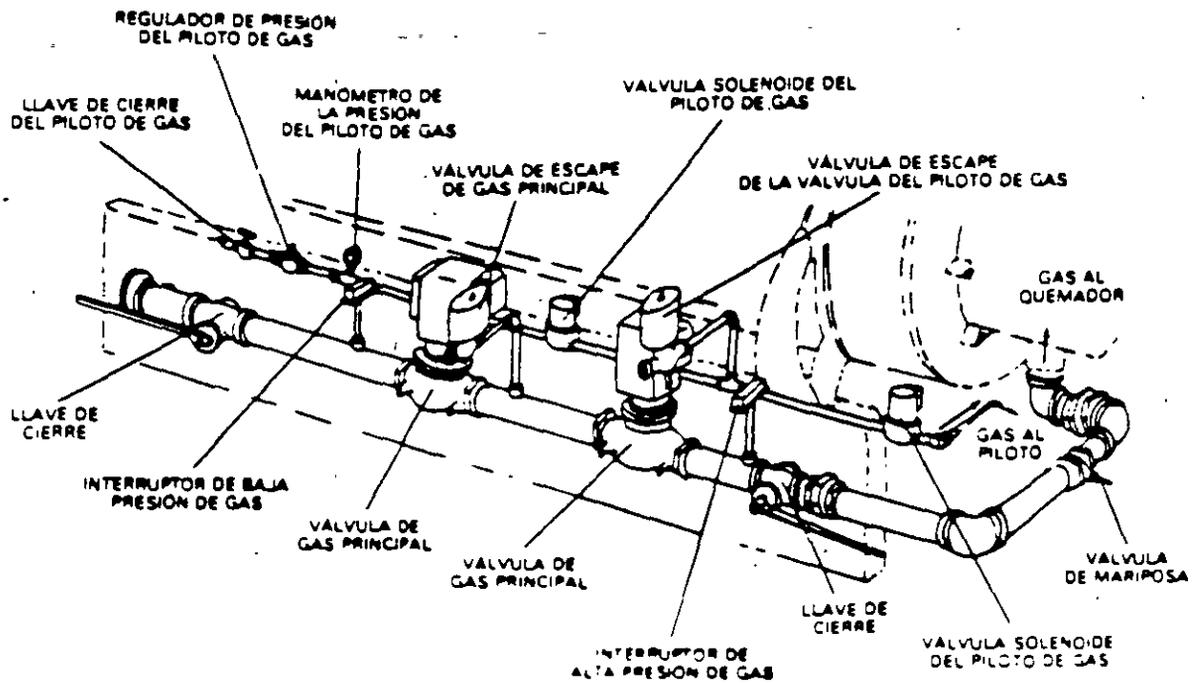
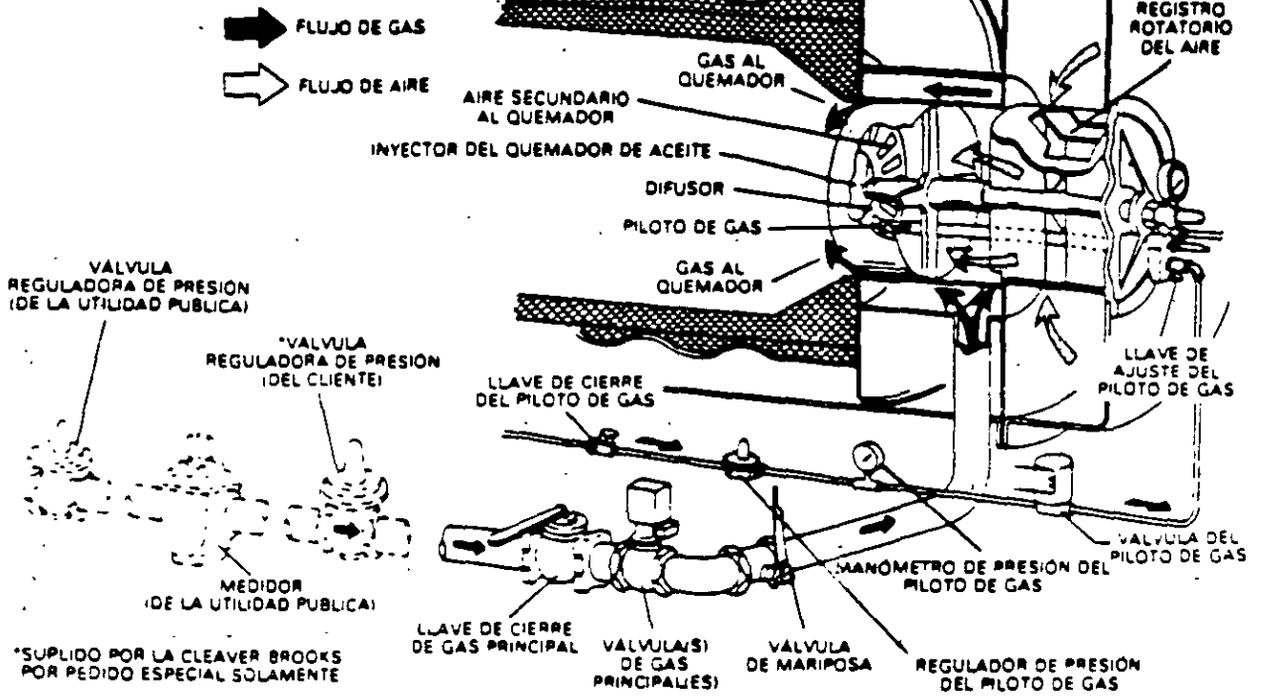
526.- Válvula Solenoide (Purga de Aire)

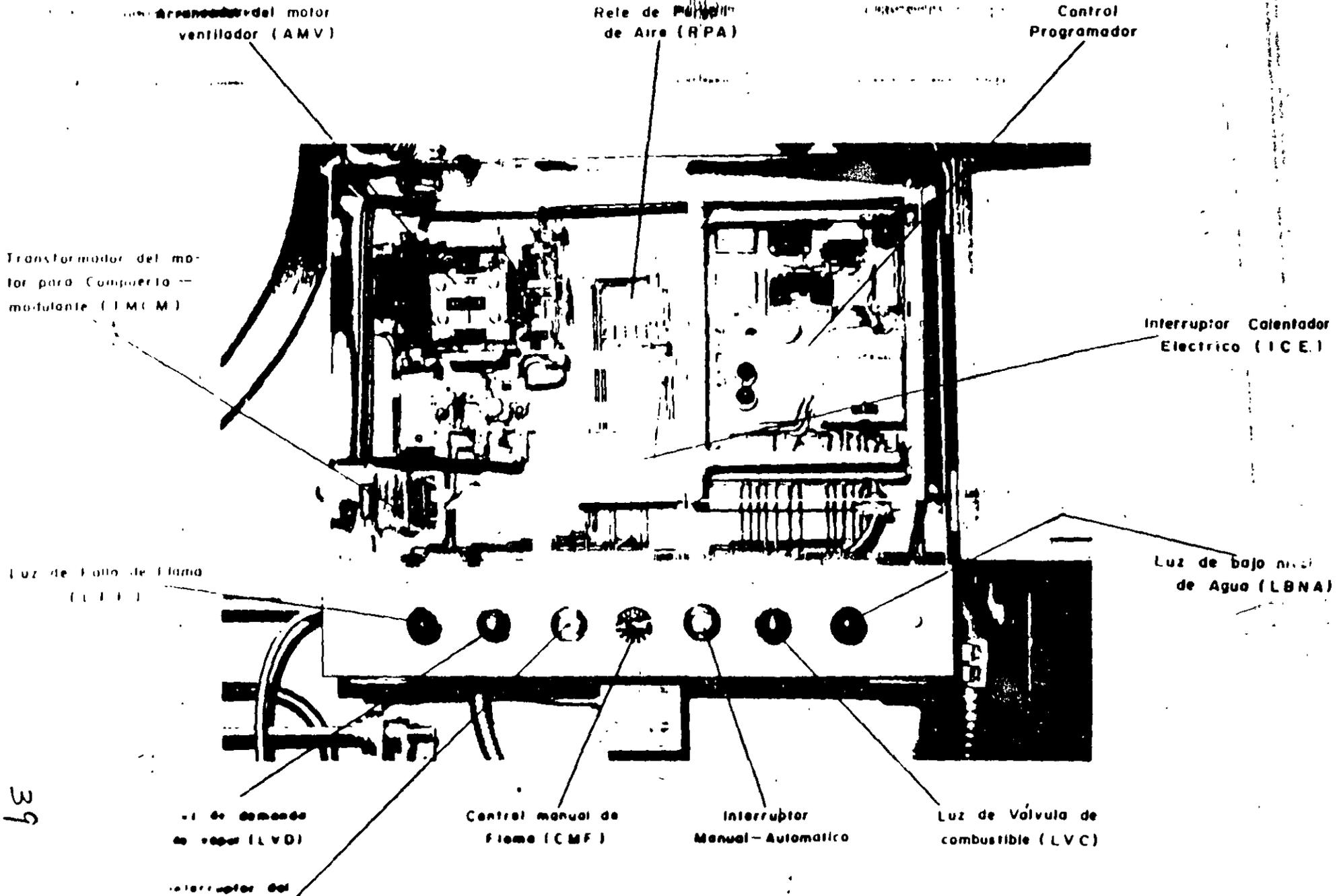
522.- Válvula reguladora de presión (retorno)

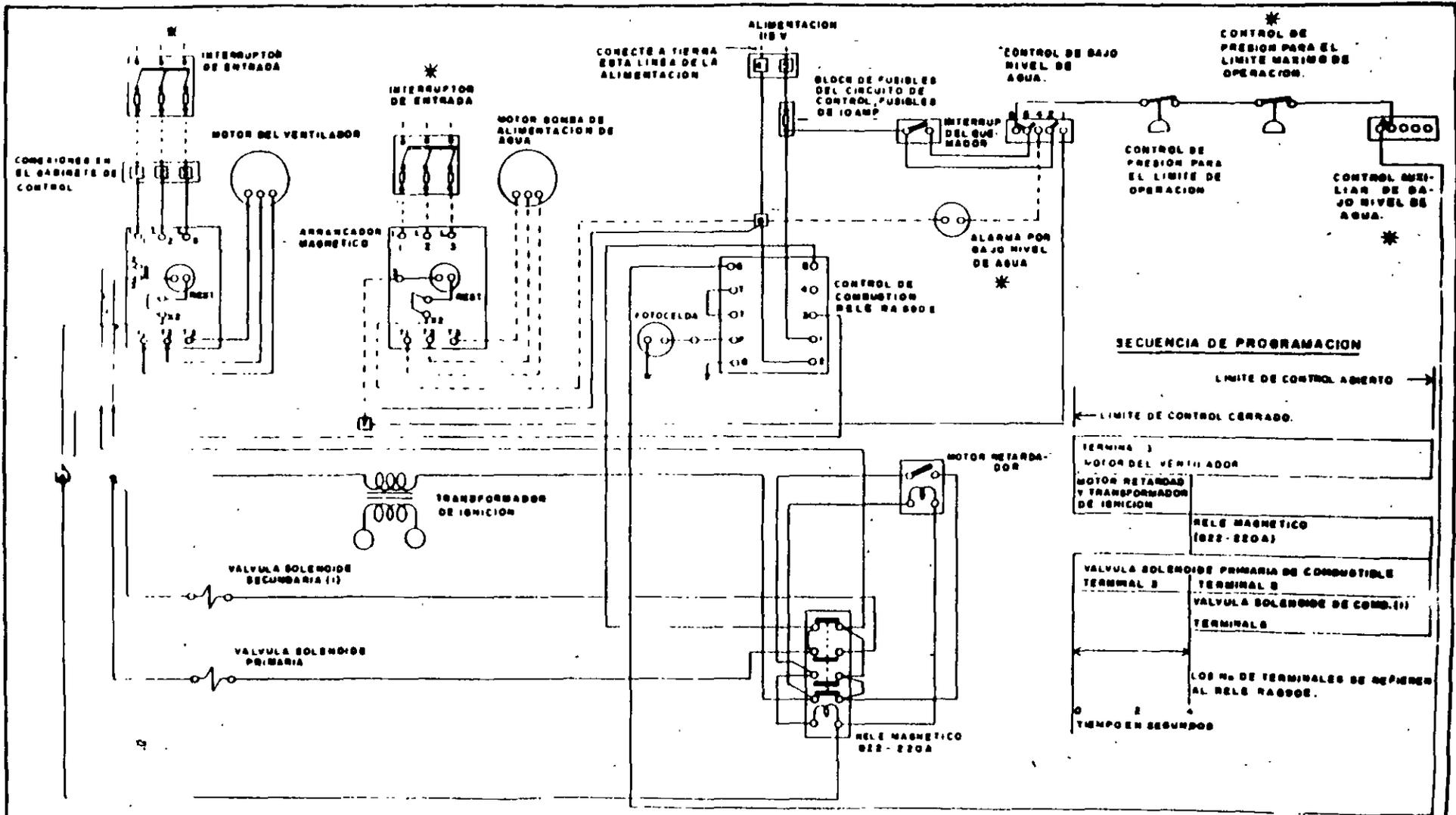
525.- ... de orificio

BLOCK MULTIPLE DE VALVULAS

### CONJUNTO BÁSICO DEL GAS







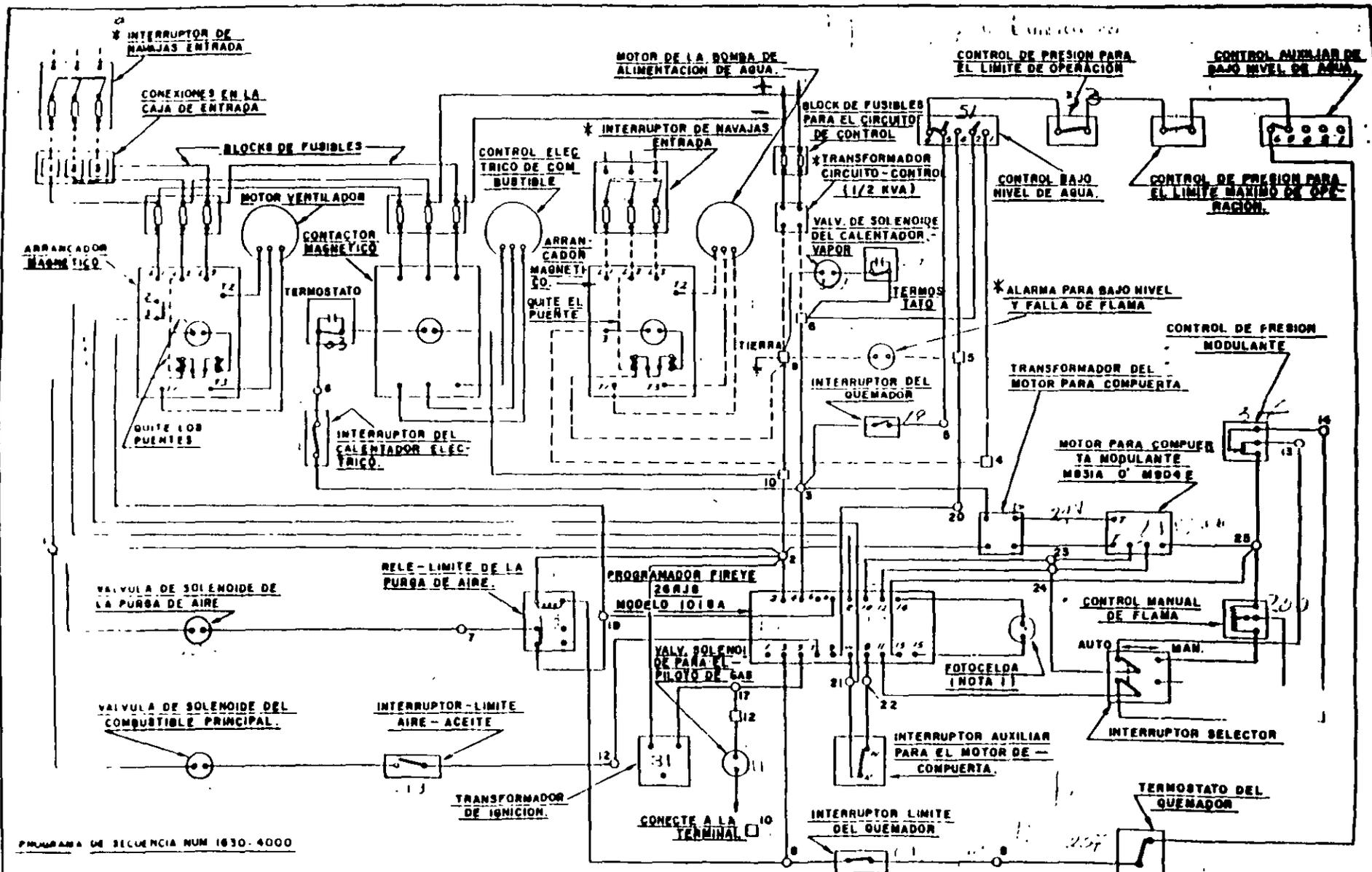
□ DENOTA TERMINALES EN EL GABINETE DE CONTROL

● EQUIPO OPCIONAL NO PROPORCIONADO COMO NORMA EL ALAMBRADO (EXCEPTO LOS PUENTES) MOSTRADO CON LINEA INTERRUMPIDA NO SE PROPORCIONA COMO EQUIPO DE NORMA  
 † INDICA CONEXION  
 \* NO INDICA CONEXION

CARACTERISTICAS-ELEC  
 115V-600V, 60/50 CICLOS, 3 HILOS  
 CIRCUITO DE CONTROL  
 115 VOLTS

**SELMEC**  
 DIAGRAMA ELEC DE CALDERAS CLEVER BROOKS  
 MODELOS M-100 15-20, M-102 20-50 G.G.  
 17 AGOSTO 71

4/0



PROGRAMA DE SECUENCIA NUM 1630-4000

41

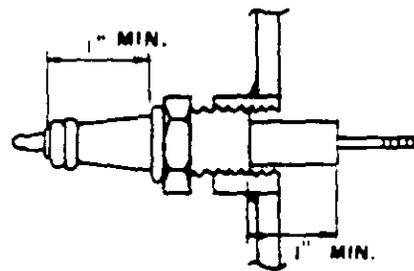
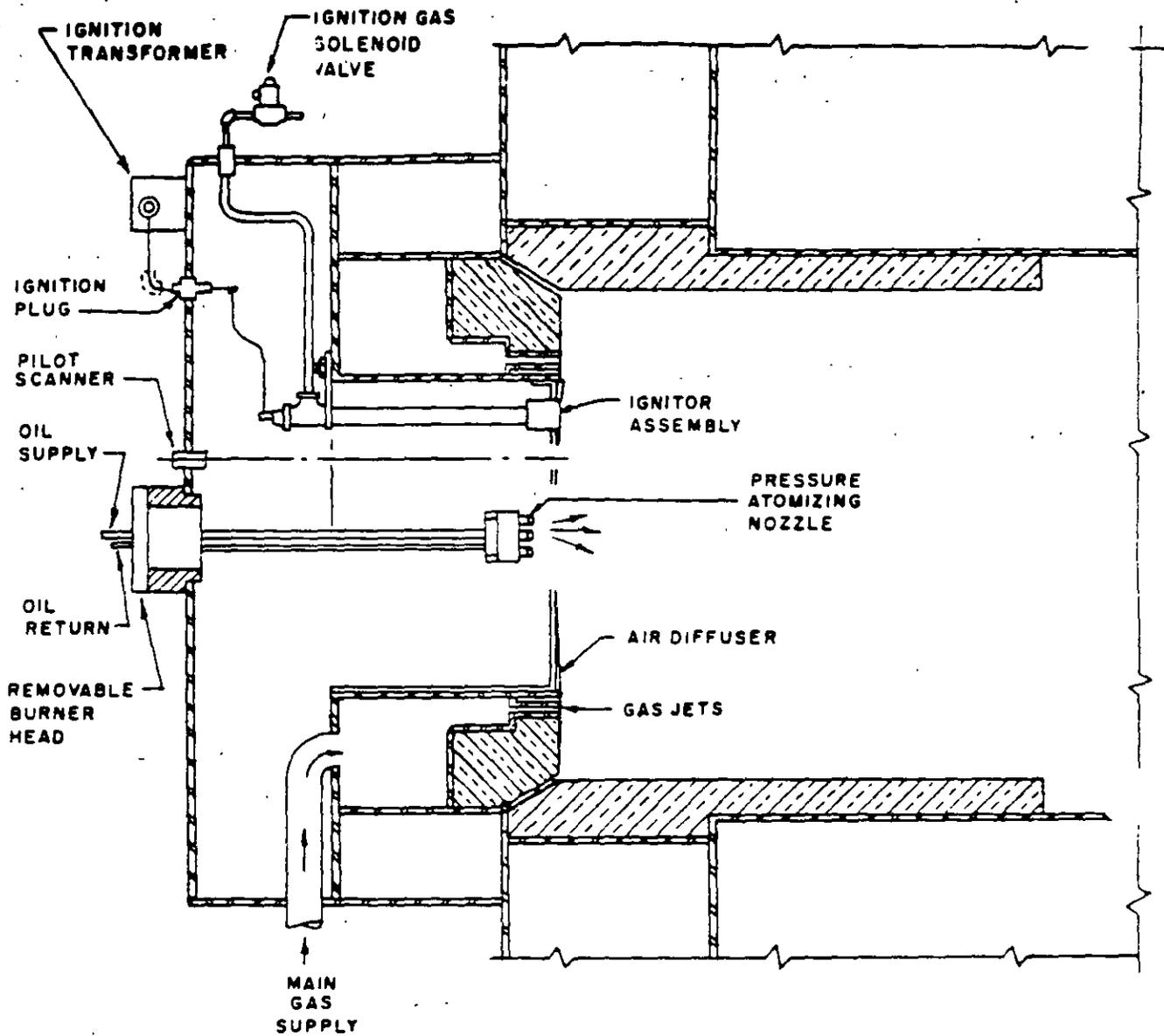
10 AL NOMBRE PARA LA FOTOCELDA  
 10 UN TUBO SEPARADO.  
 10 TERMINALES EN EL PANEL DE  
 10 TERMINALES EN LA CAJA DE

\* EQUIPO OPCIONAL NO PROPORCIONADO  
 A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE EN EL CON  
 TRATO.  
 EL ALAMBRADO MOSTRADO CON LINEA  
 INTERRUPTIDA NO ES PROPORCIONADO A ME  
 NOS QUE SE ESPECIFIQUE EN EL CONTRATO  
 (EXCEPTO LOS PUNTES)

### CIRCUITO ELECTRICO CB 648-50 a 6

LA CONEXION	CARACTERISTICAS ELECTRICAS	3 FASES	60/60 CICLOS	3 HILOS	DIPLOMA
CIRCUITO DE CONTROL					VILLA S.
					DIBUJO NUM.





**IGNITION PLUG**

ON-OFF 20 THRU 40 HP.  
FULL MODULATION 50 THRU 350 HP.

B	ALT. 0 HP & REFRACTORY JOINTS	8-20-70
A	ALTERED FOR 50 THRU 450 HP ONLY	1-18-68

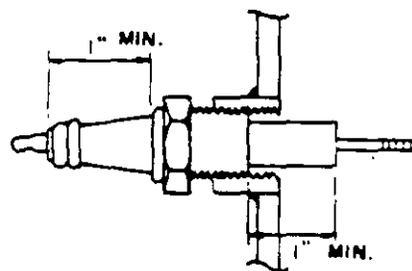
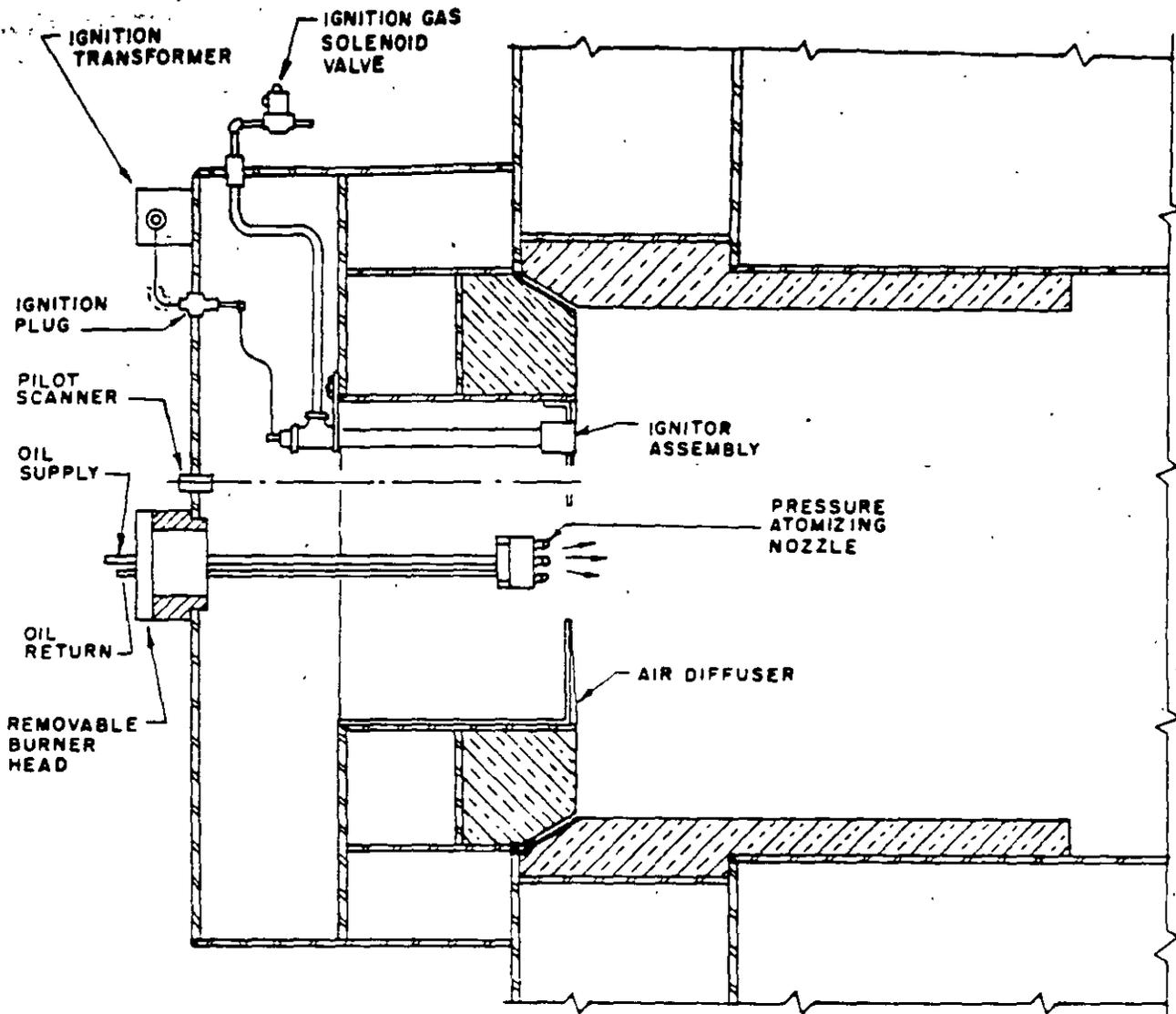
**PRESSURE ATOMIZING BURNER ARRANGEMENT**  
TYPE "N" BOILER-COMBINATION GAS & LIGHT OIL

This drawing or chart is the property of SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC. The drawings contained herein are made with the understanding that they are confidential and will not be used in any way detrimental to this Company's interest.

**SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC.**  
9 EAST 41<sup>ST</sup> STREET, NEW YORK, N. Y., 10017  
FACTORIES: EMMAUS & WILKES BARRE, PA.

OWD  
GDS  
DATE 10 20 68

ORDER NO	NO REQ'D.	MATERIAL	SCALE	CHECKED BY	DRAWN BY J A N
----------	-----------	----------	-------	------------	----------------



ON-OFF 20 THRU 40 HP.  
FULL MODULATION 50 THRU 350 HP.

**IGNITION PLUG**

B: ALT. 0 MP & REFRACTORY JOINTS	8-20-70
A: ALTERED FOR 50 THRU 450 HP ONLY	1-16-68

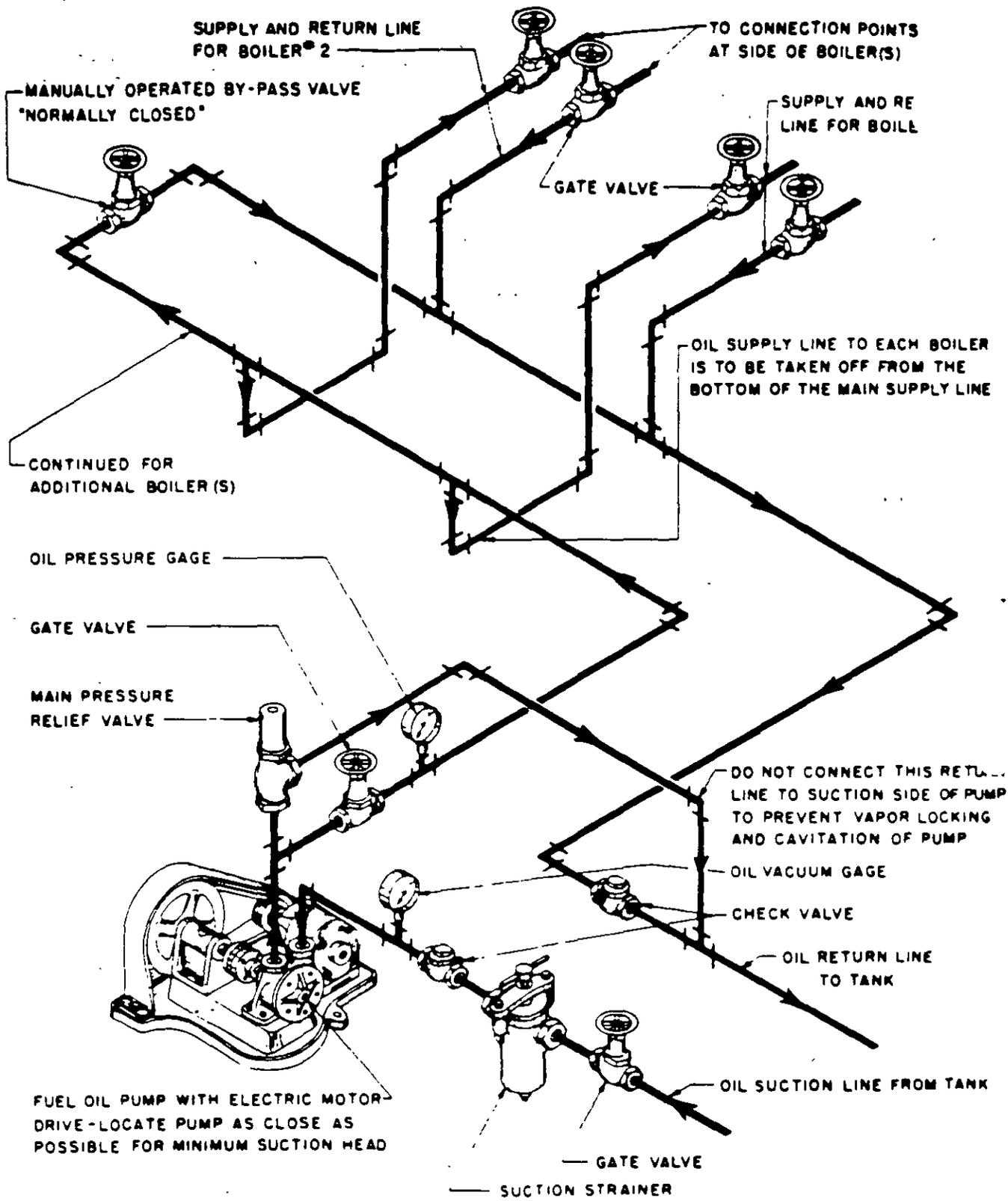
**PRESSURE ATOMIZING BURNER ARRANGEMENT**  
TYPE "N" BOILER-LIGHT OIL ONLY

Drawing or chart is the property of SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC. The disclosures contained herein are made with the understanding that they are confidential and will not be in any way detrimental to this Company's interest.

**SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC.**  
9 EAST 41<sup>ST</sup> STREET, NEW YORK, N.Y., 10017  
FACTORIES: EMMAUS & WILKES BARRE, PA.

Drawg NO  
**G05-16**  
DATE 6-20-68

ORDER NO.	NO RECD	MATERIAL	SCALE	CHECKED BY	DRAWN BY J A W
-----------	---------	----------	-------	------------	----------------



## REMOTE PIPING BY OTHERS

INSTALLATION STANDARDS

OIL BURNER PIPING FOR # 5 OIL

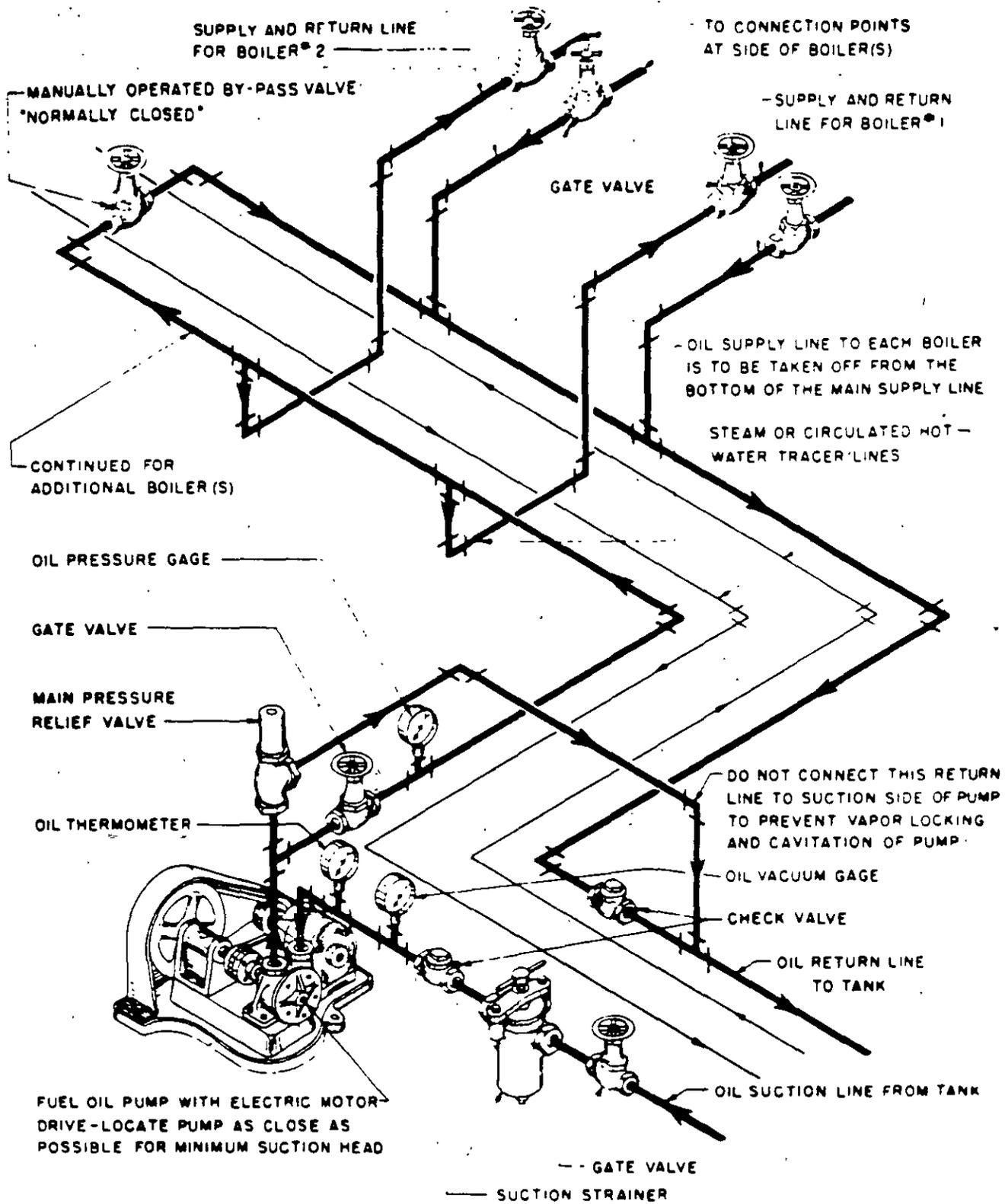
ON-FIRE TUBE BOILERS

This drawing or chart is the property of SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC. The disclosures contained herein are made with the understanding that they are confidential and will not be used in any way detrimental to the Company's interest.

SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC.  
 9 EAST 41st STREET, NEW YORK, N. Y., 10017  
 FACTORIES EMMAUS & WILKES BARRE PA

SSX-337  
 DATE 6 5 7

ORDER NO	NO REQ'D	MATERIAL	SCALE	CHECKED BY	DRAWN BY
----------	----------	----------	-------	------------	----------



## REMOTE PIPING BY OTHERS

**INSTALLATION STANDARDS**

**OIL BURNER PIPING FOR # 6 OIL**

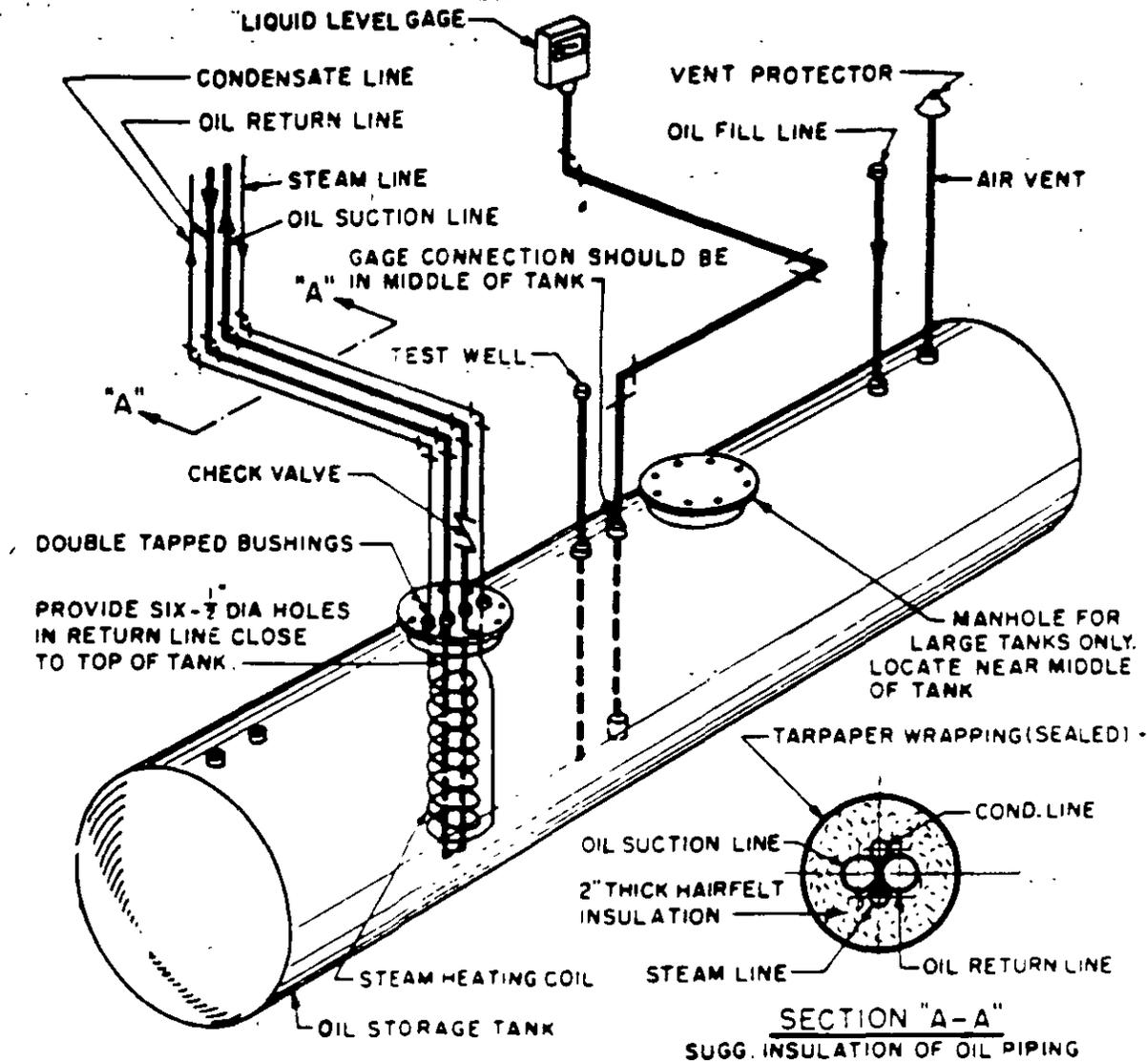
**ON FIRE TUBE BOILERS**

This drawing or chart is the property of SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC. The disclosures contained herein are made in the understanding that they are confidential and will not be used in any way detrimental to the Company's interest.

**SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC.**  
 9 EAST 41ST STREET, NEW YORK, N. Y., 10017  
 FACTORIES: EMMAUS & WILKES BARRE, PA.

**SSX-350**  
 2476572

ORDER NO	NO. REQ'D.	MATERIAL	SCALE	CHECKED BY	DRAWN BY
----------	------------	----------	-------	------------	----------



**NOTES:**

1. TANK INSTALLATION TO BE IN ACCORDANCE WITH THE UNDERWRITERS LABORATORIES REQUIREMENTS AND LOCAL ORDINANCES SEE SECTION NO. 31 NATIONAL BOARD OF FIRE UNDERWRITERS
2. USE SWING JOINTS ON ALL OIL AND STEAM LINES TO PERMIT TANK TO SETTLE WITHOUT PUTTING STRAIN ON FITTINGS
3. MAKE-UP PIPE JOINTS WITH AN OIL PROOF COMPOUND SUCH AS "EXPANDO" OR "PERMATEX"
4. SUCTION AND RETURN LINES MUST BE RUN FULL SIZE UP TO BOILER CONNECTION
5. ALL OIL PIPING BETWEEN STORAGE TANK AND BURNER MUST BE INSULATED.
6. SET TOP OF STORAGE TANK ONE FOOT BELOW FROST LINE
7. TEST ALL OIL LINES AND STEAM LINES BEFORE START-UP.
8. DO NOT TRAP VENT PIPE.
9. FOR UNUSUAL ARRANGEMENTS OF TANK OR PIPING CONSULT OUR ENGINEERING DEPT

**INSTALLATION STANDARDS      TANK INSTALLATION**  
**FOR RESIDUAL OILS**

This drawing or chart is the property of SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC. The disclosures contained herein are made with the understanding that they are confidential and will not be used in any way detrimental to this Company's interest.

**SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC.**

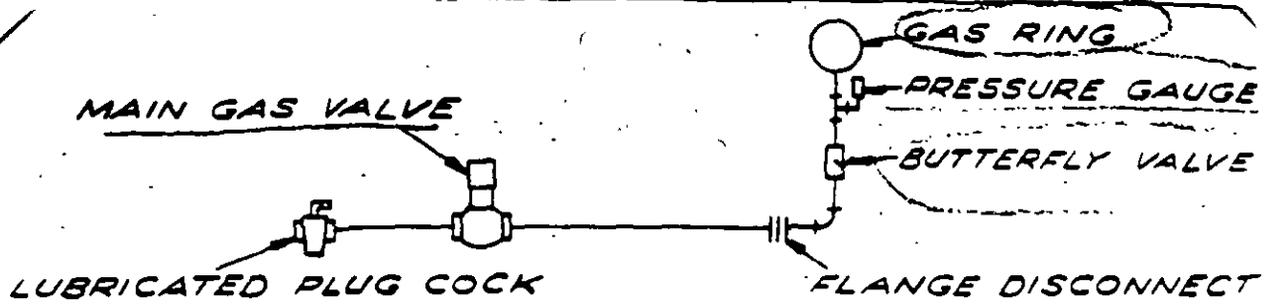
9 EAST 41<sup>ST</sup> STREET, NEW YORK, N. Y., 10017

FACORIES: EMMAUS & WILKES BARRE, PA.

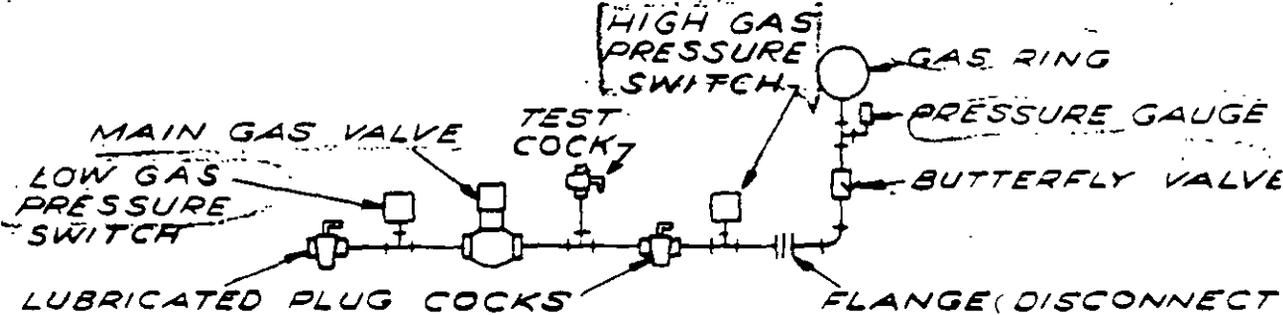
SSX

DATE: 28 6

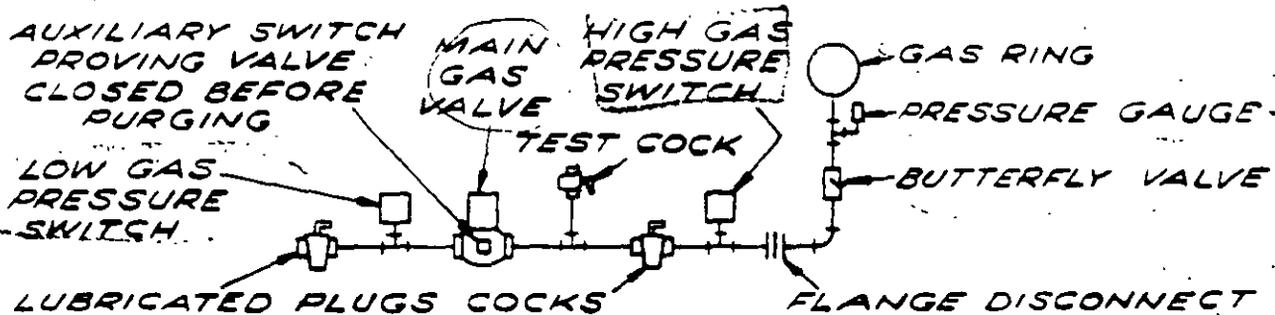
ORDER NO	NO. REQ'D.	MATERIAL	SCALE	CHECKED BY	DRAWN BY
----------	------------	----------	-------	------------	----------



20 TO 40HP (INCL.)

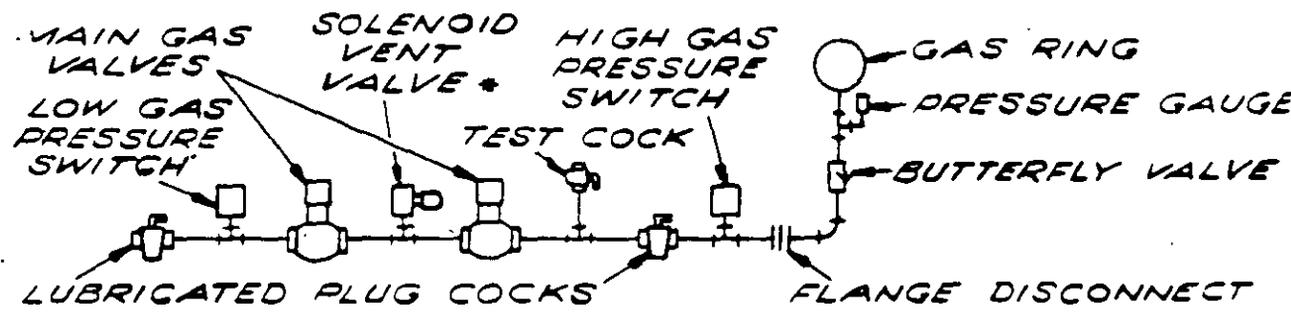


50 TO 200HP (INCL.)



250 TO 700HP (INCL.)

FACTORY MUTUAL (F.M.) GAS TRAIN  
FURNISHED BY "SUPERIOR" -- PIPED AND WIRED



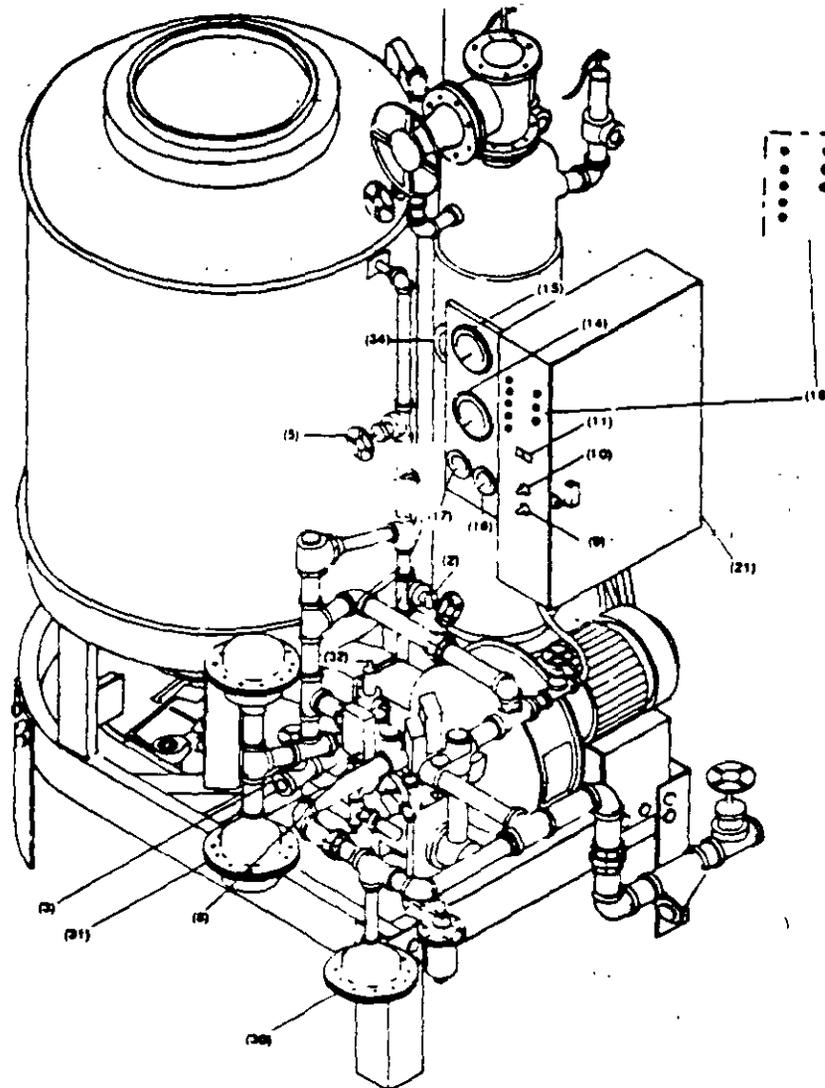
FACTORY INSURANCE ASSOCIATES (F.I.A.) GAS TRAIN  
FURNISHED BY "SUPERIOR" -- PIPED AND WIRED

\* VENT VALVE MUST BE PIPED TO EXTERNAL SAFE LOCATION.

A REV. F.M. 30-200 HP GAS TRAIN 12-16-53

TYPICAL GAS TRAIN PIPING FOR F.M. & F.I.A.  
REQUIREMENTS ON SUPERIOR PACKAGED BOILERS

<small>This drawing or chart is the property of SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC. The disclosures contained herein are made in the understanding that they are confidential and will not be used in any way detrimental to this Company's interest.</small>		<b>SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC.</b> 9 EAST 41ST STREET, NEW YORK, N. Y., 10017 FACTORIES ENNAUS & WILKES BARRE, PA.		<small>FIG. NO.</small> <b>GDS-121B</b> <small>DATE</small> 11-50	
ORDER NO.	NO REQ'D	MATERIAL	SCALE	CHECKED BY	DRAWN BY FGE



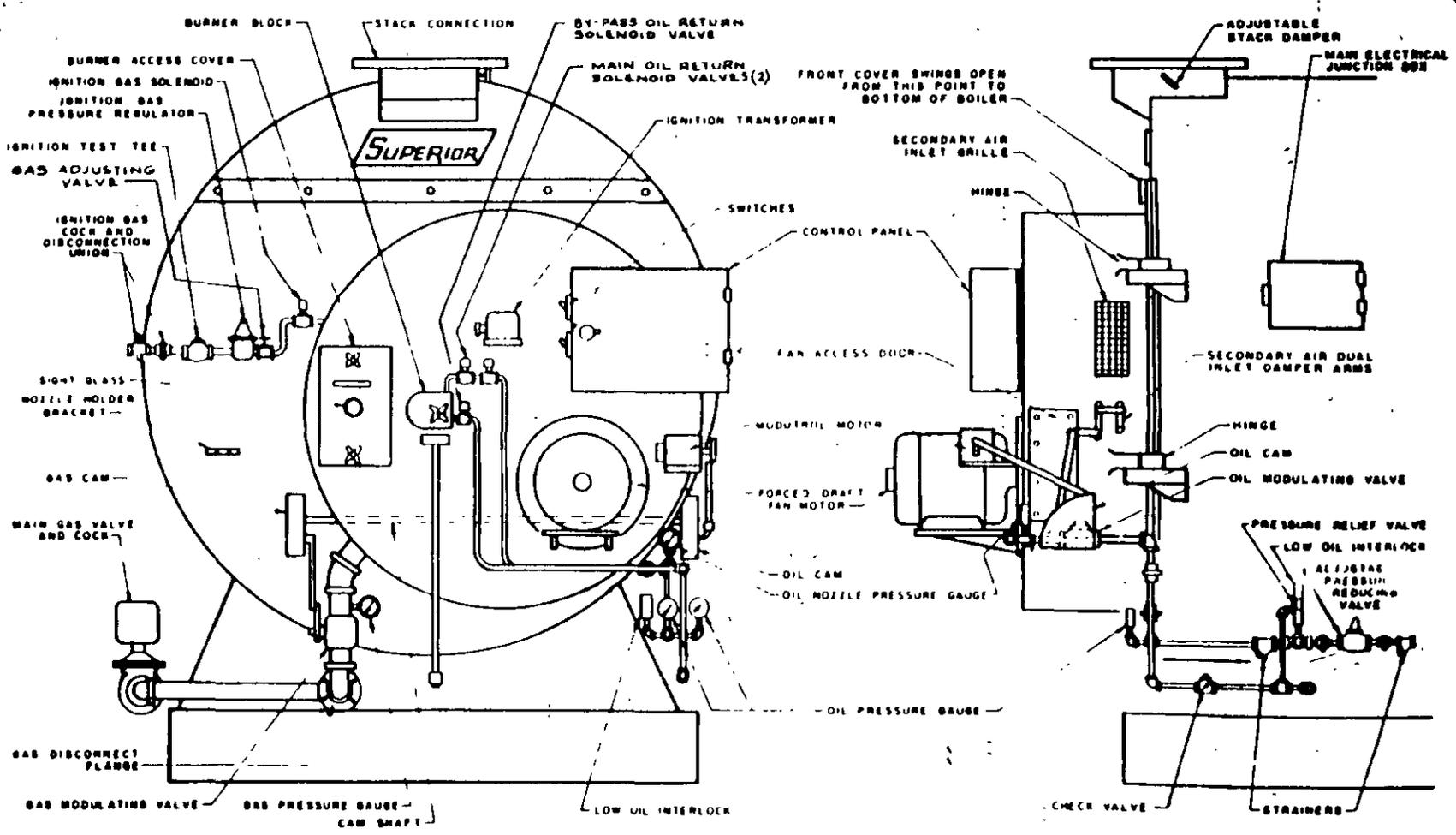
Identificación NUMÉRICA de Componentes Caldera de Vapor EO-100  
(Vista Frontal y Posterior)  
(Las partes señaladas con \* aparecen en la vista POSTERIOR)

- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| (1) Válvula de Descarga de Vapor       | (19)* Domo Separador de Vapor         |
| (2) Válvula de Purga de la Unidad      | (20)* Trampa de Vapor                 |
| (3) Válvula de Drene del Separador     | (21) Caja de Controles Eléctricos     |
| (4)* Válvula de Admisión Bomba Agua    | (22)* Válvula de Seguridad            |
| (5) Válvula Alimentación a Caldera     | (23)* Bomba de Agua                   |
| (6)* Válvula Trampa de Vapor           | (24)* Filtro de Agua de Alimentación  |
| (7)* Válvula Soplador de Motín         | (25)* Purga Automática                |
| (8) Válvula Control del Quemador       | (26)* Válvula Prueba Purga Automática |
| (9) Interruptor Operación - Llenado    | (27)* Grifo de Drene Purga Automática |
| (10) Interruptor Solo Bajo - Alto/Bajo | (28)* Unidad de Calentamiento         |
| (11) Botón de Arranque y Paro          | (29)* Ventilador                      |
| (12)* Válvula de Retención Admisión    | (30) Amortiguador de Admisión         |
| (13)* Válvula de Retención Descarga    | (31) Amortiguador de Descarga         |
| (14) Manómetro de Presión Alimentación | (32) Válvula de Alivio                |
| (15) Manómetro de Presión de vapor     | (33)* Válvula del Inspector           |
| (16) Manómetro Trampa de Vapor         | (34) Termómetro                       |
| (17) Manómetro Presión de Combustible  | (35)* Filtro de Combustible           |
| (18) Panel de Luces Indicadoras        |                                       |

VISTA FRONTAL

IDENTIFICACION NUMERICA DE COMPONENTES, CALDERA EO-100





BURNER ARRANGEMENT

TYPE "N" BOILER-COMBINATION GAS & LIGHT OIL

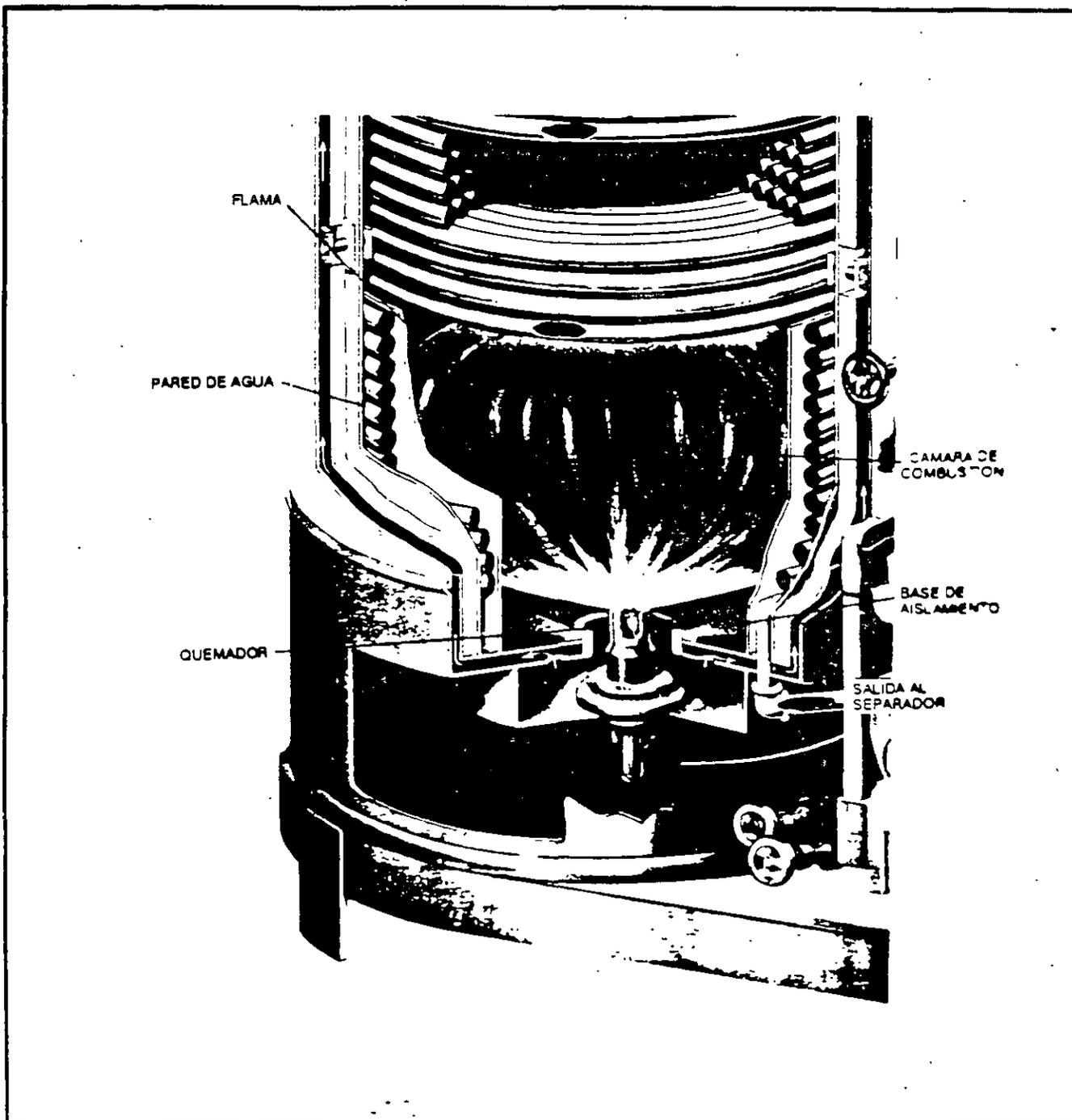
THIS DRAWING OR PART OF THE DRAWING OF SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC. THE DESIGNER HEREBY CERTAINED NEITHER ARE MADE WITH THE UNDERSTANDING THAT THEY ARE CONFIDENTIAL AND WILL NOT BE USED IN ANY WAY DETRIMENTAL TO THIS COMPANY'S INTEREST

SUPERIOR COMBUSTION INDUSTRIES, INC.  
 9 EAST 41ST STREET, NEW YORK, N. Y., 10017  
 FACTORIES: EMMANUS & WILKES BARRÉ, PA.

ORDER NO. \_\_\_\_\_ NO. REC'D \_\_\_\_\_ MATERIAL \_\_\_\_\_ SCALE \_\_\_\_\_ CHECKED BY \_\_\_\_\_ DRAWING BY \_\_\_\_\_

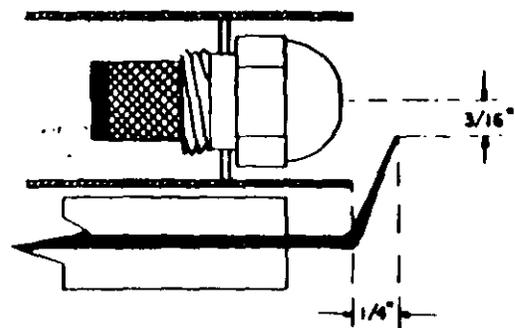
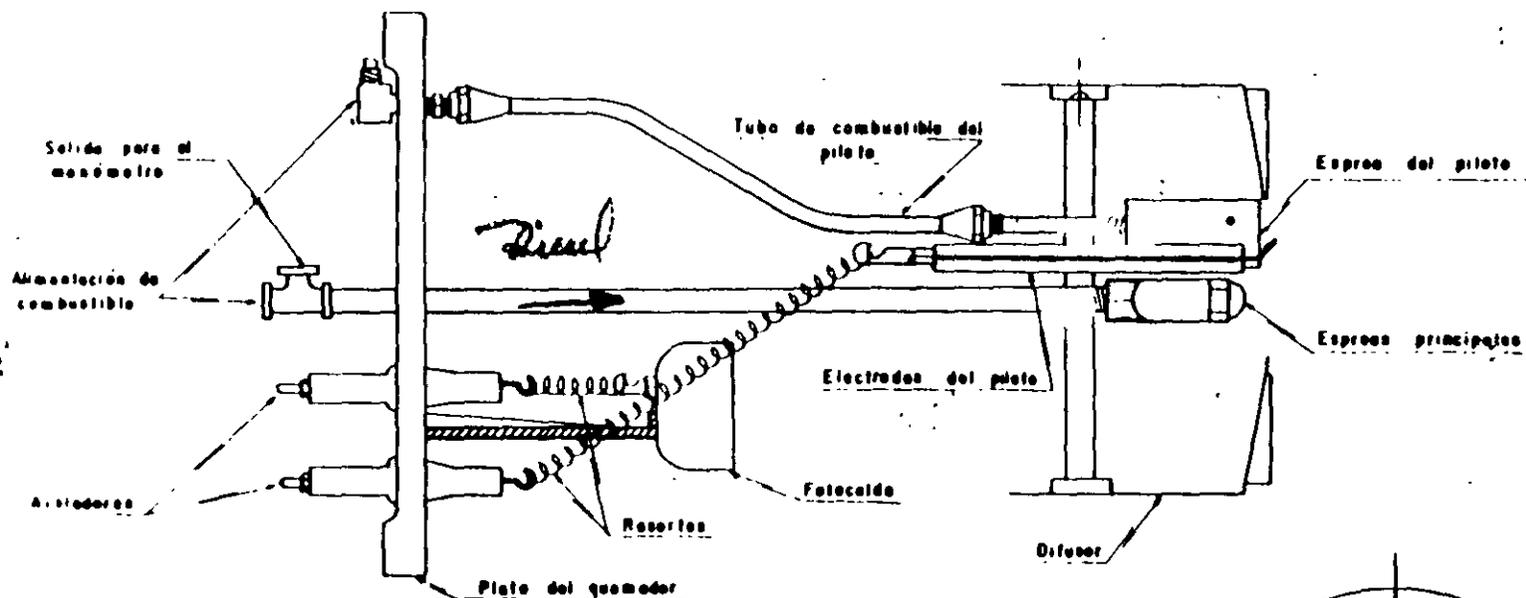
## CAMARA DE COMBUSTION

Esta cámara diseño especial Clayton, provee el aire para la cámara de combustión. su construcción compacta, confina la flama a un sólo lugar y permite garantizar una combustión completa, confina flama a un sólo lugar y permite garantizar una combustión completa, reduciendo a un mínimo la cantidad de combustible sin quemar, lo cual es un factor importante en operaciones intermitentes así con economía de combustible.

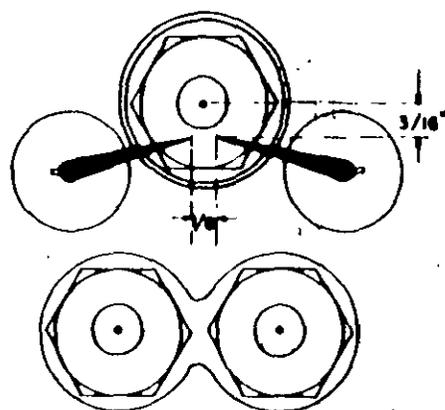


CAMARA DE COMBUSTION

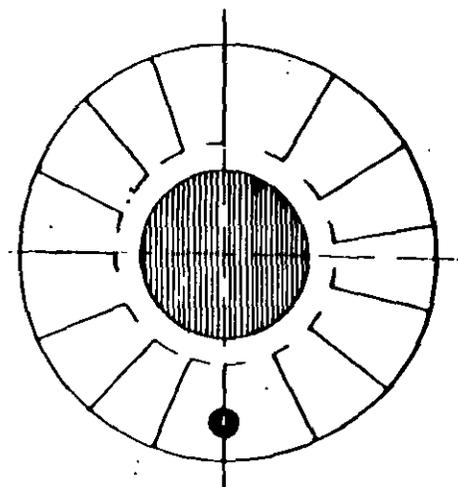
# Conjunto del quemador para calderas Monitor de 40 G.C.



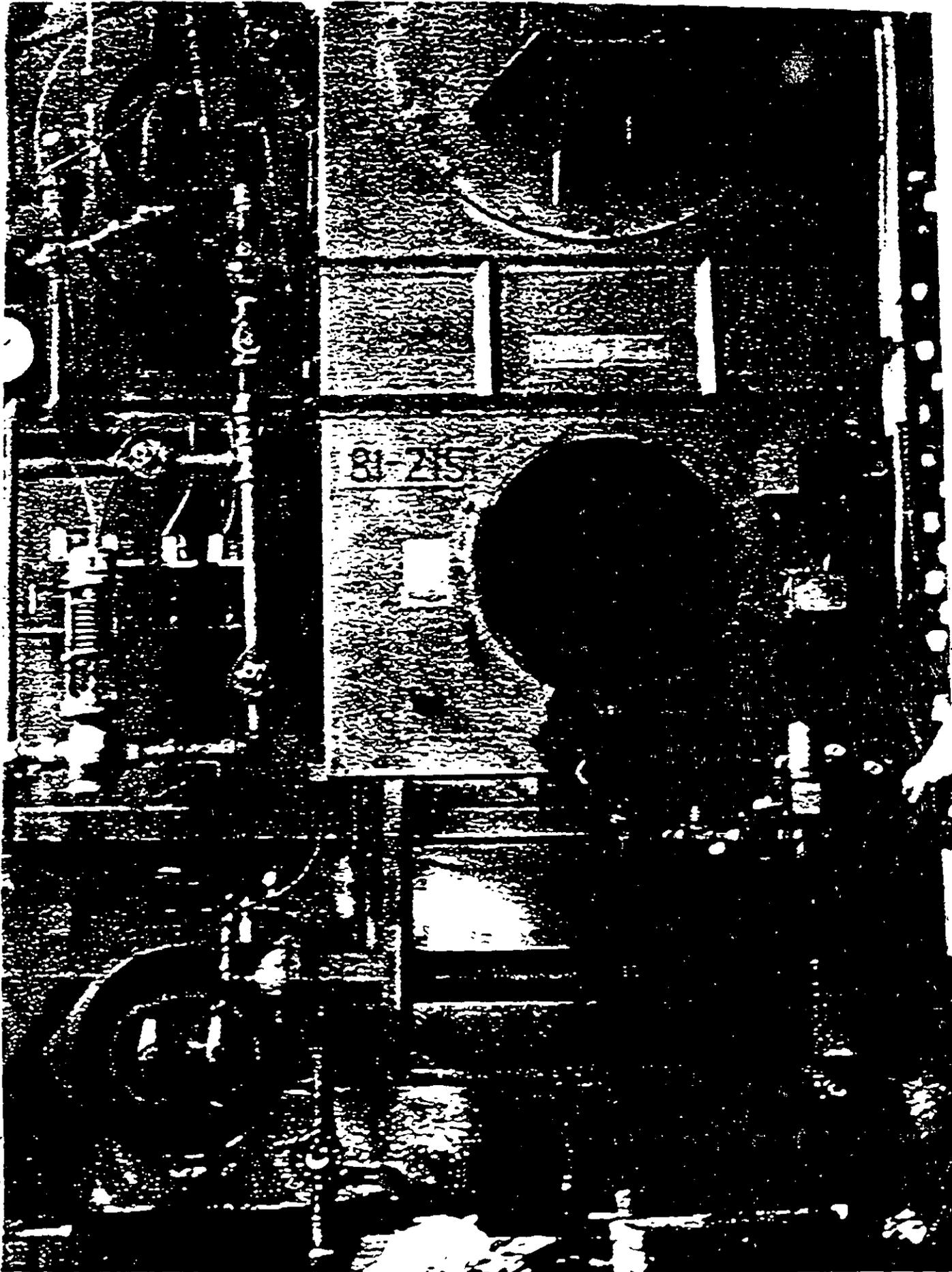
VISTA LATERAL

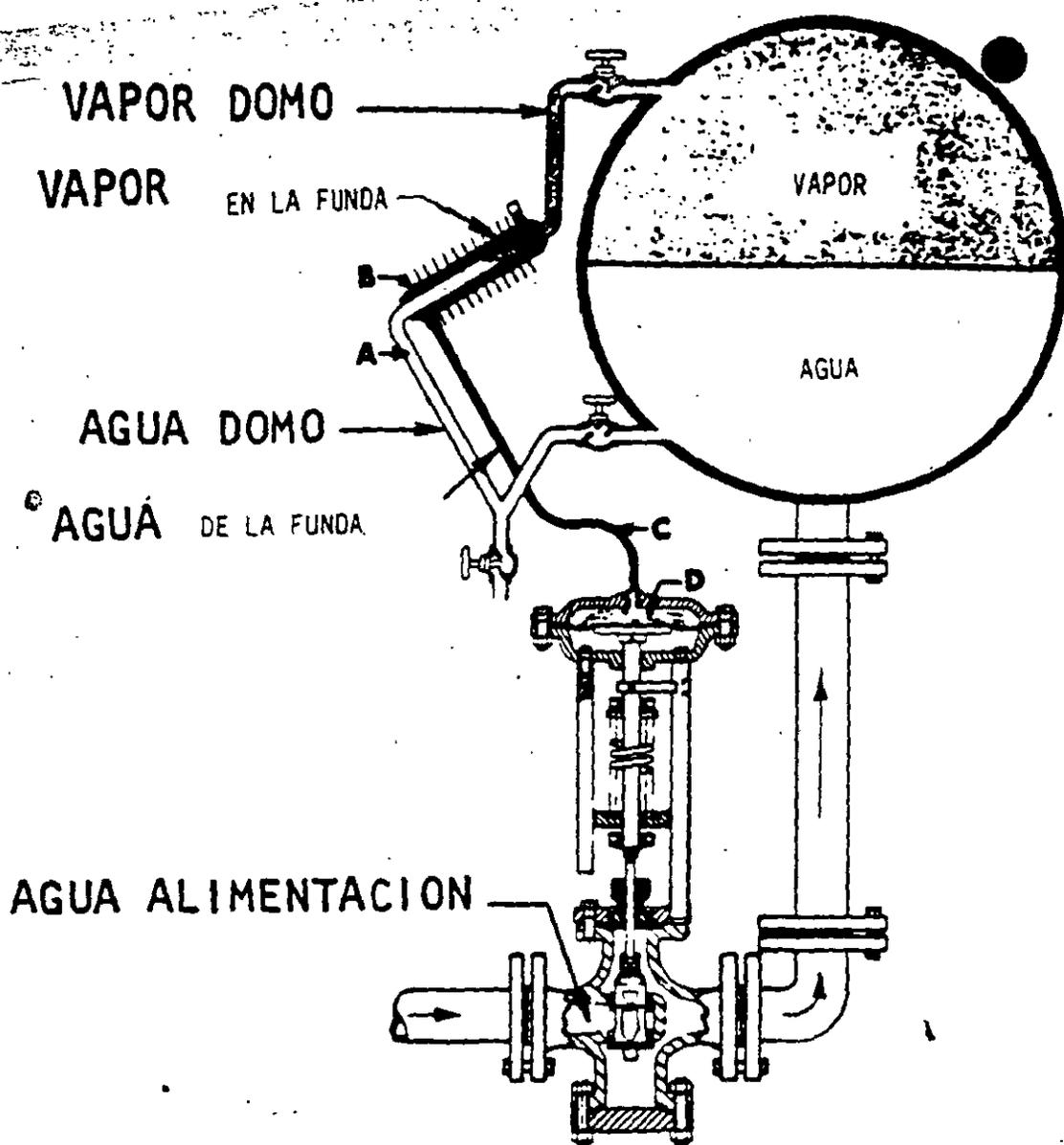


DETALLE FRO DE AJUSTES DE LOS ELECTRODOS



VISTA FRONTAL DEL DIFUSOR

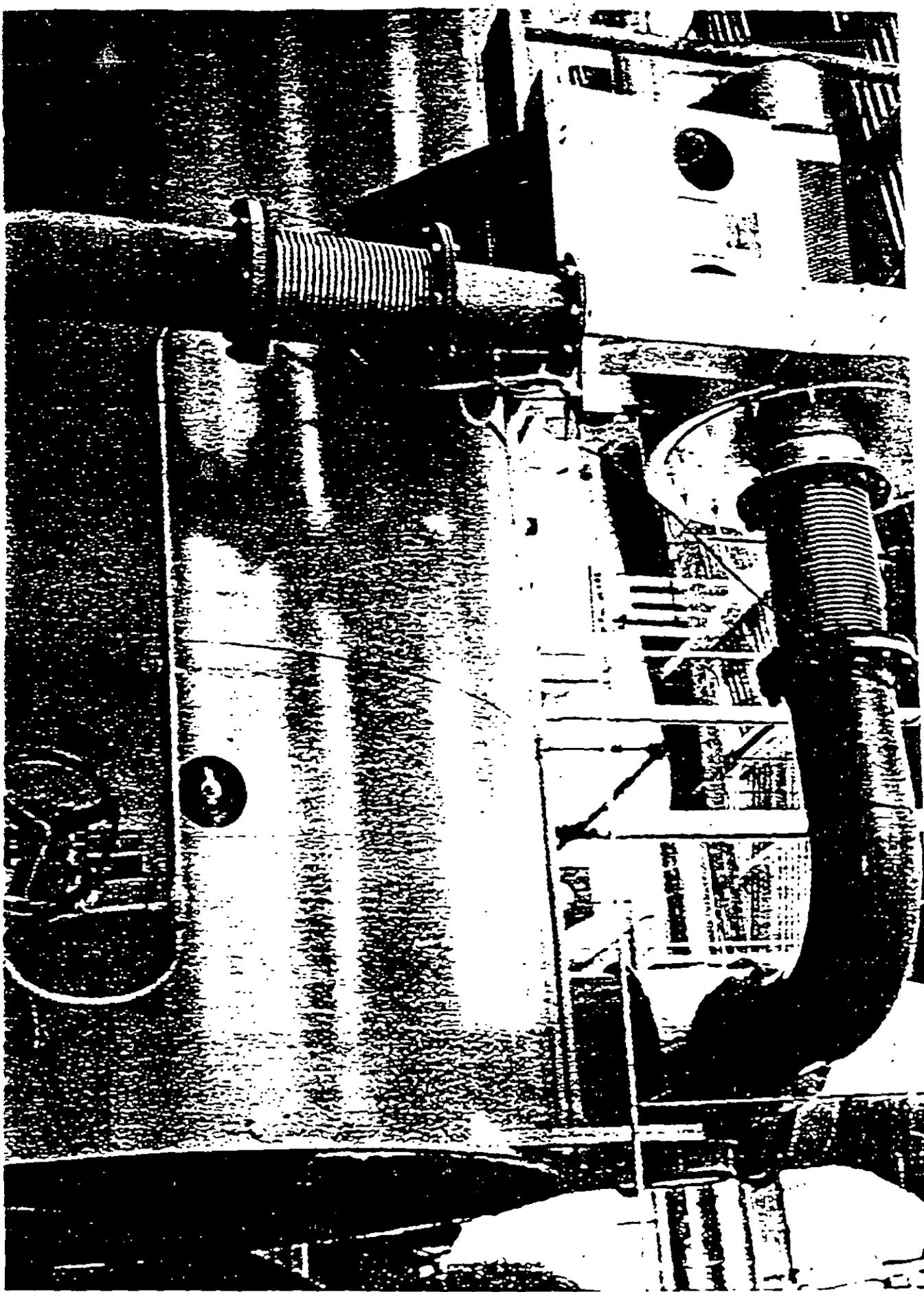




SISTEMA DE ALIMENTACION DE AGUA  
TIPO CONTINUO

GENERADORES DE VAPOR  
+r PERIODO 1991

A.C.C.





SUBSECRETARIA DE ECOLOGIA  
DIRECCION GENERAL DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACION AMBIENTAL  
DIRECCION DE ESTUDIOS

SEDE  
SUBSECRETARIA DE ECOLOGIA  
19 1991  
DIRECCION DE INGENIERIA

MEDICION DE GASES Y PARTICULAS EN DUCTOS Y CHIMENEAS DE LAS FUENTES FIJAS

INSTRUCTIVO DE PLATAFORMAS Y PUERTOS DE MUESTREO (CCAT - FF- 001- A)

LOS CONDUCTOS O CHIMENEAS DE LAS OPERACIONES Y PROCESOS INDUSTRIALES CON DIAMETROS INTERNOS, MENORES A 30 CENTIMETROS Y HASTA 10 CENTIMETROS Y SUS EQUIVALENTES, DEBERAN INSTALAR PLATAFORMAS Y PUERTOS PARA EL MUESTREO DE EMISIONES CONTAMINANTES DE ACUERDO A LAS INDICACIONES SIGUIENTES:

1.- PLATAFORMAS.

1.1.- LAS PLATAFORMAS O ANDAMIOS DEBERAN SER SUPERFICIES CAPACES DE SOPORTAR UNA CARGA DE 150 kg, CON ASCENSO DE ALTA SEGURIDAD Y DE ESPACIO SUFICIENTE PARA LA FACILIDAD DE MANIOBRA AL OPERADOR, FUDIENDO SER ESTAS FIJAS O DESMONTABLES

1.2.-SE DEBERA CONTAR CON UN CONTACTO PARA SUMINISTRO DE CORRIENTE ELECTRICA MONOFASICA (60 Hz. C.A. 127 volts. 15 AMP.)

1.4.-DEBERA TENER SUFICIENTE ILUMINACION Y PROTECCION NECESARIA PARA EVITAR CORTOS CIRCUITOS.

2.- PUERTOS (ORIFICIOS).

2.1.-PARA CONDUCTOS O CHIMENEAS CIRCULARES DEBERAN COLOCAR ORIFICIOS DE MUESTREO NECESARIOS SEGUN INCISO 2.3.3

2.2.-PARA SECCIONES DIFERENTES A LA CIRCULAR DEBEN COLOCARSE EL NUMERO DE PUERTOS NECESARIOS QUE CUMPLAN CON EL CRITERIO MINIMO DE PUNTOS A MUESTREAR (INCISOS 2.3, 2.4, 2.5).

2.3.-PARA SECCIONES CUADRADAS O RECTANGULARES, SE DEBERA CALCULAR EL DIAMETRO EQUIVALENTE A UNA SECCION CIRCULAR CON LA SIGUIENTE EXPRESION:

$$D = \sqrt{L \cdot B} / 0.785$$

DONDE :

D = DIAMETRO INTERNO EQUIVALENTE.

L = LARGO DE LA SECCION INTERNA DEL CONDUCTO.

B = ANCHO DE LA SECCION INTERNA DEL CONDUCTO.

2.4.-PARA EL CASO DE CONDUCTOS O CHIMENEAS DE SECCION TRANSVERSAL DIFERENTE A LA CIRCULAR, CUADRADAS O RECTANGULARES: EL DIAMETRO EQUIVALENTE SE DEBERA CALCULAR CON LA SIGUIENTE EXPRESION:

DONDE: D = DIAMETRO EQUIVALENTE DE LA SECCION TRANSVERSAL  
A = AREA INTERNA DE LA SECCION TRANSVERSAL  
P = PERIMETRO INTERNO DE LA SECCION TRANSVERSAL

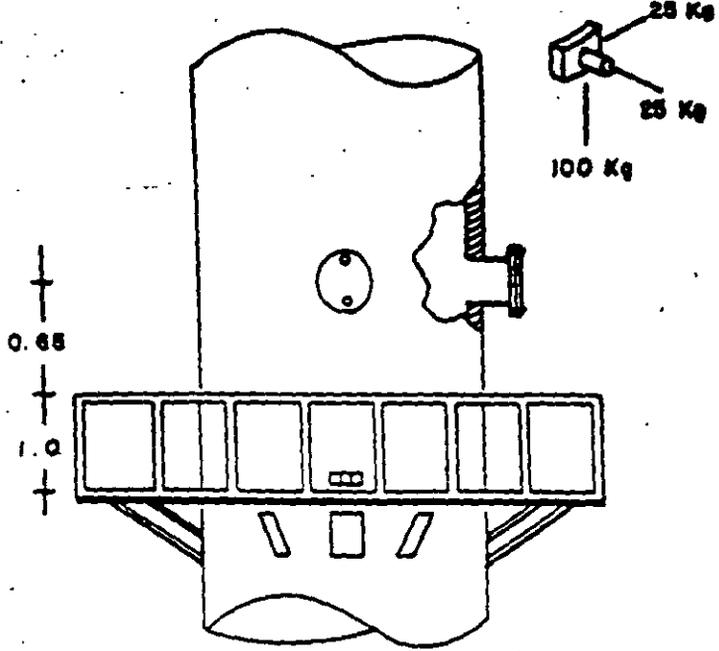


FIG. 4

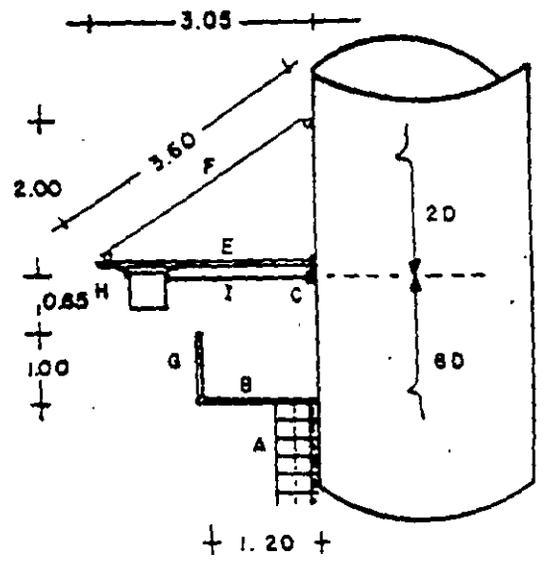


FIG. 5

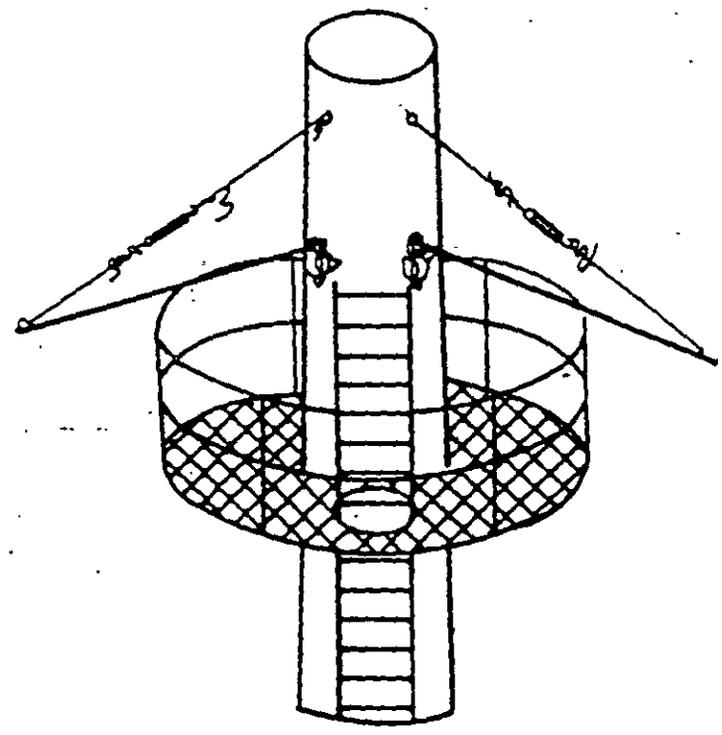


FIG. 6

FIG. 4: VISTA LATERAL DE PUERTOS Y PLATAFORMA PARA MUESTREO

FIG. 5: PERFIL DE PUERTOS Y PLATAFORMA PARA MUESTREO

FIG. 6: INSTALACION COMPLETA DE PUERTOS Y PLATAFORMA DE MUESTREO

## COMPETENCIA CONSTITUCIONAL DE LAS AUTORIDADES DEL TRABAJO

**Artículo 527.** La aplicación de las normas de trabajo corresponde a las autoridades federales, cuando se trate de:

## I. Ramas industriales:

1. Textil;
2. Eléctrica;
3. Cinematográfica;
4. Hulera;
5. Azucarera;
6. Minera;
7. Metalúrgica y siderúrgica, abarcando la explotación de los minerales básicos, el beneficio y la fundición de los mismos, así como la obtención de hierro metálico y acero a todas sus formas y ligas y los productos laminados de los mismos;
8. De hidrocarburos;
9. Petroquímica;
10. Cementera;
11. Calera;
12. Automotriz, incluyendo autopartes mecánicas o eléctricas;
13. Química, incluyendo la química farmacéutica y medicamentos;
14. De celulosa y papel;
15. De aceites y grasas vegetales;
16. Productora de alimentos, abarcando exclusivamente la fabricación de los que sean empacados, enlatados o envasados o que se destinen a ello;
17. Elaboradora de bebidas que sean envasadas o enlatadas o que se destinen a ello;
18. Ferrocarrilera;
19. Maderera básica, que comprende la producción de aserradero y la fabricación de triplay o aglutinados de madera;
20. Vidriera, exclusivamente por lo que toca a la fabricación de vidrio plano, liso o labrado, o de envases de vidrio; y,
21. Tacabalera, que comprende el beneficio o fabricación de productos de tabaco.

## II. Empresas:

1. Aquéllas que sean administradas en forma directa o descentralizada por el Gobierno federal;
2. Aquéllas que actúen en virtud de un contrato o concesión federal y las industrias que les sean conexas, y.

## **Sistemas de Calidad**

*Expositor:* Ing. Manuel Cabrera Moreno

# SISTEMAS DE CALIDAD

Ing. Manuel Cabrera Moreno

Ante el reto de tener que participar en un mercado común con los países de Norteamérica, (los cuales nos llevan una ventaja tecnológica de varios lustros), y también ya en forma inminente con los países Sudamericanos, es imperativo que nuestro país eleve su nivel de desarrollo industrial y organizacional, a fin de que las Empresas, Organizaciones y personas con actividades empresariales sean realmente competitivas en los mercados tanto nacionales como internacionales. De esta situación surge la necesidad de optimizar, en plazos cada vez más cortos, todos los recursos a disposición de las Empresas, Organizaciones y personas.

Esto básicamente implica que los cuerpos directivos de las mismas tienen que efectuar e impulsar una serie de acciones que permitan disminuir los costos, incrementar la eficiencia de sus procesos y la productividad tanto de sus procesos como de su personal, aumentar los ingresos y mantener los márgenes de utilidad. (Si es que quieren sobrevivir)

Estas condiciones no se puedan cumplir si no es haciendo las cosas bien a la primera vez (y a la segunda y a la tercera y a la cuarta y a la etc.) y con **cero defectos**.

Lo anterior se dice fácil, pero requiere de un gran esfuerzo, prácticamente de toda la Organización o de la Empresa para lograrlo

**J. Harrington**, uno de los expertos en Calidad Total, señala que el proceso de mejoras continuas **NO** se inicia con una nueva técnica de análisis y solución de problemas o con el establecimiento de una rutina de Control Estadístico del Proceso, sino cuando cada uno de los trabajadores sabe lo que debe de hacer y como hacerlo correcta y eficientemente.

Para aplicar en principio anterior en cualquier Empresa u Organización, al trabajador se le deben definir claramente las operaciones que debe realizar y los resultados que se esperan de su trabajo

Lo anterior se conoce como un conjunto de especificaciones, normas y/o procedimientos, y estas pueden ser de características, proceso, de prueba o del producto o servicio en forma global

En el pasado, en nuestro país, las Normas de calidad se orientaban a que los productos o servicios terminados cumplieran con un mínimo de ciertos requisitos. Prácticamente, el campo de las especificaciones y el de los procedimientos estaba desierto o totalmente descuidado

Actualmente, con la expansión y apertura de los mercados, los sistemas de calidad abarcan toda la Empresa u Organización buscando garantizar que el producto, bien o servicio que se ofrecen, se entreguen dentro de un marco muy estricto de especificaciones de construcción, de funcionamiento, de apariencia, de embalaje, de información y además, que se entregue

Los clientes quieren tener la seguridad de que la Empresa u Organización con la que contratan sus suministros, cuentan con un Sistema de Calidad dentro de su proceso, el cual permita que las entregas del producto o servicio sean siempre con el cabal cumplimiento de lo especificado en la publicidad o material promocional, en el contrato o en la orden de compra y dentro del plazo de entrega pactado.

Anteriormente, si el producto o servicio no cumplían con las especificaciones o fallaban durante su operación, se sustituía por otro igual.

Actualmente lo que interesa al comprador o al usuario final es contar con el producto o servicio para satisfacer la demanda del mercado o sus necesidades intrínsecas y todo esto a precios competitivos.

Para efecto de ayudar a las empresas y organizaciones establecidos dentro del país en la selección e implementación de sus Sistemas de Calidad, la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial publicó en 1990 un conjunto de Normas diseñadas a orientar a los empresarios y Organizaciones sobre los diversos sistemas de calidad que han demostrado tener éxito dentro de la industria y el comercio a nivel mundial.

Estas Normas están contenidas dentro de la serie NOM-CC desde la 1 hasta la 8. (Actualmente, a raíz de la publicación de la Ley Federal de Metrología y Normalización, la serie cambió su código de identificación a NMX-CC de la 1 a la 8).

Con estas Normas lo que se busca es proporcionar la orientación necesaria para que cada empresa u organización, de acuerdo a su tipo de producto o servicio, elabore y tenga dentro de un Manual del Sistema de Calidad, las Políticas, la Organización, los Procedimientos de Proceso, los Métodos de Prueba y los Criterios de Aceptación que le permitan asegurar la entrega de su producto o servicio dentro de la calidad anunciada o especificada por sus clientes y que estos sean entregados dentro de los plazos convenidos.

En estas Normas es significativo:

- a) El compromiso de la Alta Dirección en todo el proceso, especialmente en cuanto a la definición documentada de los objetivos de la Empresa, en la emisión de la Políticas de Calidad, apariencia y funcionamiento, en la delegación de Autoridad y responsabilidades y en la definición de las funciones de cada individuo dentro de la Organización.
- b) La definición y establecimiento por escrito de las características y especificaciones que debe cumplir el producto, muchas veces más allá de lo indicado en las Normas Oficiales aplicables, los métodos de trabajo, los procedimientos de prueba, tanto parciales como finales, es decir, tanto dentro del proceso como al producto o servicio terminados.
- c) El establecimiento de un Sistema de Auditorías internas las cuales se efectúan en forma periódica para comprobar la eficacia del sistema.

Aquí cabe mencionar que, el hecho de documentar los objetivos, las políticas, especificaciones, los métodos y los procedimientos no va a traer automáticamente sino que requiere de un esfuerzo coordinado de todos los integrantes de la Organización para obtenerla.

En la práctica, los mayores éxitos se han obtenido cuando el Manual del Sistema de Calidad han elaborado los propios trabajadores en sus distintos estratos, ya que ellos son los que tienen un pleno conocimiento de lo que hacen y como lo hacen.

Esto además trae otro beneficio ya que, al revisar los métodos y procedimientos que se han empleado tradicionalmente, simplemente durante su redacción y escritura, siempre es posible mejorarlos y eliminar de los mismos operaciones ineficientes.

La Capacitación y la Reeducción de todo el personal resalta como la necesidad más perentoria en el desarrollo e implantación de un Sistema de Calidad, ya que, si no se cuenta con personal adecuadamente entrenado y que conozca a fondo las políticas y objetivos de las Organizaciones, los métodos de trabajo, los procedimientos de prueba y los criterios de aceptación, la producción de bienes o servicios tendrá altibajos con el consiguiente deterioro de la calidad.

Es evidente que, también se necesita un liderazgo con la capacidad de cumplir y hacer cumplir lo consignado en el Manual del Sistema de Calidad, logrando que todo el personal participe y se apegue (en forma completamente voluntaria e incondicional) en la búsqueda de una meta común, o sea, en la realización de los objetivos de la Empresa.

También es importante no perder de vista que tanto la Calidad como la Productividad son procesos mucho muy complejos y NO programas a corto plazo, por lo que es necesario diseñar una estrategia general que contenga las actividades programadas y la retroalimentación de resultados obtenidos.

Durante el proceso de implantación de un Sistema de Calidad se requiere de trabajo sostenido en equipo, en donde todo el personal, incluyendo a directivos y sindicato (en donde lo hay esta condición es mandatoria y prevaleciente), estén directamente involucrados comprometidos en lograr los objetivos de la organización.

Los primeros logros que se obtienen son una mejor utilización de los recursos, disminuir los desperdicios y los retrabajos, posibilitando la subsistencia de la Organización como fuente de trabajo.

O como una fuente de trabajo con mejores posibilidades de desarrollo o de ingresos para el trabajador y como una empresa más rentable para los propietarios o accionistas.

Abundando, actualmente es indispensable que toda empresa u organización cuente con un Sistema de Calidad ya que, para la comercialización de productos o servicios, tanto como fuera del territorio nacional, es cada vez más exigible.

**Entrando en poco en la la materia:**

### **¿ Qué es Calidad ?**

Calidad es cumplir con los requisitos especificados, ya sea que éstos sean enunciados directa o indirectamente.

Esto quiere decir que la calidad es un compromiso que se establece, (directa o indirectamente) entre un vendedor de bienes o un prestador de servicios y un comprador o usuario de los mismos para suministrar un bien o un servicio con características específicas definidas por medio de un contrato, una publicidad, (la cual puede ser por medio de catálogos, anuncios, etc), o un pedido u orden de compra con las especificaciones requeridas.

### **¿ Qué es Control ?**

Control es ejercer autoridad sobre algo para regularlo

Esto quiere decir que controlar un actividad es ejercer una autoridad sobre la misma va sea por medio de una orden, un procedimiento, un instructivo, un Reglamento, una Ley, una Norma, etc. por medio del cual se regulan las características, funcionamiento o actividad de todas y cada una de las partes, personas, procesos o mecanismos involucrados en la realización o tienen funciones dentro de esa actividad.

### **Desarrollo del concepto de Calidad**

En sus inicios, allá por mediados del siglo pasado, tanto en los Estados Unidos de Norteamérica como en Inglaterra se dieron los primeros pasos para controlar la Calidad, debido sobre todo a las presiones que sobre los productos se ejerció con la expansión industrial y con el auge comercial y consecuente competencia que de ella emanó.

### **¿ Cómo se hacía ?**

Los supervisores, capataces o jefes de los talleres fueron los primeros responsables de ejercer el Control de la Calidad y lo hacían de forma personal, cada uno muy de acuerdo a su muy particular manera de pensar y de enfocar las cosas, todo esto aún dentro de una misma Organización. Para controlar la calidad de los productos que ellos fabricaban, los jefes de los talleres tomaron las siguientes medidas.

- \* Ellos decían **QUE** revisar
- \* Ellos decían **COMO** revisar
- \* Ellos decían **QUIEN** revisaba

- \* Ellos decían **CUANDO** revisar
- \* Ellos determinaban que productos terminados "**PASABAN**" y por lo tanto podían salir de la planta.

Como puede verse, al no haber una Norma o estandar de referencia, cada jefe de taller definía la calidad de lo que fabricaba en función de su criterio personal por lo que en el mercado había una gran cantidad de productos que se parecían o se decía que podían hacer la misma función, pero que, en la realidad no cumplían con las funciones o características que anunciaban, muchas veces aún y cuando procedieran de la misma fábrica.

Aquí nacieron conceptos tales como primera calidad, segunda calidad, tercera calidad, etc., los cuales fueron creados y acuñados por los usuarios al medir:

- \* El precio
- \* La duración
- \* La confiabilidad
- \* La facilidad para conseguir refacciones y que estas le "quedaran" al producto original

Para resolver esta situación tan desordenada y caótica, mucha gente, en todo el mundo, y principalmente en los países con más industrias, se pusieron a pensar en cómo hacer para solucionar el problema, apareciendo sistemas en gran cantidad, los cuales se aplicaron en algunos procesos o productos específicos con mucho éxito, pero que no se podían aplicar a todos los procesos o a todos los productos.

Entre las posibles soluciones al problema que sí tuvieron aplicación a la mayor parte de los procesos y/o productos, fue presentada a principios de este siglo por Federico Taylor el cual desarrolló un sistema denominado "**Método de Organización Científica del Trabajo**", entre cuyos principios los más sobresalientes dicen que:

- \*\* La inspección es una función especializada diferente al trabajo de producción.
- \*\* Es indispensable el acuerdo entre los distintos fabricantes de productos similares en cuanto a sus características básicas.

Este sistema y sus proposiciones marcaron el inicio de la creación y establecimiento de estándares y especificaciones tanto de los materiales empleados como de las condiciones de proceso y dimensionales de los mismos, además de que ayudó a definir los métodos y aparatos de prueba correspondientes, regulando y normalizando así las características de los productos disponibles en el mercado.

Las ventajas que se obtuvieron con la "Inspección de Control de Calidad" o, como también se llamó, el "Control de la Calidad de Inspección en Proceso" fueron las siguientes:

- + Ahorros de dinero. (Esto se consigue al disminuir o eliminar los retrabajos y la chatarra).
- + Se mejoró la imagen de las compañías al vender únicamente productos de primera calidad.
- + Se logró obtener la satisfacción de los clientes al adquirir productos comerciales estandarizados que si cumplían lo que ofrecían.
- + Las reclamaciones por garantía disminuyeron, ahorrándose las compañías los gastos que requerían para mantener talleres de servicio, además de los originados por las reclamaciones legales que por fallas les presentaban.
- + Al tener productos más confiables, disminuyeron los accidentes al utilizarlos

Entre los inconvenientes de este sistema, fué que los inspectores de calidad:

- Seguían reportando al jefe del taller
- Su única responsabilidad era revisar los productos terminados y separar los buenos de los malos antes de que fueran entregados al cliente.
- Eran muy costosos ya que cobraban y "no producían nada"

Debido al desarrollo de la industria, también creció la competencia entre las distintas empresas fabricantes de productos similares, por lo que el precio de venta de los productos se convirtió en un factor determinante para el desarrollo y supervivencia de las mismas.

Todas las Empresas enfocaron sus esfuerzos a la reducción de costos con la condición de conservar la calidad de sus productos, por lo que se ejerció una presión extraordinaria para reducir los "Costos de Inspección".

Como resultado de estas investigaciones, en la década comprendida entre 1920 y 1930, surge con mucha fuerza un nuevo sistema conocido como el "Control Estadístico del Proceso", entre cuyos principios más destacados están los siguientes:

- La razón de tengan que existir una gran cantidad de inspectores en el proceso, en el ensamble y en el producto terminado (Calidad Final) son las variaciones no confiables en los procesos de fabricación
- Se deben estudiar las variaciones en los procesos para poder determinar el nivel de calidad que puede esperarse de cada proceso en particular

- \* La inspección al 100 % de los productos terminados (todos) no garantiza la calidad de los productos al 100 %

Entre las herramientas que utiliza estan:

- a) Estudios a fondo de la capacidad real de las máquinas y las herramientas utilizadas en cada proceso o parte de él, para conocer que tan confiable y repetitivo es
- b) El desarrollo y utilización de técnicas y tablas de muestreo para que con el hecho de revisar una parte de un lote de producción se apruebe o rechaze todo el lote, disminuyendo los costos de inspección.
- c) El diseño de experimentos para definir la confiabilidad de los materiales especificados, de los productos, de los distintos procesos, de los métodos de muestreo, etc

Este sistema tuvo tanto éxito que la mayoría de las empresas lo adoptaron de inmediato para controlar la calidad de sus productos llegando al grado que la Sociedad Americana de Control de Calidad (ASQC) en los Estados Unidos de Norteamérica, definió al control de calidad como "La aplicación práctica de la estadística a los problemas industriales".

Ya dentro de las aplicaciones, es cierto que con la estadística:

- + Se identifican y conocen los principales problemas a que se enfrenta la producción serie de artículos y/o componentes
- + Se mide la extensión de cada problema
- + Se conoce la naturaleza de cada problema.

Pero desgraciadamente, la estadística por sí sola no hace que desaparezcan los problemas de producción por lo que continuaron los problemas de calidad, confiabilidad y costo en todas las empresas.

Para resolver toda la problemática ya expuesta, se usaron como herramientas para controlar la calidad y la confiabilidad de los productos una gran cantidad de sistemas mixtos, y entre los que más destacaron, fueron los desarrollados por la industria militar norteamericana, que en 1940 usó un sistema mixto en el cual al "Control Estadístico del Proceso" le sumaron el "Control de Calidad". Este sistema en uno de sus principales postulados dice:

"Se requiere una acción positiva para acabar con el problema y no propiamente por la gente de estadística "

En 1950, el Dr. A. V. Feigenbaum desarrolla y presenta al mundo un nuevo concepto al que nombra "Control Total de la Calidad"

El "Control Total de la Calidad" se basa en:

- \* El Control Total de la Calidad se inicia con el diseño del producto y termina cuando el cliente y/o el usuario permanecen satisfechos con el uso del producto o servicio suministrado.
- \* Las cosas deben hacerse bien a la primera vez
- \* Los defectos se pueden prevenir, por lo que las rutinas de inspección pueden ser reducidas y/o eliminadas.

Esto se consigue ejecutando 4 actividades básicas:

1) Control estricto de nuevos diseños.

Y en su caso, revisar y rediseñar los productos que ya estén en producción y presenten problemas de fabricación o durante su uso o funcionamiento.

2) Control de material recibido.

Solo se deber usar en producción materiales que cumplan plenamente con las especificaciones determinadas por los diseñadores.

3) Control del producto

Se deber producir bajo procesos especificos previamente aprobados por el grupo de ingenieria los cuales deben definir la maquinaria, las velocidades óptimas, las herramientas y dispositivos que deben emplearse y esto para cada etapa u operación del proceso.

4) Estudios especiales del proceso

Cuando se presenten desviaciones en relación a los resultados esperados, se deberán estudiar a fondo las condiciones y variables del mismo, para resolverlas y aumentar la confiabilidad del mismo.

Todas estas actividades serán ejecutadas por un "Grupo de Ingeniería de Control de Calidad".

Este grupo medirá y analizar los esfuerzos de todos los demás dentro de cada organización.

# Marcando los errores

# Dando información para que se efectuen acciones correctivas

Entre los inconvenientes que se encontraron a este sistema, (el cual a final de cuentas es la estadística sumada a los programas de calidad), está el que la gente involucrada en lo de producción considere normal que:

- No pueden hacer un trabajo perfecto y por lo tanto, cometerán errores.
- Se debe permitir un cierto porcentaje de errores
- Los procesos nunca son perfectos y producen partidas y/o lotes malos

El problema, y al final de cuentas la razón del fracaso de todos los sistemas antes descritos para garantizar la calidad de los productos, bienes o servicios, es que nunca tomaron en cuenta a las personas que ejecutaban los trabajos, encargando siempre la vigilancia de los mismos y sus resultados a personas diferentes a las que los hacían, encargando el papel de policías a personas que muchísimas veces desconocían el proceso y únicamente valoraban resultados, sin tener la posibilidad de efectuar correcciones a los mismos.

Cuando se empieza el Programa Apolo (NASA), el proyecto técnico e industrial más importante de todos cuantos haya elaborado el ser humano en toda su historia, cuyos objetivos principales fueron.

- 1) Hacer llegar una nave a la luna
- 2) Situar a un hombre en la misma

Ante objetivos de esa dimensión, los sistemas de calidad anteriormente descritos, conjuntamente y complementados por el sistema de "Control Total de la Calidad" resultaron inaceptables para la realización de este tipo de proyectos, tanto por el tiempo de ejecución del proyecto, su costo y el riesgo en que iban a estar varias vidas humanas.

Para realizarlo, los directores del programa Apolo tuvieron que partir de las siguientes consideraciones:

- + LOS ERRORES SON EVITABLES
- + LOS ERRORES SON CAUSADOS POR FALTA DE ATENCION
- + LOS ERRORES SON CAUSADOS POR FALTA DE INTERES
- + LOS ERRORES SON CAUSADOS POR NO IDENTIFICARSE CON EL TRABAJO

Con base en las consideraciones y premisas anteriores, desarrollaron un nuevo sistema el cual actualmente conocemos como "Aseguramiento de la Calidad"

El sistema en general está basado en

1) Todas las acciones que afecten la calidad del producto deben ser ejecutadas dentro de una metodología específica, previamente definida, para obtener desde la primera vez un producto final que cumpla las especificaciones y el nivel de calidad planeado.

2) El aseguramiento de la calidad NO es un paquete de funciones asignadas a una persona o a un departamento específico, sino que abarca a todas y a cada una de las personas involucradas, directa o indirectamente, en el proceso productivo de cada parte o componente.

3) El aseguramiento de la calidad es una serie de políticas, métodos y procedimientos claramente establecidos y que deberán estar perfectamente comprendidos, aplicados a todas las funciones dentro de una Organización que afecten o puedan afectar la calidad del producto o servicio en su fase final u operativa.

Como puede verse, este sistema es la suma de toda la experiencia adquirida a lo largo de 150 años en el control de la calidad, pero que además incorpora en su planeación, ejecución y control al elemento principal, es decir, a las personas que efectúan físicamente las actividades productivas.

Este sistema pone como condición para su desarrollo y óptimo funcionamiento el que todas y cada una de las personas que integran una organización de producción de bienes o de servicios cumplan con las siguientes condiciones:

- + Que estén totalmente comprometidos e involucrados con la Organización en la que prestan sus servicios, es decir, "que traigan puesta la camiseta".
- + Que todas las personas que realizan trabajos que afecten o puedan afectar la calidad del producto, estén debidamente capacitados para la realización de los trabajos que se les encomienden. En el caso que no lo estén, así lo notifiquen a su jefe inmediato superior para que éste les de las instrucciones mínimas pertinentes.
- + La participación activa de todos y cada uno en la detección de los problemas de su área de trabajo, compenetrándose en cada situación problemática y participando en la solución.

Si se cumplen las premisas antes expuestas, se podrán producir bienes o servicios de acuerdo con la definición actualmente aceptada de la CALIDAD aún y cuando ésta se encuentra en el plano filosófico:

"LA CALIDAD ES LA SATISFACCION PLENA DE TODO AQUEL QUE RECIBE NUESTROS PRODUCTOS, BIENES O SERVICIOS, PERO PARA NOSOTROS COMO SERVIDORES Y/O COMO PRODUCTORES, SERA LA SUBLIME EXPRESION DE NUESTRO SER, UNA PARTE DE NOSOTROS MISMOS" ACTUAR Y PRODUCIR CON CALIDAD ES NUESTRA REALIZACION PLENA COMO SERES HUMANOS

Aquí es importante remarcar la importancia del sistema, en cada uno de los actos de la vida diaria, ya que, como podrán ver, éste es aplicable a todas las actividades humanas.

Para entrar en ese camino, es necesario:

- Desaprender lo inadecuado.

Esto es, dejar de lado todas aquellas actitudes que nosotros, intimamente, sabemos que no nos han dado los resultados que deseamos o que otros esperan de nosotros.

+ Aprender lo adecuado.

Comprometemos con nosotros mismos a realizar nuestro mejor esfuerzo, de acuerdo a nuestra capacidad personal, en todas y cada una de las actividades que tengamos que realizar, en cualquier medio en que nos encontremos o desarrollemos

+ El cuidado diario de todos y cada uno de los pequeños detalles, en todas y cada una de las actividades que tengamos que realizar, donde quiera que nos encontremos.

+ Ver el futuro **NO** como el **POR-VENIR** sino como el **POR-HACER**

Cada uno de nosotros tenemos la capacidad de poder cambiar nuestro futuro y nuestro destino por medio de nuestras acciones.

+ No resolvemos nada con el **PRE-OCUPARNOS** y en cambio si obtenemos nuestras realizaciones con el **OCUPARNOS**.

Occuparnos en forma dinámica y positiva en cada una de las cosas que tengamos que realizar, con un compromiso personal en cada una.

AL FINAL DE CUENTAS, LA CALIDAD ES UNA ACTITUD ANTE LA VIDA, ES UNA MANERA DE ENFRENTAR AL MUNDO Y A LAS DIFICULTADES QUE NOS PRESENTA TODOS LOS DIAS Y EN TODAS NUESTRAS ACTIVIDADES Y QUE, SOLAMENTE MEDIANTE UN FUERTE COMPROMISO PERSONAL PODREMOS ENFRENTAR CON POSIBILIDADES DE TENER EXITO.

Las enseñanzas básicas que podemos obtener de lo anterior son:

Somos **LO QUE** hacemos, Somos **COMO** lo hacemos, Si lo hago bien, **SERE** mejor

Los productos y servicios los hacen las **PERSONAS**, no las maquinas

Hagamos productos y servicios con **EXCELENCIA** para estar orgullosos de lo que hacemos

Por esta razón, toda Organización conciente de su responsabilidad ante los usuarios y consumidores de sus productos y/o servicios, (que finalmente somos todos), debe adoptar, poner en marcha y mantener para la producción de los mismos, un sistema de "Aseguramiento de la Calidad" para ser competitivos en el mercado nacional y poder garantizar a los usuarios y al público en general, la absoluta confiabilidad de sus productos y servicios.

Como ya se mencionó anteriormente, la SECOFI publicó durante 1990 las Normas Mexicanas de la serie "Sistemas de Calidad" conocidas como "Serie CC".

Estas Normas son traducciones y adaptaciones de las Guías y Normas de la Serie ISO 9000 originales, internacionalmente aceptadas.

De entre éstas, las más usuales para las actividades industriales, de prestación de servicios y de pruebas finales son:

- ISO 8402 "VOCABULARIO", la cual es equivalente a la NMX-CC-1
- ISO 9000 "GUÍA PARA LA SELECCIÓN Y EL USO DE NORMAS DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD", equivalente a la Norma NMX-CC-2.
- ISO 9001 "MODELO PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD APLICABLE AL PROYECTO/DISEÑO, LA FABRICACIÓN, LA INSTALACIÓN Y EL SERVICIO", equivalente con la Norma Mexicana NMX-CC-3
- ISO 9002 "MODELO PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD APLICABLE A LA FABRICACIÓN E INSTALACIÓN", equivalente con la NMX-CC-4
- ISO 9003 "MODELO PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD APLICABLE A LA INSPECCIÓN Y PRUEBAS FINALES", equivalente con la NMX-CC-5

Como veremos a continuación, cada una de estas normas contiene una serie de requisitos que se deben cumplir para asegurar la calidad, siendo la más completa y exigente la relativa al proyecto/diseño, fabricación, instalación y servicio de bienes o servicios. La más sencilla es la relacionada con la inspección y pruebas finales.

Cada persona u organización debe seleccionar de entre los distintos modelos el que sea aplicable a su actividad o a la actividad en la que quiera asegurar la calidad mediante un sistema.

Una vez escogido el modelo en base a las necesidades particulares deberán iniciarse una serie de actividades desde la más fácil que es la elaboración del Manual del Sistema de Calidad junto con la del Manual de Procedimientos, hasta la más complicada que es la implementación de cada sistema dentro de cada Organización, es decir, crear la "Cultura de Calidad"

Algunas de entre las empresas más exitosas, han requerido de asesoría externa para dicha implantación, y han comenzado a obtener resultados a partir del segundo año de aplicación de los sistemas.

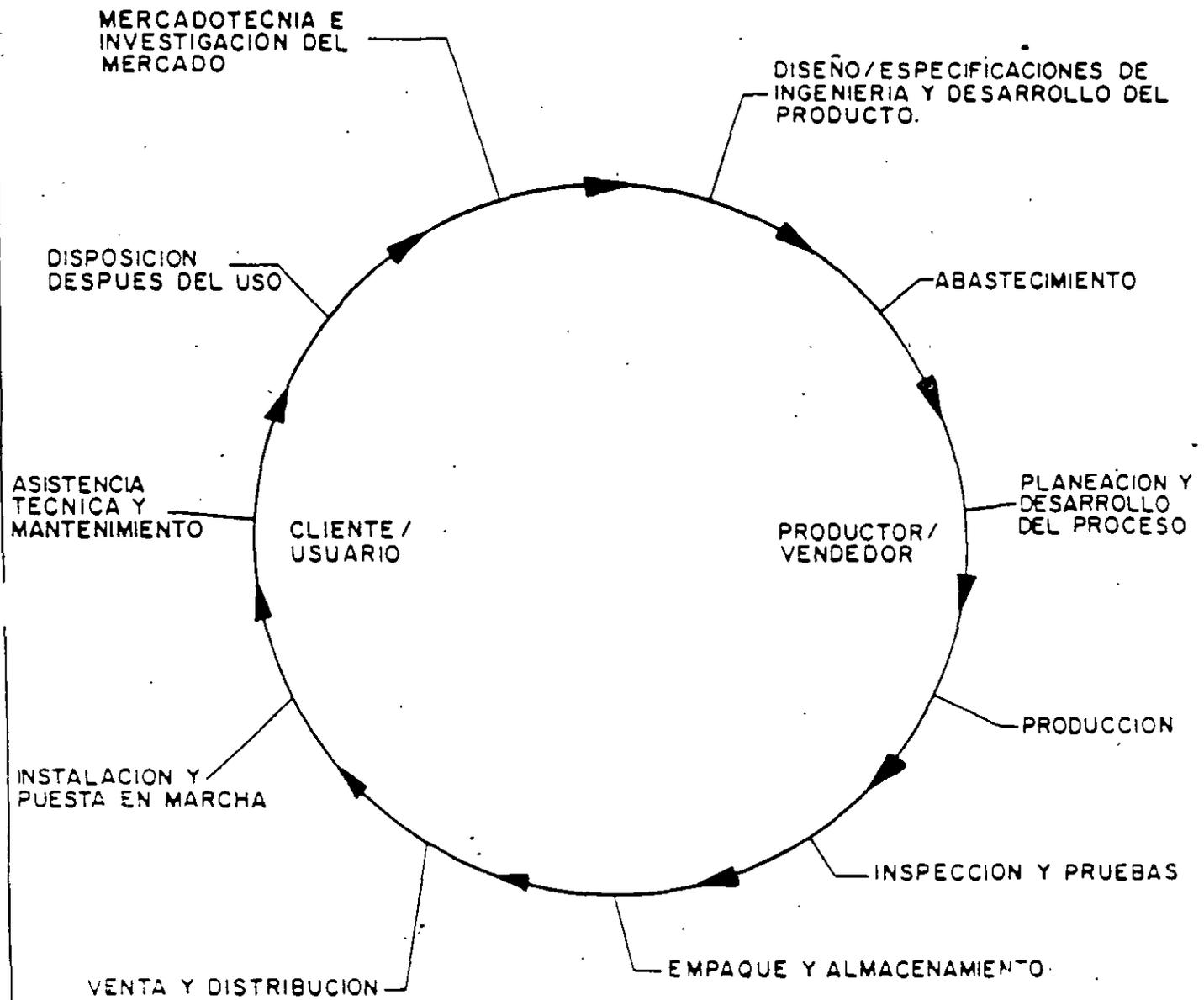
Por lo anterior, es recomendable elaborar planes y programas de evaluación continua de las dificultades y resultados conforme se vayan obteniendo a fin de retroalimentar continuamente la implantación del sistema y evitar sorpresas desagradables.

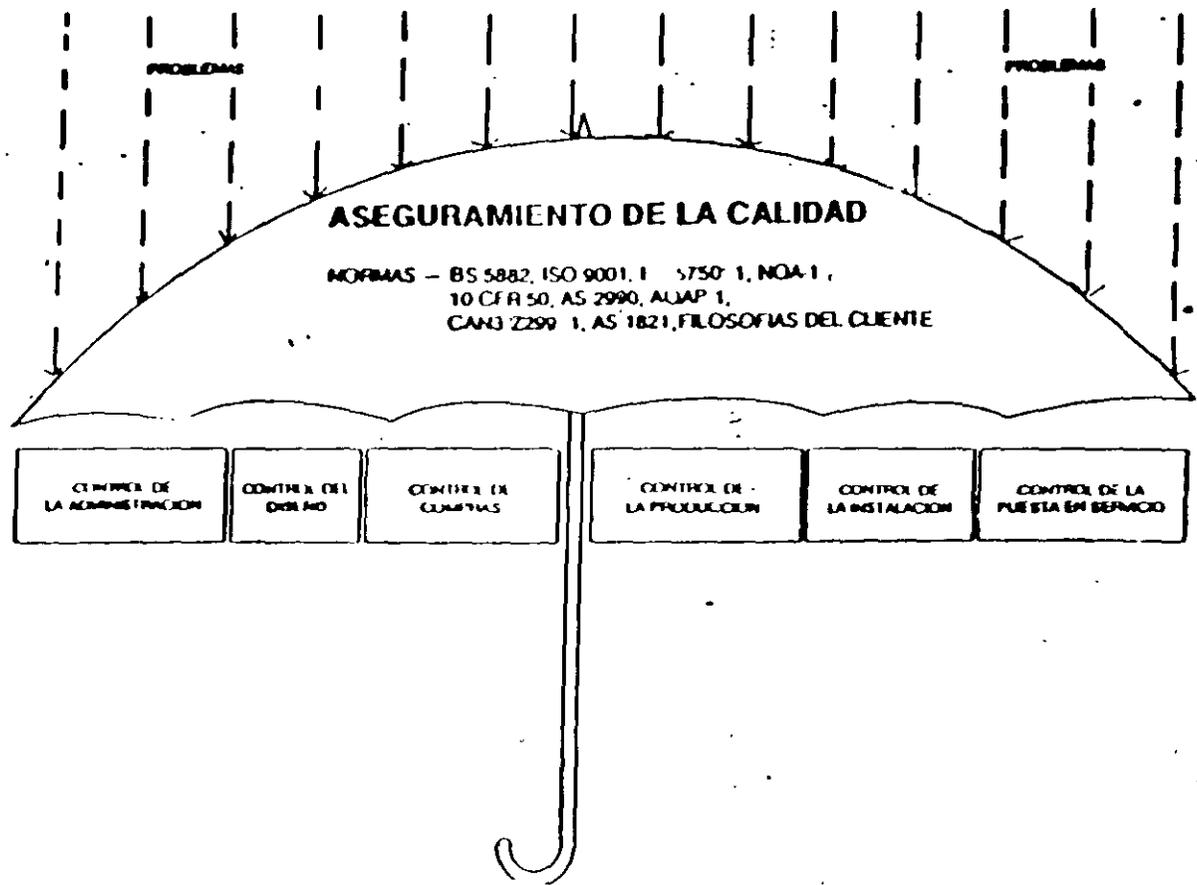
Así también, se debe tener mucho cuidado para contratar asesoría externa ya que el mercado tanto nacional como internacional está plagado de personas y empresas que ofrecen estos servicios pero que jamás aseguran resultados, ni proveen programas de valoración y retroalimentación en la implantación de los sistemas propuestos.

En la siguiente tabla, se presentan los tres modelos de sistemas de Aseguramiento de la Calidad más usuales en donde podemos observar las diferencias sustanciales entre ellos.

De su observación y análisis podemos definir cual es el más adecuado y aplicable a cada organización en particular.

# CIRCUITO DE LA CALIDAD





Organización para la calidad

Fig - El paraguas del aseguramiento de la calidad

75

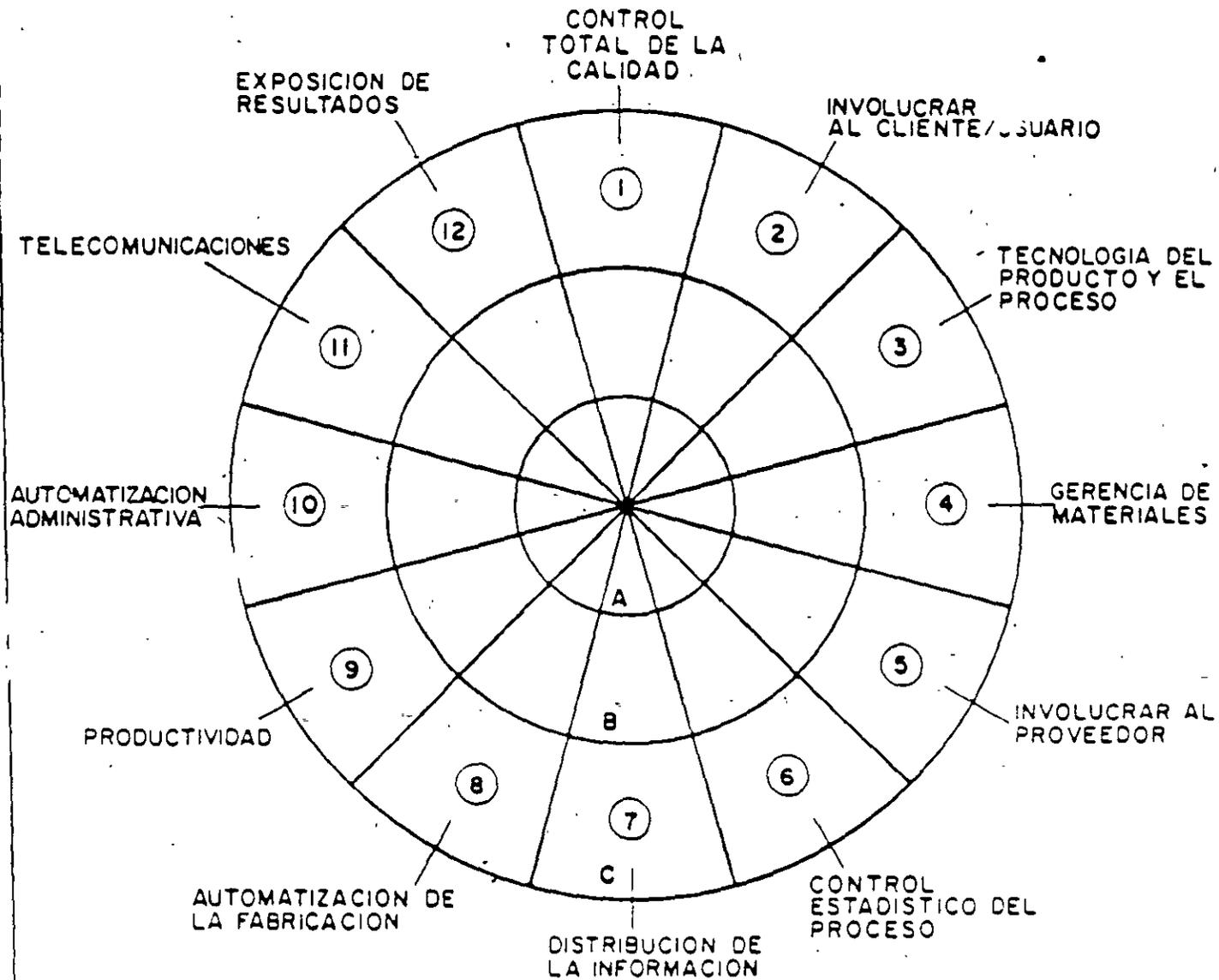
**COMPARACION ENTRE MODELOS DE PROGRAMAS**

SISTEMA DE CALIDAD SEGUN MODELO DE NORMA >>>> EQUIVALENTE CON ISO-		CC-3	CC-4	CC-5
		9001	9002	9002
1	PROGRAMA DE CALIDAD	*	*	*
2	ORGANIZACION	*	*	*
3	AUDITORIAS AL SISTEMA	*	*	*
4	DOCUMENTOS DE SISTEMA DE CALIDAD: MANUAL	*	*	
	PROCEDIMIENTOS DE INSPECCION Y PRUEBAS	*	*	*
5	CONTROL DE PRODUCCION Y PROCESO	*	*	
6	PLANEACION (REVISION DEL CONTRATO)	*	*	*
7	CONTROL DE DISEÑO	*		
8	DOCUMENTACION Y CONTROL DE CAMBIOS	*	*	*
9	EQUIPO DE INSPECCION, MEDICION Y PRUEBAS	*	*	*
10	CONTROL DE MATERIAL COMPRADO Y DE SERVICIOS	*	*	*
11	INSPECCION EN LA RECEPCION	*	*	*
12	MATERIAL SUMINISTRADO POR EL COMPRADOR (SC)	*	*	
13	INSPECCION DURANTE EL PROCESO	*	*	*
14	INSPECCION FINAL	*	*	*
15	MUESTREO	*	*	*
16	SITUACION DE LA INSPECCION	*	*	*
17	IDENTIFICACION Y RASTREABILIDAD	*	*	
18	MANEJO Y ALMACENAMIENTO	*	*	*
19	INSTRUCCIONES DE TRABAJO	*	*	*
20	PROCESOS ESPECIALES	*	*	
21	CONSERVACION, EMPAQUE Y EMBARQUE	*	*	
22	REGISTROS	*	*	*
23	MATERIALES NO CONFORMES CON LO ESPECIFICADO	*	*	*
24	ACCION(ES) CORRECTIVA(S)	*	*	*
25	ENTRENAMIENTO	*	*	*

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD EN UNA INSTALACION  
SEGUN MODELO ISO-9002 (NOM CC-4)

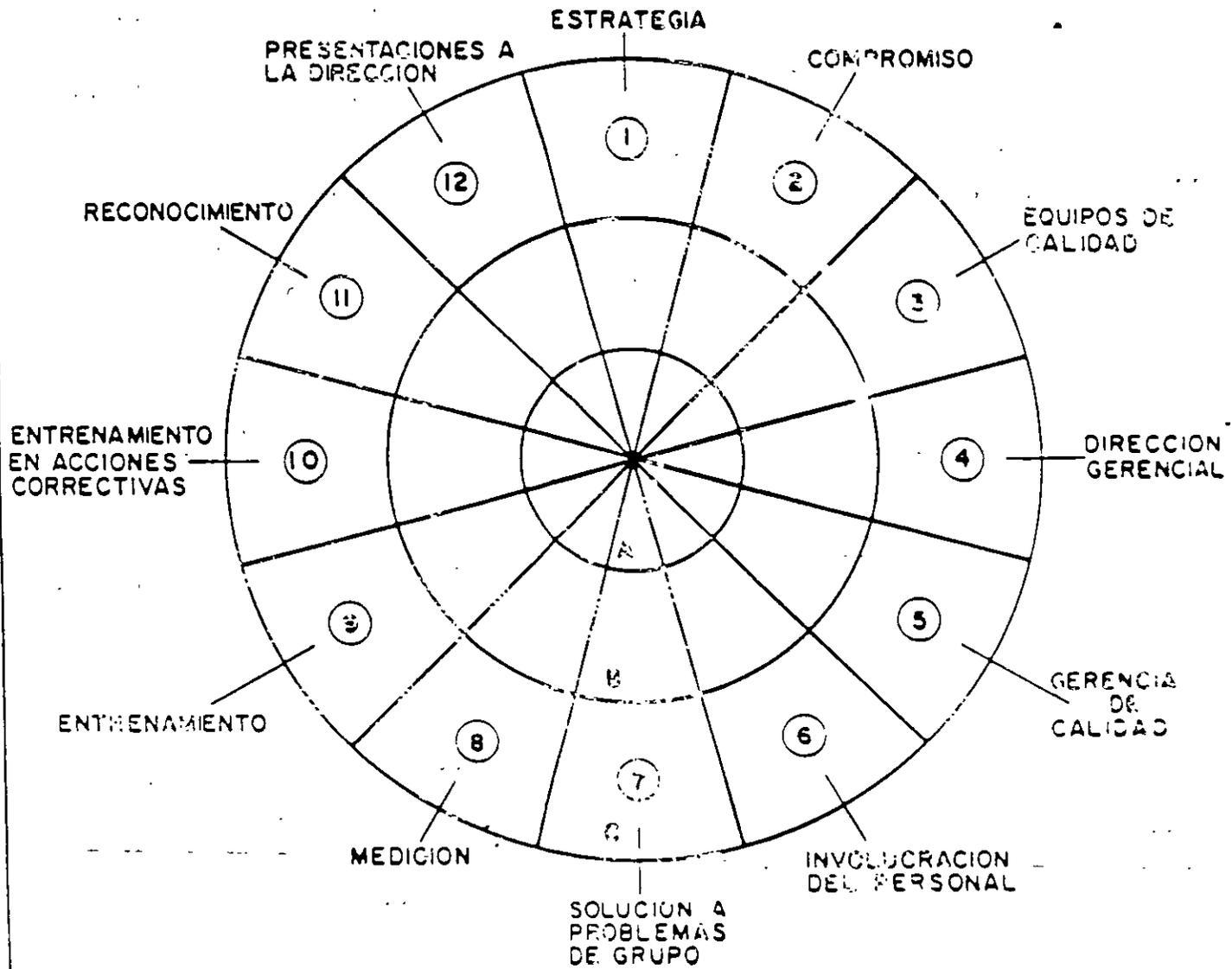
1	INSTRUCCIONES DE TRABAJO	RECEPCION DE: PLANOS ISOMETRICOS ESPECIFICACIONES
2	PLANEACION	ESTUDIO FISICO DEL TERRENO CONDICIONES GENERALES
3	ORGANIZACION	QUIEN LA EJECUTA, QUIEN LA DIRIGE, QUIEN SUPERVISA
4	ENTRENAMIENTO	ENTRENAMIENTO PRACTICO POR ESPECIALIDADES
5	CONTROL DE MATERIALES COMPRADOS	VERIFICACION DE CANTIDADES, MARCAS, MODELOS, MEDIDAS, TIPOS
6	REGISTROS/REFERENCIAS	CERTIFICADOS DE CALIDAD, INSTRUCTIVOS, FACTURAS
7	CONTROL DE MATERIALES FUERA DE ESPECIFICACION	MARCADO, SEGREGACION Y DEVOLUCION
8	CONTROL DE PRODUCCION	CONTROL EN ROSCADO, ENSA LIMPIEZA, PREPARACION
9	CONTROL DE EQUIPOS DE MEDICION Y PRUEBAS	FLEXOMETROS, CALIBRADORES, MANOMETROS
10	PROCESOS ESPECIALES	SOLDADURA, DOBLECES,
11	INSPECCION DURANTE EL PROCESO (NDT)	INSPECCION VISUAL DE ACABADO PREPARACION, LIMPIEZA,
12	INSPECCION Y PRUEBA DEL PRODUCTO TERMINADO	INSPECCION VISUAL, PRUEBAS DE HERMETICIDAD
13	ACCION(ES) CORRECTIVA(S)	ELIMINAR FUGAS, CALIBRAR REGULADORES,
14	PROTECCION DEL PRODUCTO	PINTURA, MARCADO, ETIQUETADO
15	ENTREGA FORMAL DE LA INSTALACION	ENTREGA PLANOS, FIRMAS OJO

# CREACION DEL SISTEMA DE CALIDAD



A= ALTA DIRECCION  
 B= GERENCIA MEDIA Y ESPECIALISTAS  
 C= SUPERVISORES Y OBREROS

# CREACION DE LA CULTURA DE CALIDAD



A: ALTA DIRECCION  
 B: GERENCIA MEDIA Y ESPECIALISTAS  
 C: SUPERVISORES Y OBREROS



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**DIPLOMADO EN INGENIERÍA DE CALDERAS Y  
RECIPIENTES SUJETOS A PRESIÓN**

**MODULO IV: INGENIERÍA DE COMBUSTIÓN  
E INSTALACIONES**

**TEMA:**

**COMBUSTIÓN, EJERCICIOS DE APLICACIÓN**

**EXPOSITOR: ING. ALFREDO SÁNCHEZ FLORES**

**PALACIO DE MINERÍA  
1997**



Diplomado en Ingeniería de Calderas.  
Módulo 4 . Tema : Combustión.  
Ejercicios de aplicación.

Elaborados por :  
Ing. Alfredo Sánchez Flores.  
Fecha : junio • 17 • 1995.

---

1. En una caldera se requieren quemar 500 kg/h de diesel combustible. El fabricante especifica que el equipo debe operar con un exceso de aire del 10 % para alcanzar un rendimiento de combustión del 96 %. Dado lo anterior, el aire entra a las condiciones atmosféricas de 27 °C y 1 bar, y los gases de combustión salen a 150 °C.

Determinar el gasto de aire real que se requiere par la combustión completa y el flujo térmico que produce al quemar el combustible.

---

2. Se proyecta un horno para la industria alimenticia con una capacidad de 1500 kW. El combustible a usar debe ser metano, el cual llega al horno a una presión de 1.8 bar y 40 °C . Si el aire atmosférico disponible entra a 1 bar y 27 °C y los gases de combustión salen a 200 °C, determinar :

- a) El consumo de combustible a condiciones normales y de trabajo, y
- b) El gasto de aire (seco) necesario para la combustión adoptando 5 % de exceso.

NOTA : En los ejercicios 1 y 2 la combustión es completa.

---

3. Determinar los productos de la combustión completa al quemarse gasóleo, compuesto por una mezcla del 80 % diesel y 20 % de combustóleo (de Minatitlán, Ver.). Expresarlo en composición másica y molar, asumiendo 15 % de exceso de aire.

---

4. Determinése lo mismo que en 3 pero úsese como combustible gas LP de composición típica : 80 % de butano y 20 % de propano. ¿ Qué tanto cambia la composición de los gases si la combustión se realiza en Acapulco y/o en Querétaro, Qro. ?

①.

Solución

El diesel tiene una composición

$$C = 84.6 \%$$

$$H_2 = 9.7 \%$$

$$S = 2.70 \%$$

$$N_2 = 1.0 \%$$

$$W = 1.5 \%$$

$$Z = 0.5 \%$$

$$\underline{\Sigma = 100\%}$$

Tomando la ecuación empírica.

$$\begin{aligned} PCI &= 33.913C + 143.188 \left( h - \frac{1}{8}o \right) + 9.3S \\ &\quad - 2.5(9h + w) \\ &= 33.913(0.846) + 143.188(0.097) + 9.3(0.027) \\ &\quad - 2.5(0.097 \times 9 + 0.015) \end{aligned}$$

$$PCI = 40,610 \frac{kJ}{kg}$$

$$PCS = 42,830 \frac{kJ}{kg}$$

$$\begin{aligned}
 O_{\min} &= \frac{22.41}{12} \left[ c + 3 \left( h - \frac{O-S}{8} \right) \right] \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgC}} \\
 &= \frac{22.41}{12} \left[ 0.846 + 3 \left( 0.097 + \frac{0.027}{8} \right) \right] \\
 &= 2.14 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgC}}
 \end{aligned}$$

$$X_{\min} = \frac{2.14}{0.21} = 10.19 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgC}}$$

Aire para la combustión

$$X = X_{\min} (1 + 0.10) = 11.20 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgC}}$$

Aire real (para 27°C y 1 bar)

Valor corregido

$$\begin{aligned}
 X_{\text{real}} &= X \times \frac{P_n}{T_n} \frac{T_r}{P_r} = 11.20 \times \frac{(1.01325)}{(273.15)} \frac{(273.15 + 27)}{(1)} \\
 &= 12.47 \frac{\text{m}^3}{\text{unitario}}
 \end{aligned}$$

~~Gasto volumétrico kgC de aire real corregido~~

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_{\text{real}} &= 12.47 \times 500 = 6235 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (\text{total}) \\
 &= 1.732 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

A la salida

$$\Delta V_{pmin} = X_{min} + \Delta V \quad V_p = X + \Delta V$$

$$\Delta V = \frac{22,41}{12} \left( 3 \times 0,097 + \frac{2}{3} (0,015) \right) =$$

$$= \frac{0,599}{0,562} \frac{Nm^3}{kgc}$$

$$V_p = 11,20 + \frac{0,599}{0,562} = 11,762 \frac{Nm^3}{kgc}$$

con factor de corrección

$$V_{pc} = 11,762 \times \frac{1,01325}{(273,15)} \times \frac{(150 + 273,15)}{1}$$

$$V_{pc} = 18,46 \frac{m^3}{kgc}$$

Gasto real de gases de combustión

$$\dot{V}_{pc} = V_{pc} \times \dot{m}_c = 18,46 \times 500 = 9230 \frac{m^3}{h}$$

$$= 2,564 \frac{m^3}{s}$$

Flujo térmico.

$$\dot{Q} = \dot{m}_c PCI \times \eta_{comb.} = \frac{500}{3600} \times 40,610 \times 0,96 = \underline{\underline{5,41}} \text{ k}$$

# ~~1a Parte~~ 1a Parte <sup>①</sup>

Un gas combustible se compone de los siguientes gases simples:

$$r_{H_2O} = 30\% ; r_{CH_4} = 20\% ; r_{C_2H_6} = 5\% ; r_{C_3H_8} = 6\% ; r_{CO} = 4\% ;$$

$$r_{CO_2} = 17\% ; r_{C_2H_2} = 8\% ; r_{C_4H_8} = 6\% \text{ y } r_{N_2} = 4\%$$

~~1a Parte~~

- Las fracciones másicas ;
- La constante de la mezcla y
- La densidad en condiciones normales.

## SOLUCION

a) Usando la ecuación de conversión :

$$X_1 = \frac{r_1 M_1}{\sum r_1 M_1}, \text{ donde } \sum r_1 M_1 = M_m \text{ y arreglado en forma de}$$

tabla:

GAS	$M_1$	$r_1$	$r_1 M_1$	$X_1$
$H_2$	2.061	0.30	<sup>0.6183</sup> 0.6048	0.026
$CH_4$	16.032	0.20	3.2064	0.139
$C_2H_6$	30.048	0.05	1.5024	0.065
$C_3H_8$	44.064	0.06	2.6438	0.114
CO	28.000	0.04	1.1200	0.048
$CO_2$	44.000	0.17	7.4800	0.323
$C_2H_2$	26.016	0.08	2.0813	0.090
$C_4H_8$	56.064	0.06	3.3638	0.145
$N_2$	28.000	0.04	1.1200	0.048

$$M_m = \sum 23.136$$

$$\rho = \frac{M}{V_n} = \frac{23.136}{22.41} = 1.0323 \frac{kg}{Nm^3}$$

De donde:

$$M_m = \sum_1 M_1 = 23.123 \text{ kg/kmol}$$

~~23.123~~  
23.136

b)

$$R_m = \frac{R_u}{M_m} = \frac{8314.41 \text{ J/Kmol K}}{23.123 \text{ kg/Kmol}} = 359.573 \text{ J/kg K}$$

~~23.123~~  
23.136

c) La densidad en condiciones normales se puede determinar aplicando la ecuación de estado y utilizando  $R_m$ ,  $P_o = 1.01325 \text{ Pa}$  y  $T_o = 0^\circ\text{C}$ ; o también por la relación:

$$\frac{M_m}{V_n} = \rho$$

Donde:

$$V_n = 22.41 \text{ y que es el volumen normal molar expresado en } m^3\text{N/kmol}$$

Entonces:

$$\rho = \frac{23.123}{22.410} = 1.032 \text{ kg/m}^3\text{N}$$

$$\rho = \frac{23.136}{22.41} = 1.03239 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}$$

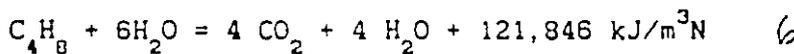
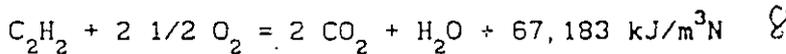
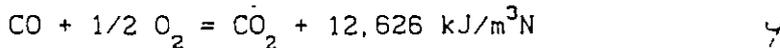
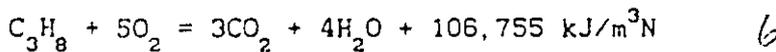
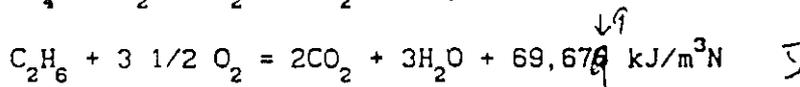
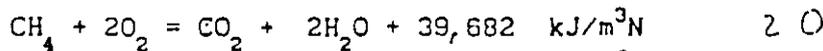
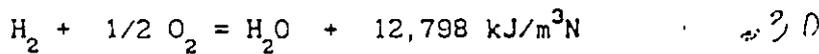
# 2ª-Parte Determinar

~~Para efectuarse la combustión del gas tratado en el problema anterior se requiere la presencia de oxígeno. Determinar:~~

- a) El aire teórico o estequiométrico necesario en condiciones normales y...
- b) El poder calorífico superior de la mezcla en  $\text{kJ/m}^3\text{N}$  y  $\text{kJ/kg}$ .

## SOLUCION.

- a) El  $\text{CO}_2$  y el  $\text{N}_2$  no reaccionan, en cambio, para los demás componentes se establecen las siguientes ecuaciones de balance químico.



De dichas ecuaciones, se determinan las cantidades de oxígeno según sea el componente que se requiere desde el punto de vista teórico. Entonces:

$$\begin{aligned} \text{O}_{\text{min}} &= 0.5 \text{r}_{\text{H}_2} + 2 \text{r}_{\text{CH}_4} + 3.5 \text{r}_{\text{C}_2\text{H}_6} + 5 \text{r}_{\text{C}_3\text{H}_8} + 0.5 \text{r}_{\text{CO}} + 2.5 \text{r}_{\text{C}_2\text{H}_2} + \\ &\quad + 6 \text{r}_{\text{C}_4\text{H}_8} \\ &= 0.5 \text{r}_{\text{H}_2} + 2 \text{r}_{\text{CH}_4} + 3.5 \text{r}_{\text{C}_2\text{H}_6} + 5 \text{r}_{\text{C}_3\text{H}_8} + 0.5 \text{r}_{\text{CO}} + 2.5 \text{r}_{\text{C}_2\text{H}_2} + \\ &\quad + 6 \text{r}_{\text{C}_4\text{H}_8} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 0.5 \cdot 0.30 + 2 \cdot 0.20 + 3.5 \cdot 0.05 + 5 \cdot 0.06 + 0.5 \cdot 0.04 \\
&+ 2.5 \cdot 0.08 + 6 \cdot 0.06 \\
&= 0.15 + 0.40 + 0.175 + 0.30 + 0.02 + 0.20 + 0.36 \\
&= 1.605 \frac{\text{m}^3 \text{N (Oxígeno)}}{\text{m}^3 \text{ (Combustible)}}
\end{aligned}$$

Por lo que el aire seco mínimo para la combustión se determina por:

$$X_{\min} = \frac{O_{\min}}{0.21} = \frac{1.605}{0.21} = 7.643 \frac{\text{m}^3 \text{N (aire)}}{\text{m}^3 \text{N (combustible)}}$$

b) El poder calorífico de la mezcla de gases se determina por la relación: (Superior)

$$\text{PCS} \quad X_{\text{In}} = \sum_{j=1}^n \text{PCS} (H_1)_j \cdot r_j$$

Donde:

$(H_1)_j$  se expresa en  $\text{kJ/m}^3 \text{N}$  y es el poder calorífico inferior del  $j$ -ésimo componente.

De acuerdo al orden de los datos del enunciado:

$$\begin{aligned}
\text{PCS}_{\text{gas}} &= 12,798 \cdot 0.30 + 39,682 \cdot 0.20 + 69,679 \cdot 0.05 + \\
&+ 106,755 \cdot 0.06 + 12,626 \cdot 0.04 + 67,183 \cdot 0.08 + \\
&+ 121,846 \cdot 0.06 = 34,855.5 \text{ KJ/m}^3 \text{N}
\end{aligned}$$

$$\text{PCS} = \frac{34,855.5}{1.03239} = 33,761.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\begin{aligned}
&2839.4 + 7926.4 + 3483.95 + \\
&+ 6405.3 + 509.04 + 5374.64
\end{aligned}$$

$$7310.76$$

## Tercera Parte

Calcular el volumen de los productos de la combustión completa tomando los datos de los problemas 3 y 4, si el aire admitido tiene 7 gramos de agua por cada kilogramo de aire seco.

El volumen total de los productos de la combustión de 1 metro cúbico de gas combustible en condiciones normales, se compone de los volúmenes parciales de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y de vapor de agua  $\text{H}_2\text{O}$ , es decir:

$$V_{P_{\min}} = V_{g_s} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{g+a}$$

Donde:

$V_{\text{H}_2\text{O}}^{g+a}$  es la suma del vapor de agua formado por los gases (g) y  $\text{H}_2\text{O}$  del aire <sup>atmosférico</sup> seco (a).

El volumen de los gases secos es igual a:

$$V_{g_s} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}$$

El volumen de  $\text{CO}_2$  resulta de la combustión del:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_4\text{H}_8$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ; además del gas contiene  $\text{CO}_2$ . Por lo tanto de las ecuaciones de reacción:

$$V_{\text{CO}_2} = r_{\text{CH}_4} + 2r_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3r_{\text{C}_3\text{H}_8} + r_{\text{CO}} + 2r_{\text{C}_2\text{H}_2} + 4r_{\text{C}_4\text{H}_8} + r_{\text{CO}_2}$$

El volumen de  $\text{N}_2$  se compone del que trae el combustible y del aportado por el aire:

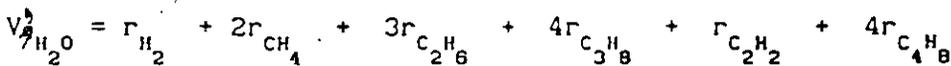
$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}(\text{gas}) + V_{\text{N}_2}(\text{aire}) = r_{\text{N}_2} + 0.79 X_{\min}$$

Entonces:

$$V_{g_s} = 0.2 + 2 \cdot 0.05 + 3 \cdot 0.06 + 0.04 + 2 \cdot 0.08 + 4 \cdot 0.06 + 0.17 + 0.04 + 0.79 = 7.643$$

$$V_{g_s} = 7.17 \text{ m}^3\text{N/m}^3\text{N}$$

El volumen de vapor de agua se compone del agua que se obtiene al quemarse todos los componentes excepto el CO, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. Entonces, de las ecuaciones de balance:



El volumen del vapor de agua aportado por el aire se calcula por:

$$V_{H_2O}^a = X_{min} \frac{\rho_{aire}}{\rho_{vapor\ agua}} \cdot d$$

Donde:

$$\rho_{aire} = \frac{M_{aire}}{22.41} = \frac{28.97}{22.41} = 1.293 \text{ kg/m}^3\text{N}$$

$\rho_{aire}$  es la densidad del aire en condiciones normales

$$\rho_{vapor\ agua} = \frac{M_{vapor}}{22.41} = \frac{18.016}{22.41} = 0.804 \text{ kg/m}^3\text{N}$$

$\rho_{vapor\ agua}$  es la densidad del vapor de agua en condiciones normales  
 $d$  es la humedad del aire por cada kilogramo de aire seco.

Entonces:

$$V_{H_2O}^{v+a} = 0.30 + 2 \cdot 0.20 + 3 \cdot 0.05 + 4 \cdot 0.06 + 0.08 + 4 \cdot 0.06 + 7.643 \cdot \frac{1.293}{0.805} \cdot 0.007$$

$= 10.59$

$$= 1.496 \frac{\text{m}^3\text{N} (\text{ Vapor de } \overset{\text{agua}}{\text{aire}})}{\text{m}^3\text{N} (\text{ combustible })}$$

Finalmente:

~~V<sub>p</sub> = 7.17 + 1.496 = 8.666 m<sup>3</sup>N/m<sup>3</sup>N~~

4a Parte

Encontrar el volumen de los productos de la combustión si  $\lambda = 1.15$ . Tomar los datos del problema 6.

~~Solución~~

Con exceso de aire, aumentarán los productos de la combustión, el N<sub>2</sub>, el O<sub>2</sub> y la humedad debida al aire atmosférico. Entonces:

$$V_{N_2} = r_{N_2} + \lambda \cdot 0.79 \cdot x_{\text{min}} = 0.04 + 1.15 \cdot 0.79 \cdot 7.643 = 6.98 \text{ m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N} \quad (\text{de nitrógeno})$$

$$V_{O_2} = O_{\text{min}} \cdot \delta = 1.605 \cdot 0.15 = 0.24 \text{ m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N}$$

$$V_{H_2O} = \lambda \cdot X_{\text{min}} \frac{f_{\text{aire}}}{f_{\text{vapor}}} \cdot d = 1.15 \cdot 7.643 \cdot \frac{1.293}{0.805} \cdot 0.07 = 0.0988 \text{ m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N}$$

$$V^{a+g} = 0.0988 + 1.4101 = 1.509 \text{ m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N}$$

Por lo tanto:

$$V_p = \overset{V_{CO_2}}{1.09} + \overset{N_2}{6.98} + \overset{O_2}{0.24} + \overset{V_{H_2O}}{1.509} = 9.819 \text{ m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N}$$

Despreciando la humedad y para un metro cúbico normal de combustible se tiene:

$$\sum V_i = 8.31 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

Que en fracciones volumétricas queda **en base seca**

$$\left[ r_{\text{CO}_2} \right]_p = 0.1311 ; \left[ r_{\text{O}_2} \right]_p = 0.0289 ; \left[ r_{\text{N}_2} \right]_p = 0.840$$

Obteniéndose los coeficientes característicos:

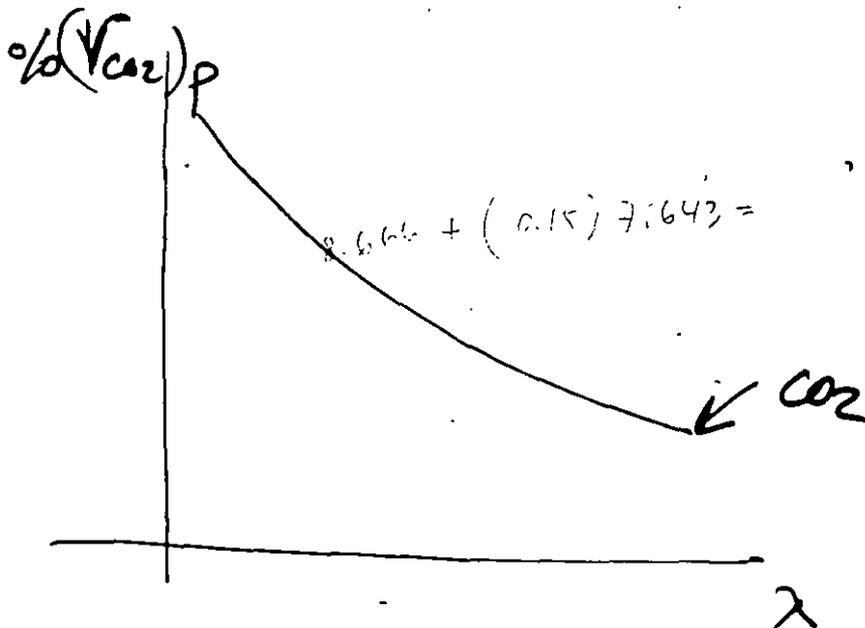
$$\sigma = \frac{O_{\min}}{\left[ \sqrt{C_{\text{O}_2}} \right]_p} = \frac{1.605}{1.090} = 1.472$$

$$\nu = \frac{\left[ r_{\text{N}_2} \right]_c}{\left[ \sqrt{C_{\text{O}_2}} \right]_p} = \frac{0.04}{1.09} = 0.037$$

Con lo que se comprueba:

$$\lambda = \frac{0.21}{\sigma} \left[ \frac{1}{\left[ \sqrt{C_{\text{O}_2}} \right]_p} + \sigma - 1 - \nu \right] = 1.15$$

Con lo que también  $V_p = V_{P_{\min}} + (\lambda - 1) X_{\min} = 9.81 \text{ m}^3 \text{N/m}^3 \text{N}$



Tomando el valor promedio del combustible según PEMEX procedente de Minatitlán Ver.

Composición masica.

C	<del>81.9%</del>	82.80%
H <sub>2</sub>	<del>10.9%</del>	10.40%
N <sub>2</sub>	<del>0.11%</del>	2.97%
S	<del>3.1%</del>	2.93%
O <sub>2</sub>		0.20%
Z		0.40%
w		0.30%

Poder Calorifico:

Según la formula (1.5) se ~~calcula~~ tiene:

$$PCI = 34.013c + 125.6h - 10.9(o-s) - 2.5(9h+w)$$

Sustituyendo:

$$PCI = 34.013(82.80 \times 10^{-2}) + 125.6(10.40 \times 10^{-2}) - 10.9[(0.2 - 2.93)10^{-2}] - 2.5[9(10.40 \times 10^{-2}) + (0.30 \times 10^{-2})]$$

$$PCI = 28.162 + 13.062 + 0.297 - 2.347 = 39.174 \text{ [MJ/kg]}$$

~~$$PCS = 34.013c + 125.6h - 10.9$$~~

$$PCS = 39.174 + 2.5(9h+w) = 39.174 + (+2.347) = 41.521 \text{ [MJ/kg]}$$

(3)

Según Them:

$$PCS = 8130c + 24300h + 1500n + 4560s - 600w - 2350o$$

$$PCS = 8130(0.8280) + 24300(0.1040) + 1500(0.0297) - 600(0.003) - 2350$$

$$PCS = \overset{6731.64+}{\cancel{6731.64}} + 2527.2 + 44.55 - 1.8 - 9.7 = \overset{2501.31 \times 4.1868}{\cancel{2501.31}} - \overset{9296.89 \times 4.1868}{\cancel{9296.89}}$$

Oxígeno necesario para la combustión:

Usando la ecuación (2.20)

$$O_{min} = \frac{8}{3}c + 8h + s - o$$

Sustituyendo:

$$O_{min} = \frac{8}{3}(0.8280) + 8(0.1040) + (0.0293) - (0.0020) =$$

$$O_{min} = 2.208 + 0.832 + 0.0293 - 0.0020 = 3.067 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg c}}$$

En unidad de volumen tenemos:

$$O_{min} = \left( \frac{8}{3}c + 8h + s - o \right) / \rho_{O_2} \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg c}} \right]$$

$$O_{min} = \frac{3.067}{1.429} = 2.146 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg c}} \right]$$

Calculamos el  $X_{min}$  para la combustión:

Con la ecuación (2.20)  $X_{min} = \frac{O_{min}}{0.23}$  o sea

$$X_{min} = \frac{3.067}{0.23} = 13.33 \left[ \frac{\text{kg c}}{\text{kg c}} \right] \leftarrow$$

Utilizando la ecuación 2.21

$$V_{O_2} = 2.146 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg c}} \right]$$

## Coeficientes característicos:-

1° Coeficiente.

Utilizando la ecuación (2.26) se tiene:

$$\bar{v} = 1 + \frac{3}{c} \left( h - \frac{0.5}{8} \right)$$

$$\bar{v} = 1 + \left[ \frac{3}{0.8280} \right] \left[ 0.1090 - \left( \frac{0.0020 - 0.0293}{8} \right) \right] =$$

$$\bar{v} = 1 + \left( \frac{3}{0.8280} \right) (0.1005) = ~~1.3941~~ 1.3891$$

2° Coeficiente: Usando la ecuación (2.28)

$$v = \frac{3}{7} \frac{h}{c} = \frac{3}{7} \left( \frac{0.0297}{0.8210} \right) = \frac{3}{7} (0.03617) = 0.01550$$

## Productos de la combustión:

- Dioxido de carbono:

Utilizando la eq. (2.29)

$$V_{CO_2} = \frac{11}{3} c \frac{22.41}{12} = 1.8675 (0.8280) = 1.546 \left[ \frac{Nm^3}{kg c} \right]$$

$$m_{CO_2} = \frac{11}{3} c = \frac{11}{3} (0.8280) = 3.036 \left[ \frac{kg CO_2}{kg c} \right]$$

- Vapor de agua:

Usando la ec. (2.30), tenemos:

$$V_{H_2O} = \frac{22.41}{18} (9h + w) = \frac{22.41}{18} \left[ (9)(0.1090) + (0.0030) \right] = 1.1690 \frac{Nm^3}{kg}$$

$$m_{H_2O} = (9h + w) = 0.939 \frac{kg H_2O}{kg c}$$

Bioxido de azufre:

$$V_{SO_2} = \frac{22.41}{32} \cdot 5 = \frac{22.41}{32} (0.0293) = 0.0205 \left[ \frac{Nm^3}{kgc} \right] \leftarrow$$

$$m_{SO_2} = 25 = 2(0.0293) = 0.0586 \left[ \frac{kg_{SO_2}}{kgc} \right] \leftarrow$$

Si se toma un 5% de exceso de aire, ideal para combustibles, la cantidad real de aire se calcula por la ecuación (2.35). Entonces:

$$X = \lambda X_{min} = 1.05 (13.33) = 13.99 \left[ \frac{kg_a}{kgc} \right]$$

El total de productos se determina por:

En unidades de masa:

$$m_p' = 3.036 + 0.939 + 0.0586 = 4.0336 \left[ \frac{kg_{gases}}{kgc} \right]$$

(Sin tomar al Nitrógeno)

En unidades volumétricas:

$$V_p' = 1.546 + 1.1690 + 0.0205 = 2.735 \left[ \frac{Nm^3}{kgc} \right] \text{ (Sin tomar cuenta al Nitrógeno)}$$

Verificando la ecuación (2.34):

$$V_p = X_{min} + \frac{22.41}{12} \left( 3h + \frac{3}{8}O + \frac{2}{3}W \right) =$$

$$V_p = 10.21 + \frac{22.41}{12} \left[ (3)(0.0293) + (0.375)(0.020) + (0.666)(0.0030) \right] =$$

$$V_p = 10.21 + (1.8675) \left( 0.312 + 7.5 \times 10^{-4} + 1.998 \times 10^{-3} \right) = 10.21 + 0.5877 = 10.7977 \approx 10.8 \text{ Nm}^3/kgc$$

(6)

Por su parte el Nitrogeno se calcula por.

$$V_{N_2} = 0.79 \times \text{min} = 0.79 (10.21) = 8.065 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}} \right]$$

Por lo tanto, los productos de combustión  $V_p$  se calculan sumando de los gases formados mas nitro'geno

$$V_p = V_p' + V_{N_2} = 2.735 + 8.065 = 10.8 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}} \right]$$

En condiciones estequiometricas de combustión, los volúmenes parciales, quitando vapor de agua resultan ser:

$$V_p = V_p - V_{H_2O} = 10.8 - 1.1690 = 9.631 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}} \right]$$

Entonces las fracciones volumetricas o molares son:

$$Y_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_T} = \frac{1.546}{9.631} = 0.1605 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}} \right] \text{ ó } 16.05\%$$

$$Y_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_T} = \frac{0.0205}{9.631} = 0.00212 = 0.21\%$$

$$Y_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_T} = \frac{8.065}{9.631} = 0.8374 = 83.74\%$$

Suponiendo una combustión real, con un coeficiente de exceso de aire del 5%; la composición de gases estará formada por:  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $SO_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ . Este último resulta complicado encontrar la cantidad exacta por cálculos. Aquí solamente se consideraran el resto de gases de la combustión.

(7)

En términos prácticos el CO se determina a partir  
- las sigs. datos:

El ~~0.87%~~<sup>87%</sup> del CO<sub>2</sub> teórico se forma CO<sub>2</sub> real.

El ~~0.30%~~ del CO<sub>2</sub> se transforma a CO.

Aplicado a combustión con exceso del 5% de  
aire.

Completando nuestro cálculo, X (cantidad de  
aire real), se determina por:

$$X = \lambda X_{\min} = 1.05(10.21) = 10.7205 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}} \right]$$

$$V_p = X + \frac{2741}{12} \left[ 3h + \frac{3}{8}O + \frac{2}{3}W \right]$$

$$V_p = 10.7205 + \frac{(0.5877)(2741)}{12} = 11.300 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}} \right]$$

~~Con lo anterior se calcula la composición real y~~

\* 
$$r_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V}$$

~~Los productos secos se calculan por  $V_T$ :~~

$$V_T = V_p - V_{\text{H}_2\text{O}} = 11.300 - 1.1690 = 10.1392 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}}$$

(8)

Con lo anterior se calcula la composición real y

seca:

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_T} = \frac{1.546}{10.1392} = 0.1524 = 15.24\%$$

$$r_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_T} = \frac{0.0205}{10.1392} = 0.00202 = 0.20\%$$

~~$$r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_T} = \frac{8.055}{10.1392} = 0.7959 = 79.59\%$$~~

$$V_{N_2} = 0.79X = 0.79(10.7205) = 8.46 \left[ \frac{Nm^3}{kgc} \right]$$

$$r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_T} = \frac{8.46}{10.1392} = 0.8343 = 83.43\%$$

$$\text{Oxígeno (O}_2\text{)} = (\lambda - 1)O_{min} = fO_{min}$$

$$V_{O_2} = 0.05(2.146) = 0.1073 \left[ \frac{Nm^3}{kgc} \right]$$

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_T} = \frac{0.1073}{10.1392} = 0.0105 = 1.05\%$$

# 1. Solución:

De acuerdo a la composición del diésel'

$$C = 84.6\%$$

$$H_2 = 9.7\%$$

$$S = 2.7\% \quad \Sigma = 100\%$$

$$N_2 = 1.0\%$$

$$W = 1.5\%$$

$$Z = 0.5\%$$

Oxígeno mínimo ( $O_{min}$ )

$$O_{min} = \frac{22.41}{12} \left[ c + 3 \left( h - \frac{O-S}{8} \right) \right] \frac{Nm^3}{kgc}$$

$$= \frac{22.41}{12} \left[ 0.846 + 3 \left( 0.097 + \frac{0.027}{8} \right) \right]$$

$$= 2.14 \frac{Nm^3}{kgc}$$

Aire mínimo ( $X_{min}$ )

$$X_{min} = \frac{2.14}{0.21} = 10.19 \frac{Nm^3}{kgc}$$

Aire real

$$X = X_{min} (1 + \delta) = 10.19 (1 + 0.10)$$

$$X = 11.20 \frac{Nm^3}{kgc}$$

Aire corregido (para 27°C y 1 bar)

$$X_c = X \cdot \frac{P_n}{T} \cdot \frac{T}{P_r}$$

donde:  $P_n$  y  $T_n$  son valores de presión y temperatura a nivel del mar y  $P_y T$  corresponden a las condiciones de operación

Entonces

$$X_c = 11.20 \times \frac{1.01325}{273.15} \times \frac{(27+273.15)}{1} = 12.47 \frac{\text{m}^3}{\text{kgc}}$$

Gasto de aire real

$$\dot{V}_{\text{real}} = X_c \times \dot{m}_c \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kgc}} \times \frac{\text{kgc}}{\text{s}} = \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

donde  $\dot{m}_c$  es el gasto másico del combustible

Entonces

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{real}} &= 12.47 \times 500 = 6235 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \\ &= 1.732 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \end{aligned}$$

Productos de la combustión

$$V_p = X + \Delta V$$

donde  $\Delta V$  es el incremento en volumen

$$\Delta V = \frac{22.41}{12} \left( 3h + \frac{3}{8}o + \frac{2}{3}w \right) \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}}$$

$$\Delta V = \frac{22.41}{12} \left( 3 \times 0.097 + \frac{2}{3} \times 0.015 \right)$$

$$\Delta V = 0.562 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}}$$

$$V_p = 11.20 + 0.562 = 11.762 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}}$$

Corrección del volumen de productos

$$V_{pc} = 11.762 \times \frac{1.01325}{273.15} \times \frac{(150+273.15)}{1}$$

$$V_{pc} = 18.46 \frac{\text{m}^3}{\text{kgc}}$$

Gasto real de gases de combustión

$$\begin{aligned} \dot{V}_p' &= V_{pc} \times \dot{m}_c = 18.46 \times 500 = 9230 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \\ &= 2.564 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \end{aligned}$$

Para determinar el flujo térmico, se debe conocer el Poder Calorífico. Entonces, tomando la ecuación empírica

$$\begin{aligned} PCI &= 33.913c + 143.188 \left( h - \frac{1}{8} \right) + 9.3s \\ &\quad - 2.5(9h + w) \\ &= 33.913 \times 0.846 + 143.188(0.097) + 9.3 \times 0.027 \\ &\quad - 2.5(9 \times 0.097 + 0.015) \\ &= 40,610 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$PCS = 42,830 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

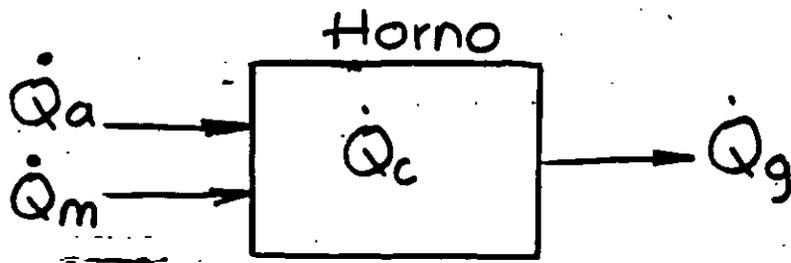
Entonces,

$$\dot{Q} = \dot{m}_c PCI \times \eta_{\text{comb}} =$$

$$= \frac{500}{3600} \times 40,610 \times 0.96 = 5.41 \text{ kW}$$

23

2.



El balance térmico se establece de la forma

$$\dot{Q} = 1500 \text{ MW} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_a + \dot{Q}_m - \dot{Q}_g \quad \sigma$$

$$\dot{Q} = \dot{V}_c (\dot{Q}_c + \dot{Q}_a + \dot{Q}_m - \dot{Q}_g)$$

donde:

$\dot{Q}$  es el flujo térmico suministrado ó aprovechado por el horno

$\dot{Q}_c$  es la energía de combustión por  $\text{m}^3$  normal

$\dot{Q}_a$  es la energía del aire, a la entrada,

$\dot{Q}_m$  es la energía del metano, a la entrada

$\dot{Q}_g$  es la energía de los gases de combustión.

Entonces:

$$\dot{Q}_c = 35.662 \text{ MJ/Nm}^3 \quad (\text{Poder calorífico del metano})$$

$$\dot{Q}_a = m_a c_p a t_a$$

$$\text{donde: } m_a = m_a' \lambda = X_{\text{min}} \rho_n \text{ aire} \cdot \lambda$$

y  $m_a'$  es el aire teórico

$\rho_n$  es la densidad del aire a condiciones normales

$\lambda$  es el factor o relación de aire

$\lambda = (1 + \delta)$  y  $\delta$  es la relación de exceso de aire

$c_{pa}$  es el calor específico del aire y

$t_a$  es la temperatura del aire a la entrada /  
horno.

$$\text{Si } \rho_{na} = \frac{p_n}{RT_n} = \frac{101325}{287 \times 273.15} = 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}$$

$$m_a = X_{\text{min}} \cdot \rho_{na} \cdot \lambda$$
$$\text{y } m_a = 9.52 \times 1.293 \times 1.05 = 12.92 \frac{\text{kg aire}}{\text{Nm}^3}$$

Entonces:

$$\bar{Q}_a = 12.92 \times 1005 \times 27 = 350584.2 \frac{\text{J}}{\text{Nm}^3}$$

Por otro lado,

$$Q_m = m_m c_{pm} t_m$$

donde:  $m_m$  es la masa del metano =  $\rho_n V$   
 $c_{pm}$  es el calor específico del metano  
 $t_m$  es la temperatura del metano a la entrada.

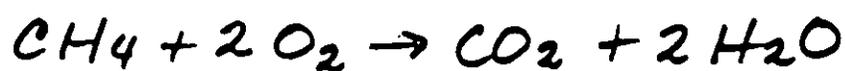
$\rho_n$  es la densidad del metano en condiciones normales

$$\rho_n = \frac{p}{RT} = \frac{101325}{519.6 \times 273.15} = 0.714 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}$$

$$Q_m = 0.714 \times 1 \times 2152 \times 40 = 61461.12 \frac{\text{J}}{\text{Nm}^3}$$

Para encontrar  $Q_g$  es necesario determinar los productos de la combustión.

De acuerdo con la ecuación de reacción



25

los volúmenes parciales se conforman por:

$$V_{CO_2} = 1 \frac{Nm^3}{Nm_c^3} ; V_{H_2O} = 2 \frac{Nm^3}{Nm_c^3}$$

$$V_{N_2} = 0.79 \times X_{min} \times \lambda = 0.79 \times 9.52 \times 1.05 \\ = 7.896 \frac{Nm^3}{Nm_c^3}$$

$$V_{O_2} = \delta O_{min} = 0.05 \times 2 = 0.10 \frac{Nm^3}{Nm_c^3}$$

Entonces, el volumen de los productos, se calcula por:

$$V_p = \sum V_i = 1 + 2 + 7.896 + 0.10 = 10.996 \frac{Nm^3}{Nm_c^3}$$

Para calcular la ~~densidad~~ masa de la mezcla hay que encontrar:

- 1° La composición volumétrica
- 2° La masa molecular equivalente
- 3° La densidad de la mezcla

Composición: ( $r_i$ )

$$r_{CO_2} = \frac{1}{10.996} = 0.090 ; r_{H_2O} = \frac{2}{10.996} = 0.18$$

$$r_{N_2} = \frac{7.896}{10.996} = 0.718 ; r_{O_2} = \frac{0.10}{10.996} = 9.09 \times 10^{-3}$$

Masa molecular equivalente

$$\bar{M}_m = \sum M_i r_i = 44 \times 0.090 + 18 \times 0.18 + \\ + 28 \times 0.718 + 32 \times 9.09 \times 10^{-3} = \\ = 3.96 + 3.24 + 20.104 + 0.29088 = \\ = 27.59 \text{ kg/Lmol}$$

Densidad de la mezcla

$$\rho_{PN} = \frac{\bar{M}_m}{\bar{V}_n} = \frac{27.59}{22.41} = 1.23 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}$$

entonces,

$$\begin{aligned} m_p &= V_p \times \rho_{PN} = 10.996 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3} \times 1.23 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \\ &= 13.52 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} = A \end{aligned}$$

Ahora, convirtiendo  $r_i$  en  $x_i$  queda

$$m_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \times \rho_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \times \frac{p}{RT} = 1 \times \frac{101325}{\frac{8314.41}{44} \times 273.15}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 1 \times 1.9630 = 1.9630 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \times \frac{p}{RT} = 2 \times \frac{101325}{\frac{8314.41}{18} \times 273.15}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \times 0.8030 = 1.606 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}$$

$$m_{\text{N}_2} = 7.896 \times \frac{28}{22.41} = 9.86 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}$$

$$m_{\text{O}_2} = 0.10 \times \frac{32}{22.41} = 0.1427 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}$$

$$m_T = \sum m_i = 13.57 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \cong A$$

Entonces:

$$C_{pp} = \sum C_{pi} X_i = \overset{\text{CO}_2}{819 \times \frac{1.963}{13.57}} + \overset{\text{H}_2\text{O}}{1854 \times \frac{1.606}{13.57}} + \overset{\text{N}_2}{1040 \times \frac{9.86}{13.57}} + \overset{\text{O}_2}{914 \times \frac{0.1427}{13.57}} =$$
$$= 118.474 + 219.419 + 755.666 + 9.611 =$$
$$C_p = 1103.17 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

Ahora si

$$Q_g = m_g C_{pg} t_g = 13.15 \left( \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \times \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right) 1103.17 \times 200$$
$$= 2.99 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{Nm}^3}$$

$$Q_c + Q_a + Q_m - Q_g = (35.66 + 0.3505 + 0.062 - 2.99) \times 10^6$$
$$= 33.08 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3}$$

Finalmente, el gasto de combustible se determina por

$$\dot{V}_c = \frac{Q}{33.08} = \frac{1.500}{33.08} = 45.34 \times 10^{-3} \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}}$$

a) Gasto corregido: ( $\dot{V}_c'$ ) de combustible

$$\dot{V}_c' = 45.34 \times 10^{-3} \times \frac{1.01325}{273.15} \times \frac{313}{1.8} = 29.26 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

b) Gasto de aire

$$V_a(\text{real}) = X_{\text{min}} \times \lambda \times \frac{1.01325}{273.15} \times \frac{300}{1} = 11.13 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad 28$$

Finalmente  $\dot{V}_c' = 29.26 \times 10^{-3} \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} = 29.26 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

3

Solución  
Composición

	Diesel %	Combustóleo	Gasóleo 80d/20c
C =	84.80	82.80	$C = \sum C_i x_i = 84.40$
H <sub>2</sub> =	9.70	10.40	$H_2 = \sum H_{2i} x_i = 9.84$
S =	2.70	2.97	$S = \sum S_i x_i = 2.75$
N <sub>2</sub> =	1.00	0.20	$N_2 = \sum N_{2i} x_i = 0.84$
W =	1.50	2.93	$W = \sum W_i x_i = 1.78$
O <sub>2</sub> =	0.0	0.40	$O_2 = \sum O_{2i} x_i = 0.08$
Z =	0.50	0.30	$Z = \sum Z_i x_i = 0.46$

Oxígeno mínimo

$$O_{min} = 22.41 \left[ \frac{C}{12} + \frac{h}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right] \frac{Nm^3}{kgc} \quad (2.25a)$$

$$O_{min} = 22.41 \left[ \frac{0.844}{12} + \frac{0.0984}{4} + \frac{0.0275}{32} - \frac{0.08 \times 10^{-2}}{32} \right]$$

$$O_{min} = 22.41 \left( 0.0703 + 0.0246 + 7.6875 \times 10^{-4} - 2.5 \times 10^{-5} \right)$$

$$O_{min} = 22.41 \times 0.0956 = 2.143 \frac{Nm^3}{kgc}$$

Aire para la combustión

$$X_{min,v} = \frac{O_{min}}{0.21} = \frac{2.143}{0.21} = 10.205 \frac{Nm^3}{kgc}$$

$$X_{min,m} = X_{min,v} \times \rho_{aire} \left( \frac{Nm^3}{kgc} \times \frac{kg}{Nm^3} = \frac{kg}{kgc} \right)$$

$$\rho_{aire} = \frac{M_i}{\bar{V}} = \frac{28.964}{22.41} = 1.2924 \frac{kg}{Nm^3}$$

$$X_{\min, m} = 10.205 \times 1.2924 = 13.188 \frac{\text{kg}}{\text{kgc}}$$

Aire práctico para la combustión

$$X = X_{\min} \times \lambda = 10.205 \times 1.15 = 11.735 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}}$$

Aire práctico corregido para Cd. de México

$$X_v = 10.715 \times \frac{P_n}{T_n} \frac{T_t}{P_t} = 11.735 \times \frac{1.01325}{273.15} \times \frac{(273.15+15)}{0.80}$$

$$X_v = 15.679 \frac{\text{m}^3}{\text{kgc}}$$

Y que por otro lado, expresado en masa

$$X_m = X_{\min, m} = 13.188 \times 1.15 = 15.1662 \frac{\text{kg}}{\text{kgc}}$$

$$X_v = 15.1662 \frac{\text{kg}}{\text{kgc}} \times \frac{1}{\rho} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{Aire corregido}$$

$$\text{donde } \rho = \frac{p}{RT} = \frac{0.20}{287 \cdot (273.15+15)} = 0.967 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$X_v = \frac{15.1662}{0.967} = 15.68 \frac{\text{m}^3}{\text{kgc}}$$

Ha resultado lo mismo por dos caminos

# Productos de combustión en volumen

## Bióxido de Carbono

$$V_{CO_2} = \frac{22.41}{12} \times C = \frac{22.41}{12} \times 0.8440 = 1.576 \frac{Nm^3}{kgc}$$

$$V_{H_2O} = \frac{22.41}{18} \times (9h + w) = \frac{22.41}{18} \times (9 \times 0.0984 + 0.0178) = 1.1247 \frac{Nm^3}{kgc}$$

$$V_{SO_2} = \frac{22.41}{32} \times (S) = \frac{22.41}{32} \times 0.0275 = 0.01925 \frac{Nm^3}{kgc}$$

$$V_{N_2} = 0.79 \times X = 0.79 \times 11.735 = 9.27065 \frac{Nm^3}{kgc}$$

$$V_{O_2} = 0.15 \times O_{min} = 0.15 \times 2.143 = 0.32145 \frac{Nm^3}{kgc}$$

$$V_T = \sum V_i = 12.312 \frac{Nm^3}{kgc}$$

$$r_{CO_2} = 0.1280 = 12.80\% ; r_{H_2O} = 0.09134 = 9.13\%$$

$$r_{SO_2} = 1.56 \times 10^{-3} = 0.156\% ; r_{N_2} = 0.7529 = 75.29\%$$

$$r_{O_2} = 0.026 = 2.6\%$$

Usando:

$$V_p = X + \frac{22.41}{12} \left( 3h + \frac{1}{2} C + \frac{2}{3} w \right) \frac{Nm^3}{kgc} = 12.30 \frac{Nm^3}{kgc}$$

4

Por fórmula

$$V_p = X + \frac{22.41}{12} \left( 3h + \frac{3}{8} O + \frac{2}{3} w \right) \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}}$$

$$V_p = 11.735 + \frac{22.41}{12} \left( 3 \times 0.0984 + \frac{3}{8} \times 0.0008 + \frac{2}{3} \times 0.0178 \right)$$

$$V_p = 11.735 + \frac{22.41}{12} \times 0.307 = 12.30 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kgc}}$$

Masa molecular

$$\begin{aligned} \bar{M}_m &= \sum M_i r_i = 44 \times 0.1280 + 18 \times 0.09134 + \\ &\quad + 64 \times 1.56 \times 10^{-3} + 28 \times 0.7529 + \\ &\quad + 32 \times 0.026 \\ &= 5.632 + 1.64412 + 0.09984 + 21.0812 + 0.832 \\ &= 29.289 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \end{aligned}$$

Densidad de la mezcla de gases

$$\rho = \frac{M}{\bar{V}} = \frac{29.289}{22.41} = 1.3069 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Entonces

$$m_p = \rho V_p = 1.3069 \times 12.30 = 16.074 \frac{\text{kg}}{\text{kgc}}$$

Fracciones másicas  $x$ 

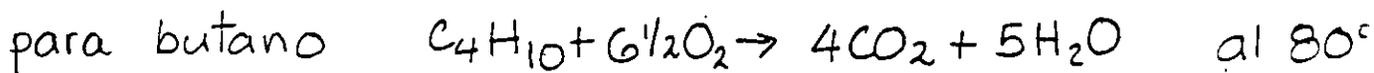
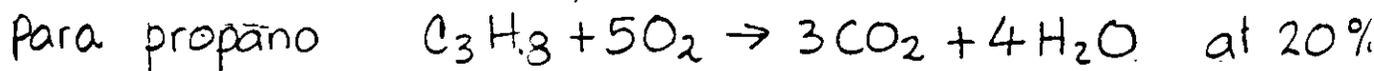
$$x_i = \frac{r_i M_i}{\sum r_i M_i}; \quad x_{\text{CO}_2} = \frac{5.632}{29.289} = 0.192 \quad x_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1.64412}{29.289} = 0.056$$

$$x_{\text{SO}_2} = \frac{0.09984}{29.289} = 3.4 \times 10^{-3} \quad x_{\text{N}_2} = \frac{21.0812}{29.289} = 0.719 \quad x_{\text{O}_2} = \frac{0.832}{29.289} = 0.028$$

$$\sum x_i = 1$$

5

4. De acuerdo con las ecuaciones de reacción



Oxígeno mínimo

$$O_{\min} = 5 \times 0.20 + 6.5 \times 0.80 = 6.2 \frac{Nm^3}{Nm_c^3}$$

Aire mínimo

$$X_{\min} = \frac{6.2}{0.21} = 29.52 \frac{Nm^3}{Nm_c^3}$$

Aire con exceso (aire real)

$$X = 29.52 \times \lambda = 29.52 \times 1.15 = 33.948 \frac{Nm^3}{Nm_c^3}$$

Aire real ajustado

a) para Acapulco (0°C)

$$X_r = 33.948$$

b) Para Querétaro (27°C)

$$X_r = 33.948 \times \frac{1.01325}{273.15} \times \frac{(273.15 + 27)}{273.15} = 46.60 \frac{m^3}{Nm_c^3}$$

$$X_r = 46.60 \frac{m^3}{Nm_c^3}$$

Gases de Combustión

$$\begin{aligned} V_{CO_2} &= 3 \times 0.2 + 4 \times 0.8 \\ &= 3.8 \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{CO_2} &= 3 \times 0.20 + 4 \times 0.8 \\ &= 3.8 \frac{Nm^3}{Nm_c^3} \end{aligned}$$

6

$$V_{H_2O} = 4 \times 0.2 + 5 \times 0.8 =$$

$$= 4.8 \frac{Nm^3}{Nm^3_c}$$

$$V_{O_2} = 80 \text{ min}$$

$$= 0.15 \times 6.2 = 0.93 \frac{Nm^3}{Nm^3_c}$$

$$V_{N_2} = 0.79 X = 0.79 \times 33.948$$

$$= 26.818 \frac{Nm^3}{Nm^3_c}$$

$$V_T = 36.348 \frac{Nm^3}{Nm^3_c}$$

Fracciones molares

$$r_{CO_2} = \frac{3.8}{36.348} = 0.1045$$

$$= 10.45\%$$

$$r_{H_2O} = \frac{4.8}{36.348} = 0.1320$$

$$= 13.20\%$$

$$r_{O_2} = \frac{0.93}{36.348} = 0.0255$$

$$= 2.55\%$$

$$r_{N_2} = \frac{26.818}{36.348} = 0.7378$$

$$= 73.78\%$$

$$V_{H_2O} = 4 \times 0.2 + 5 \times 0.8 =$$

$$= 4.8 \frac{Nm^3}{Nm^3_c}$$

$$V_{O_2} = 80 \text{ min}$$

$$= 0.15 \times 6.2 = 0.93 \frac{Nm^3}{Nm^3_c}$$

$$V_{N_2} = 0.79 X = 0.79 \times 33.948$$

$$= 26.818 \frac{Nm^3}{Nm^3_c}$$

$$V_T = 36.348 \frac{Nm^3}{Nm^3_c}$$

Valores corregidos a 27°C y 0.85 bar

$$V_{CO_2}' = V_{CO_2} \times \frac{P_n}{T_n} \times \frac{T_f}{P_f}$$

$$= V_{CO_2} \times \frac{1.01325}{(273.15)} \times \frac{(273.15 + 27)}{0.81}$$

$$= V_{CO_2} \times 1.373$$

El factor 1.373 afecta tanto a los volúmenes parciales  $V_i$  como al volumen total; por tanto,  $r_{CO_2}$ ,  $r_{H_2O}$ ,  $r_{O_2}$  y  $r_{N_2}$  siguen igual a los de nivel del mar.



El  $V_{TC}$  corregido se determina

por:

$$V_{TC} = 36.348 \times 1.373$$

$$= 49.905 \frac{m^3}{Nm^3}$$

## CAPITULO 2

### CARACTERIZACION DE LAS MEZCLAS DE GASES COMBUSTIBLES

El estudio de una mezcla combustible es importante para la correcta cuantificación, ya que sus características se deben identificar en función de sus componentes. La mezcla combustible una vez efectuada su reacción química se transforma en una mezcla inerte de gases quemados.

Existen diferentes formas de cuantificar las características de la mezcla, según sea la fuente o autor, se especifican generalmente en fracciones másicas y fracciones volumétricas. Esto es, en un combustible gaseoso determinado, sus porcentajes en la mezcla en cuestión, proporcionará una correcta idea de la buena o mala combustión.

Al analizar el contenido de este capítulo, llevará a entender desde las ecuaciones de reacción estequiométricas hasta la interpretación de normas ecológicas referentes a gases de combustión.

Una mezcla gaseosa combustible se caracteriza por la influencia de sus gases componentes. Desde el punto de vista lógico el gas componente de mayor contenido debe influir en las características de la mezcla de gases combustibles.

Al considerar  $n$  componentes en una mezcla gaseosa combustible, la temperatura y volumen de cada gas se consideran iguales a las correspondientes de la mezcla. Es decir:

$$T_1 = T_2 = T_3 = \dots = T_n = T \quad (2.1)$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n = V \quad (2.2)$$

Donde:  $T$  y  $V$  son la temperatura y volumen de la mezcla respectivamente.

En cambio, la presión de la mezcla es igual a la suma de las presiones parciales de cada gas componente, o sea:

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i = p \quad (2.3)$$

### LEY DE DALTON

donde:  $p$  es la presión total de la mezcla

La composición se puede dar de acuerdo a:

a) La fracción másica, que se define por la relación:

$$x_i = \frac{m_i}{m} \quad (2.4)$$

donde:

$x_i$  es la fracción másica del  $i$ ésimo componente en forma decimal o en porcentaje.

$m_i$  es la masa en kg del componente  $i$ ésimo.

$m$  es la masa total que se expresa en kg.

Por tanto:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (2.5)$$

b) La fracción molar, que se define por la relación:

$$y_i = \frac{n_i}{n} \quad (2.6)$$

donde:

$y_i$  es la fracción molar del  $i$ ésimo componente, expresada en forma decimal o en porcentaje.

$n_i$  es la cantidad de sustancia en kmol del  $i$ ésimo componente.

$n$  es la cantidad de sustancia total expresada en kmol.

Por tanto:

$$\sum_{i=1}^n y_i = 1 \quad (2.7)$$

c) La fracción volumétrica, la cual se define por:

$$r_i = \frac{V_i}{V} \quad (2.8)$$

donde:

$r_i$  es la fracción volumétrica del  $i$ ésimo componente, expresada en forma decimal o en porcentaje

$V_i$  es el volumen parcial en [m<sup>3</sup>] que ocuparía el  $i$ ésimo componente si este fuese sometido a la presión y temperatura de la mezcla (Ver figura 2.1)

$V$  es el volumen de la mezcla en [m<sup>3</sup>]

Por tanto:

$$\sum_{i=1}^n v_i = v$$

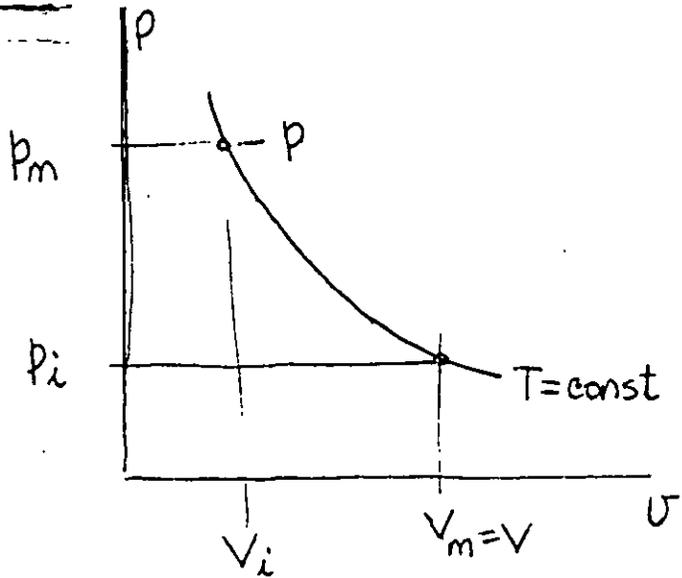


Figura 2.1 Diagrama  $p$ - $V$ .

Consecuentemente:

$$\sum_{i=1}^n r_i = 1 \quad (2.9)$$

por otro lado,  $p_i V = p V_i$ , la presión parcial se calcula por:

$$p_i = p r_i \quad (2.10)$$

## 2.1 Relación entre las fracciones másica, molar y volumétrica

Puesto que la masa molecular para el  $i$ ésimo componente se da por:

$$M_i = \frac{m_i}{n_i} \quad (2.11)$$

Entonces, la fracción másica resulta:

$$x_i = \frac{M_i n_i}{\sum_{i=1}^n M_i n_i} = \frac{M_i \frac{n_i}{n}}{\sum_{i=1}^n M_i \frac{n_i}{n}} = \frac{M_i y_i}{\sum_{i=1}^n M_i y_i} \quad (2.12)$$

De igual forma, la fracción molar queda:

$$y_i = \frac{\frac{m_i}{M_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M_i}} = \frac{\frac{1}{M_i} \frac{m_i}{m}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{M_i} \frac{m_i}{m}} = \frac{\frac{x_i}{M_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{M_i}} \quad (2.13)$$

Aprovechando la definición de volumen específico molar del iésimo componente, dado por:

$$\bar{v}_i = \frac{V_i}{n} \quad \left[ \frac{m^3}{kmol} \right] \quad (2.14)$$

La fracción volumétrica se determina por:

$$r_i = \frac{\bar{v}_i n_i}{\sum_{i=1}^n \bar{v}_i n_i} \quad (2.15)$$

Pero como cualesquier gas a las mismas condiciones de presión y temperatura ocupa el mismo volumen molar, la expresión anterior se reduce a:

$$r_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^n n_i} = y_i \quad (2.16)$$

Por lo tanto, la fracción volumétrica es igual a la fracción molar.

Las ecuaciones (2.12), (2.13) y (2.16) son de gran utilidad para convertir de una fracción a otra, que debido a su uso multidisciplinario resulta apropiada su homogenización y así facilitar su manejo e interpretación. Tal es el caso de las mezclas combustibles y de gases contaminantes.

## 2.2 Masa molecular aparente

Una mezcla gaseosa se constituye por un conglomerado molecular no homogéneo y requiere de una masa molecular que la represente, la cual se conoce como "Masa molecular aparente" ( $M$ ).

Si  $m = \sum m_i$  y tomando la identidad de la ecuación (2.11), resulta que:

$$Mn = \sum M_i n_i$$

$$M = \sum M_i \frac{n_i}{n}$$

$$M = \sum_{i=1}^n M_i r_i \quad (2.17)$$

Ahora, substituyendo la ecuación (2.13) en la (2.17), la masa molecular aparente queda:

$$y_i = \frac{\frac{x_i}{M_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{M_i}} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\frac{x_i}{M_i}} \right) \quad (2.18)$$

### 2.3 Constante específica (R) de la mezcla gaseosa.

Si la ecuación de estado para gas ideal es buena para el componente  $i$ ésimo, entonces tenemos:

$$p_i V = m_i R_i T \quad (2.19)$$

Ahora realizando la sumatoria miembro o miembro, queda:

$$\left( \sum_{i=1}^n p_i \right) V = \left( \sum_{i=1}^n m_i R_i \right) T$$

Dividiendo entre la masa de la mezcla, lo anterior resulta:

$$pV = m \left( \sum_{i=1}^n x_i R_i \right) T \quad (2.20)$$

Por similitud con la ecuación (2.19), la constante se expresa por:

$$R = \sum_{i=1}^n x_i R_i \quad (2.21)$$

Pero si también nos apoyamos en las ecuaciones (2.12) ó (2.16), resulta:

$$R = \frac{Ru}{\sum_{i=1}^n x_i M_i} \quad (2.22)$$

donde:

$Ru = 8,314.41$  [J/kg-K] y es la constante Universal de los Gases

## 2.4 Densidad de la mezcla gaseosa

A partir de la ecuación (2.20), la densidad se puede calcular por:

$$\rho = \frac{p}{T} \frac{1}{\sum_{i=1}^n x_i R_i} \quad (2.23)$$

O por otro lado, con ayuda de la ecuación (2.8)

$$x_i = \frac{v_i}{v} \frac{m_i}{m_i}$$

Redondeando términos:

$$\frac{m_i}{v} = \frac{m_i}{v_i} x_i = \rho_i x_i$$

Finalmente, efectuando la sumatoria, la densidad queda:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{v} = \sum_{i=1}^n \rho_i x_i \quad (2.24)$$

Donde:  $\rho_i$  es la densidad del  $i$ ésimo componente.

Gas	Formula	Mole- cular weight	Gas- constant J/(kg K)	$p_{kr}$ kPa	$t_{kr}$ °C	Boil. point °C	$c_p/c_v$	$c_p$ at 0°C 101.3 kPa kJ/(kg K)
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.038	319.3	6280	36.0	-83.6	1.26	1.629
Air	-	28.964	287.1	3770	-140.7	-193.0	1.40	1.003
Amonia	NH <sub>3</sub>	17.032	489.2	11300	132.4	-33.4	1.32	2.055
Argon	Ar	39.948	208.1	4860	-122.6	-186.0	1.07	
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.114	100.4	4060	208.6	80.1	1.08	
1-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	143.0	3800	152.0	-0.5	1.11	
Cis-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	143.0	3700	133.7	-11.7	1.11	
Butylene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	148.2	3920	144.0	-6.9	1.11	
Carbon Dioxide	CO <sub>2</sub>	44.011	188.9	7380	31.0	-78.5	1.30	0.819
Carbon Disulfide	CS <sub>2</sub>	76.143	109.2	7450	278.0	46.0	1.20	
Carbon Tetrachloride	CCl <sub>4</sub>	153.839	54.0	4400	283.0	77.0	1.18	
Carbon Monoxide	CO	28.011	296.8	3500	-140.2	-191.5	1.40	1.041
Chlorine	Cl <sub>2</sub>	70.914	117.2	7710	144.0	-34.6	1.33	
Cyanogen	(CN) <sub>2</sub>	52.038	159.8	6160	128.0	-21.0	1.26	
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	276.5	4880	32.1	-88.6	1.22	
Ethylchloride	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	64.519	128.9	5300	185.0	12.0	1.13	
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	296.4	5160	9.6	-103.9	1.22	1.497
Freon 12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120.92	68.8	4060	112.0	-29.8	1.13	
Helium	He	4.003	2077.0	229	-268.0	-269.0	1.66	
Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.178	96.5	3040	235.0	69.0	1.08	
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.016	4124.2	1310	-240.0	-252.8	1.41	1.422
Hydrogen Bromide	HBr	80.92	102.8	8200	90.0	-68.0	1.42	
Hydrogen Chloride	HCl	36.465	228.0	8400	51.4	-85.0	1.41	
Hydrogen Cyanide	HCN	27.027	307.6	4900	184.0	-89.0	1.60	
Hydrogen Iodide	HI	127.93	65.0	-	151.0	-36.0	1.40	
Hydrogen Sulfide	H <sub>2</sub> S	34.082	243.9	9020	100.4	-60.4	1.30	0.995
Krypton	Kr	83.80	99.2	5590	-63.7	-153.2	1.68	
Methane	CH <sub>4</sub>	16.043	518.3	4620	-82.5	-161.5	1.32	2.152
2-Methyl-Butane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.151	115.2	3340	188.0	28.0	1.06	
Methyl Chloride	CH <sub>3</sub> Cl	50.492	164.7	6670	143.0	-24.0	1.20	
Neon	Ne	20.183	411.9	2590	-228.8	-246.1	1.64	
Nitric Oxide	NO	30.008	277.1	6590	-94.0	-152.0	1.40	0.909
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.016	296.8	3350	-147.1	-195.8	1.41	1.040
Nitrous Oxide	N <sub>2</sub> O	44.016	188.9	7270	36.5	-88.7	1.31	0.893
Oxygen	O <sub>2</sub>	32.000	259.8	5030	-118.9	-183.0	1.40	0.914
Ozone	O <sub>3</sub>	48.000	173.2	6900	-5.0	-112.0	1.29	
Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.151	115.2	3340	197.2	36.1	1.06	
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	188.5	4260	96.8	-42.3	1.15	
Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.081	197.6	4570	92.1	-47.7	1.17	
Sulfur Dioxide	SO <sub>2</sub>	64.066	129.8	7870	157.2	-10.0	1.26	0.608
Water Steam, superheated	H <sub>2</sub> O	18.016	461.5	22130	374.2	100.0	1.33	1.854*
Xenon	X	131.30	63.3	5800	16.6	-108.0	1.66	

\*  $c_p = 1.933$  kJ/(kg K) at 200°C, 101.3 kPa

describe en el plano s/n elaborado a escala 1:1000 en octubre de 1994, por la Delegación de la Secretaría de Desarrollo Social en el Estado de Coahuila y autorizado por la Dirección General del Patrimonio Inmobiliario Federal de la propia Secretaría.

Que la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, mediante oficio número 401/26.08.94/1144 de fecha 26 de agosto de 1994, manifestó su anuencia en que se retire de su servicio la fracción del inmueble que se menciona en el considerando cuarto del presente, toda vez que no le es de utilidad en el presente ni en un futuro previsible.

Que la Delegación de la Secretaría de Desarrollo Social, en el Estado de Coahuila, mediante oficio número FOO-119-1.2.-1962/94 de fecha 20 de octubre de 1994, emitió dictamen procedente respecto al destino del inmueble objeto del presente ordenamiento.

Que en virtud de que ha quedado debidamente integrado el expediente respectivo, con base en las disposiciones de la Ley General de Bienes Nacionales y siendo propósito del Ejecutivo Federal dar un óptimo aprovechamiento al patrimonio inmueble federal, he tenido a bien expedir el siguiente

#### ACUERDO

**ARTICULO PRIMERO.-** Se retira del servicio de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social y se destina al servicio del Gobierno del Estado de Coahuila, el inmueble a que se refiere el considerando cuarto del presente ordenamiento, a fin de que lo utilice en la instalación de oficinas administrativas.

**ARTICULO SEGUNDO.-** Si el Gobierno del Estado de Coahuila, diere al inmueble que se le destina un aprovechamiento distinto al previsto en este Acuerdo, sin la previa autorización de la Secretaría de Desarrollo Social o lo dejare de utilizar o necesitar, dicho bien con todas sus mejoras y accesiones pasará a la administración de esta última Dependencia.

**ARTICULO TERCERO.-** La Secretaría de Desarrollo Social, en el ámbito de sus atribuciones, vigilará el estricto cumplimiento del presente ordenamiento.

#### TRANSITORIO

**UNICO.-** El presente Acuerdo entrará en vigor el día de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

Dado en la Ciudad de México, Distrito Federal, a los veintiocho días del mes de noviembre de novecientos noventa y cuatro.- El Secretario de Desarrollo Social, Carlos Rojas Gutiérrez.- Rúbrica.

**NORMA Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994, Contaminación atmosférica - Fuentes fijas - Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de dióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.**

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos - Secretaría de Desarrollo Social.

CARLOS ROJAS GUTIERREZ, Secretario de Desarrollo Social, con fundamento en los artículos 32 fracciones I, XXIV y XXV de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 4 del Reglamento Interior de la Secretaría de Desarrollo Social; 5o. fracciones I y VIII, 6o. último párrafo, 8o. fracciones I y VII, 36, 37, 111 fracción I, del 161 al 169, 171 y 173 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 7o. fracciones II y IV, 16, 25, 46 y 49 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera; 38 fracción II, 40 fracción X, 41, 43, 46, 47 y 52 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y

#### CONSIDERANDO

Que esta Norma Oficial Mexicana fue expedida con carácter emergente en dos ocasiones., con las claves NOM-PA-CCAT-019/93 (NE) y NOM-CCAT-019-ECOL/1993 (NE).

Que la misma Norma fue expedida por segunda ocasión con la clave NOM-CCAT-019-ECOL/1993 (NE), y publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de noviembre de 1993.

Que atendiendo a las opiniones de los sectores involucrados, se determinó modificar los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de contaminantes generados por los procesos de combustión que usan combustibles líquidos y gaseosos, e incluir combustibles sólidos.

Que durante el plazo de noventa días naturales contados a partir de la fecha de publicación del respectivo proyecto de Norma Oficial Mexicana, los análisis a los que se refiere el artículo 45 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, estuvieron a disposición del público para su consulta.

Que dentro del mismo plazo los interesados presentaron sus comentarios al citado proyecto de norma, el cual fue analizado en el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, realizándose las modificaciones procedentes. La Secretaría de Desarrollo Social, por conducto del Instituto Nacional de Ecología, ordenó la publicación de las respuestas a los comentarios recibidos en la Gaceta Ecológica, número especial de noviembre de 1994.

Que el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental aprobó en sesión de 10 de noviembre de 1994, la presente norma oficial mexicana, con la finalidad de asegurar la calidad del aire en beneficio de la salud de la población y el equilibrio ecológico por lo que he tenido a bien expedir la siguiente

Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994 para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

#### PREFACIO

En la elaboración de esta Norma Oficial Mexicana participaron:

- SECRETARIA DE DESARROLLO SOCIAL
  - Instituto Nacional de Ecología
  - Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
- SECRETARIA DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL
  - Dirección General de Normas
- SECRETARIA DE SALUD
  - Dirección General de Salud Ambiental
- SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E INDUSTRIA PARAESTATAL
  - Subsecretaría de Hidrocarburos
- GOBIERNO DEL ESTADO DE MEXICO
  - Secretaría de Ecología
- DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL
  - Dirección General de Proyectos Ambientales
  - Dirección General de Ecología
  - Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México
- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
  - Gerencia de Protección Ambiental.
- PETROLEOS MEXICANOS
  - Auditoría de Seguridad Industrial, Protección Ambiental y Ahorro de Energía.
  - Gerencia de Protección Ambiental y Ahorro de Energía
  - Pemex-Refinación
  - Pemex-Gas y Petroquímica Básica
  - Gerencia de Seguridad Industrial y Protección Ambiental.
- ASOCIACION MEXICANA DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ, A.C.
- ASOCIACION NACIONAL DE PRODUCTORES DE AUTOBUSES, CAMIONES Y TRACTOCAMIONES, A.C.
- ASOCIACION NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA
- CAMARA NACIONAL DEL CEMENTO
- CAMARA NACIONAL DE LAS INDUSTRIAS DE LA CELULOSA Y DEL PAPEL
- CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE BAÑOS Y BALNEARIOS
- CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA FARMACEUTICA
- CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA HULERA
- CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE ACEITES, GRASAS Y JABONES
- CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LAVANDERIAS
- CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA PANIFICADORA
- CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA TRANSFORMACION
- CONFEDERACION PATRONAL DE LA REPUBLICA MEXICANA
- CELANESE MEXICANA, S.A
- INDUSTRIAL QUIMICA DE MEXICO

## 1. Objeto.

Norma Oficial Mexicana para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión; así como los niveles máximos permisibles de emisión de dióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

## 2. Campo de aplicación.

Norma Oficial Mexicana para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos y gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, será de observancia obligatoria para el uso de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como para los equipos de generación eléctrica que utilizan la tecnología de ciclo combinado. Será obligatoria igualmente sólo en emisiones de dióxido de azufre, para el uso de los equipos de calentamiento directo por combustión.

Se exceptúan los equipos domésticos de calentamiento de agua, de calefacción y las estufas utilizados en casas habitación, escuelas, hospitales y centros recreativos, en las industrias cuando estos equipos sean utilizados en las áreas de servicios al personal, sin embargo, aplicará para el caso de industrias, comercios y servicios, cuando los equipos y sistemas de combustión en lo individual o la suma de varios rebasen los 10 cc de capacidad nominal en cada instalación.

También se exceptúan los quemadores industriales de campo, el sistema de regeneración de las plantas de desintegración catalítica, las plantas recuperadoras de azufre y los procesos de calentamiento directo que producen dióxido de azufre adicional al proveniente del combustible.

## 3. Referencias.

- NMX-AA-01 Determinación de la densidad aparente visual de humo.
- NMX-AA-09 Determinación de flujo de gases en un conducto por medio de un tubo pitot
- NMX-AA-10 Determinación de emisión de material particulado contenido en los gases que fluyen por un conducto.
- NMX-AA-23 Terminología.
- NMX-AA-35 Determinación de dióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión.
- NMX-AA-54 Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto.
- NMX-AA-55 Determinación de dióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto.

## 4. Definiciones.

### 4.1 Calentamiento directo.

La transferencia de calor por flama, gases de combustión o por ambos, al entrar en contacto directo con los materiales del proceso.

### 4.2 Calentamiento indirecto.

La transferencia de calor por gases de combustión que no entran en contacto directo con los materiales del proceso.

### 4.3 Capacidad nominal

La potencia térmica de diseño de un equipo de combustión indicada por el fabricante.

### 4.4 Certificado de emisión.

El documento expedido por la Secretaría de Desarrollo Social que acredita la cantidad de contaminantes a la atmósfera que puede emitir una fuente fija en un año de acuerdo a su capacidad nominal y al nivel regional de emisiones.

### 4.5 Combustibles fósiles sólidos, líquidos y gaseosos

4.5.1. Los combustibles sólidos se refieren a las variedades de carbón mineral cuyo contenido fijo de carbono varía desde 10% hasta 90% en peso y al coque de petróleo.

4.5.2. Los combustibles fósiles líquidos o gaseosos son los derivados del petróleo y gas natural tales como petróleo diáfano, diesel, combustóleo, gasóleo, gas L.P., butano, propano, metano, isobutano, propileno, butileno o cualquiera de sus combinaciones.

### 4.6 Ciclo combinado

Proceso para la obtención de calor en dos etapas que incluye en la primera, la generación de gases de combustión y la expansión de los mismos y en la segunda, transferencia y recuperación del calor con propósito de generación de energía eléctrica.

### 4.7 Consumo energético horario

Es la cantidad empleada de un combustible por hora multiplicada por su poder calorífico y se expresa en MJ/h.

### 4.8 Densidad de humo

La concentración de partículas sólidas o líquidas transportadas por la corriente de gases producto de una combustión incompleta.

#### 4.9 Equipo de combustión existente

- El instalado y/o el proyectado y aprobado para su instalación por la autoridad competente antes de la publicación de la presente Norma Oficial Mexicana.

#### 4.10-Equipo de combustión nuevo.

El instalado por primera vez, por sustitución de un equipo existente o aprobado por la autoridad competente, en fecha posterior a la publicación de la presente Norma Oficial Mexicana

#### 4.11 Fuente Fija

La instalación o conjunto de instalaciones pertenecientes a una sola persona física o moral, ubicadas en una poligonal cerrada que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

#### 4.12 Limite de emisión ponderada.

El promedio permisible de descarga de un contaminante a la atmósfera, aplicable a cada fuente fija.

#### 4.13 Monitoreo continuo.

- El que se realiza con equipo automático con un mínimo de 15 lecturas en un periodo no menor a 60 min. y no mayor a 360 min. El resultado del monitoreo es el promedio del periodo muestreado.

#### 4.14 Número de mancha.

- El valor numérico que se obtiene al comparar la mancha producto del paso de un cierto volumen de gas de combustión por un papel filtro con las tonalidades de la escala patrón equivalente.

#### 4.15 Operación de arranque del equipo de combustión.

El inicio de operación de los procesos de combustión.

#### 4.16 Operación de soplado.

La limpieza de hollín de los tubos de una caldera mediante la inyección de aire, vapor u otro fluido a presión.

#### 4.17 Resto del país.

Es toda la extensión territorial nacional excluyendo la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, (ZMCM) y las Zonas Críticas.

#### 4.18 Región.

Se consideran regiones a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y cada una de las zonas críticas.

#### 4.19 Zona Metropolitana de la Ciudad de Guadalajara.

El área integrada por los siguientes municipios del Estado de Jalisco: Guadalajara, Ixtlahuacán del Río, Tlaquepaque, Tonalá, Zapotlanejo y Zapopan

#### 4.20 Zona Metropolitana de la Ciudad de Mexico (ZMCM).

El area integrada por las 16 Delegaciones Politicas del Distrito Federal y los siguientes 17 municipios del Estado de México: Atizapan de Zaragoza, Coacalco, Cuautitlán de Romero Rubio, Cuautitlán Izcalli, Chalco de Covarrubias, Chimalhuacan, Ecatepec, Huixquilucan, Ixtapaluca, La Paz, Naucalpan de Juárez, Nezahualcoyotl, San Vicente Chicoloapan, Nicolás Romero, Tecámac, Tlalnepantla y Tultitlán.

#### 4.21 Zona Metropolitana de la Ciudad de Monterrey.

El area integrada por los siguientes municipios del Estado de Nuevo León. Monterrey, Apodaca, General Escobedo, Guadalupe, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García, Santa Catarina y Juárez.

#### 4.22 Zonas Críticas.

Se consideran Zonas Críticas (ZC). las zonas metropolitanas de Monterrey y Guadalajara; los centros de población de: Coatzacoalcos-Minatitlán (municipios de Coatzacoalcos, Minatitlán, Ixhuatlán del Sureste, Cosoleacaque y Nanchital), en el Estado de Veracruz; Irapuato-Celaya-Salamanca (municipios de Celaya, Irapuato, Salamanca y Villagran), en el Estado de Guanajuato; Tula-Vito-Aspasco (municipios de Tula de Allende, Tepeji de Ocampo, Tlahuelilpan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlaxoapan y Apaxco) en los estados de Hidalgo y de México; corredor industrial de Tampico-Madero-Altamira (municipios de Tampico, Altamira y Cd. Madero), en el Estado de Tamaulipas; el Municipio de Tijuana, en el Estado de Baja California y el Municipio de Cd. Juárez, en el Estado de Chihuahua.

#### 4.23 Nivel regional de emisión

El promedio permisible de descarga de un contaminante a la atmósfera, aplicable a un conjunto de fuentes fijas localizadas en una zona crítica

### 5. Especificaciones.

5.1 Los niveles maximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, óxidos de nitrógeno y bioóxido de azufre de los equipos de combustión de las fuentes fijas a que se refiere esta Norma Oficial Mexicana, son los establecidos en las tablas 4 y 5

5.2 Cuando existan dos o mas ductos de descarga cuyos equipos de combustión utilicen en forma independiente o conjunta combustibles fosiles solidos, liquidos y gaseosos, podran sujetarse a los valores de

emisión contemplados en las tablas 4 y 5 o ponderar las emisiones de sus ductos de descarga en función de la capacidad térmica del equipo o conjunto de equipos de combustión mediante la utilización de la ecuación (1) y de la combinación de los combustibles fósiles utilizados de acuerdo a la Tabla 1; y cuyo resulti deberá de cumplir con el límite máximo promedio permisible, que resulta de promediar ponderadamente límites máximos permisibles de emisión contemplados en las tablas 4 y 5 de los equipos de combustión de una fuente fija al utilizar la ecuación (2).

TABLA 1

Combinación de combustibles	Límite de Referencia
Gas/líquido	Líquidos
Gas/sólido	Sólidos
Líquido/sólido	Líquidos
Gas/líquido/sólido	Líquidos

Como alternativa la ecuación (3) para aquellos equipos de combustión que individualmente no cuenten con un sistema de medición y registro de alimentación de combustible.

Ecuación 1

$$EP_{CT} = \frac{E_{CT1} \cdot CT_1 + E_{CT2} \cdot CT_2 + \dots + E_{CTn} \cdot CT_n}{CT_1 + CT_2 + \dots + CT_n}$$

Donde:

$EP_{CT}$  = Emisión ponderada expresada en  $kg/10^6$  kcal

$E_{CTi}$  = Emisión de contaminante determinado en cada equipo de combustión expresada en  $kg/10^6$  kcal.

$CT_i$  = Carga térmica de cada equipo de combustión, expresada en kcal/h. Se obtiene al multiplicar el consumo de combustible por su poder calorífico.

$i = 1, 2, \dots, n$  en donde "n" es el número de equipos de combustión existentes en una misma fuente.

Ecuación 2

$$LEP = \frac{LE_1 \cdot C_1 + LE_2 \cdot C_2 + \dots + LE_n \cdot C_n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n}$$

Donde:

$LEP$  = Límite Máximo Promedio Permisible por Fuente Fija expresada en  $kg/10^6$  kcal. o partes por millón en volumen.

$LE_i$  = Límite Máximo Permisible de Emisión de contaminantes para el equipo de combustión i, seleccionado de las tablas 4 o 5 en función del tipo de combustible, expresado en  $kg/10^6$  kcal. o partes por millón en volumen

$C_i$  = Consumo energético del equipo de combustión i expresado en  $kg/10^6$  kcal. por hora (Anexo 5).

$i =$  Número consecutivo (1, 2, 3, ... n) que se asigna a las fuentes existentes

$n =$  Numero total de equipos de combustión existentes dentro de un mismo predio.

Ecuación 3

$$EP_Q = \frac{E_1 \cdot Q_1 + E_2 \cdot Q_2 + \dots + E_n \cdot Q_n}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}$$

Donde

$EP_Q$  = Emisión ponderada en base a flujo en chimenea, expresada en unidades de concentración según se indica en las tablas 4 y 5

$E_i$  = Emisión determinada en cada equipo de combustión, expresada en unidades de concentración según se indica en las tablas 4 y 5

$i = 1, 2, \dots, n$

$Q =$  Flujo en chimenea expresado en  $m^3/min$ , a condiciones de 760 mm de Hg a 25°C, base s 5% de oxígeno

5.3. Las fuentes fijas cuya capacidad total en equipos de combustión sea mayor a 43,000 MJ/h, deberá respaldar el total de las emisiones de bióxido de azufre con certificados de emisión, los cuales serán asignados con base en los niveles regionales establecidos en la Tabla 2 y no deberán sobrepasar los límites de emisión ponderada indicados en la Tabla 5.

TABLA 2

REGION	EMISION DE SO <sub>2</sub> (kg/10 <sup>6</sup> kcal)
Zona Metropolitana de la Ciudad de México	0.36
Zonas Críticas	1.44

Conforme a las disposiciones jurídicas aplicables, la Secretaría de Desarrollo Social establecerá el esquema de regionalización, los procedimientos y el programa para que las fuentes fijas a que se refiere el numeral, cumplan con los límites de emisión ponderada por fuente fija, así como los niveles regionales de emisión, tomando en consideración el avance de los programas de infraestructura de suministro de combustibles.

5.4 Los equipos de combustión existentes deberán cumplir con los límites de óxidos de nitrógeno consignados en la Tabla 4 y a partir de 1998 con los límites de la Tabla 5. Todo equipo de combustión nuevo deberá cumplir con los límites de emisiones de óxidos de nitrógeno consignados en la Tabla 5.

5.5 La operación de soplado que requieren los equipos de combustión de proceso continuo que utiliza combustibles sólidos o líquidos, deberá efectuarse con una frecuencia de por lo menos una vez por turno o de acuerdo a las especificaciones del fabricante. El tiempo de soplado no deberá exceder de 25 min. por soplador o desholinador, cuando se trate de equipos con capacidad mayor a 43,000 MJ/h y de 10 min. para los menores.

5.6 Los combustibles que se distribuyan en México deberán cumplir con la calidad ecológica necesaria para cumplir con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en esta Norma. Las empresas que suministren combustibles sólidos y líquidos deberán certificar en las facturas de embarque el contenido de azufre expresado en por ciento en peso. La descarga de bióxido de azufre a la atmósfera de equipos que usen combustibles gaseosos, sólidos y líquidos o cualquiera de sus combinaciones, se calculará con base en el consumo mensual de éstos y al contenido de azufre certificado por el proveedor.

Para efectos de verificación y en su caso, de sanción, el nivel de emisión se calculará mediante la ecuación 4:

Ecuación 4.

$$N_e = \frac{\sum Q_i \cdot FEC_i \cdot FCI}{\sum Q_i \cdot FCI}$$

Donde:

- $N_e$  = Número de combustibles/equipos que se utilizan.
- $Q_i$  = Cantidad de combustible consumido en un equipo durante un periodo determinado.
- $FEC_i$  = Factor de emisiones específico al tipo de combustible, según datos de la Tabla 3.
- $FCI$  = Factor de conversión para obtener el nivel de emisiones en kg de SO<sub>2</sub>/10<sup>6</sup> kcal.
- $N_e$  = Nivel de emisión

TABLA 3

Combustible	Factor de emisión kg de SO <sub>2</sub> /10 <sup>6</sup> kcal
Combustóleo con 1% en peso de azufre	2.04
Combustóleo con 2% en peso de azufre	4.08
Combustóleo con 4% en peso de azufre	8.16
Diesel con 0.5% en peso de azufre	0.91
Gas Natural	0 (Cero)

Para los combustibles que no están contemplados en esta tabla, el factor de emisión se calculará de acuerdo a la ecuación 5.

Ecuación 5

$$\text{Factor de emisión} = \frac{\frac{\%S}{100} \left[ \frac{\text{kgS}}{\text{kgCombustible}} \right] * 2 \left[ \frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgS}} \right]}{\text{Poder calorífico} \left[ \frac{10^6 \text{kcal}}{\text{kgcombustible}} \right]} = \left[ \frac{\text{kgSO}_2}{10^6 \text{kcal}} \right]$$

Donde:

% S = % en peso de azufre del combustible.

## 6. Requisitos y condiciones para la operación de los equipos de combustión.

### 6.1 Requisitos.

6.1.1 Los responsables de los equipos de combustión de las fuentes fijas referidas en esta Norma Oficial Mexicana deben observar, según proceda, los siguientes requisitos de operación:

6.1.1.1 Llevar una bitacora de operación y mantenimiento de los equipos de combustión, medición y análisis de las emisiones y de los certificados de calidad del combustible empleado.

6.1.1.2 La bitácora deberá tener como mínimo la siguiente información:

Control de operación: fecha, turno, hora de reporte, presión de vapor, temperatura de gases, temperatura del agua de alimentación, temperatura y presión de combustión, color de humo, purga de fondo, purga de nivel, disparo válvula de seguridad, consumo de combustible. Controles: de presión, bomba agua de alimentación paro y arranque, paro por fallo de flama

Control de emisiones contaminantes eficiencia, temperatura de gases, aire en exceso,  $\text{CO}_2$ , opacidad de humo, datos del combustible empleado según certificado, análisis de emisiones según Tabla 6: densidad de humo, partículas (PST), dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y análisis de agua de alimentación.

6.1.1.3 La medición y análisis de las emisiones deben realizarse con la frecuencia y métodos que se indican en la Tabla 6.

6.1.1.4 Los métodos equivalentes a que se refiere la Tabla 6 tendrán que ser los que se consideran en el Anexo 3 de esta Norma Oficial Mexicana, o algún otro que demuestre la misma precisión con previa autorización de la autoridad competente.

### 6.2 Condiciones.

6.2.1 Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera establecidos en las tablas 4 y 5 de la presente Norma Oficial Mexicana sólo podrán rebasarse en el caso de:

6.2.1.1 Operaciones de arranque del equipo de combustión, siempre que no excedan 15 min y la operación no se repita más de dos veces al día en equipos de capacidad menor a 43,000 MJ/h y 18 hrs para alcanzar la máxima carga o capacidad en los equipos mayores de 43,000 MJ/h

Cuando por las características de los procesos y/o de los equipos de combustión se justifique técnicamente que se requiere mayor tiempo para su arranque, lo deberán comunicar a la autoridad competente

6.2.1.2 Operaciones de soplado, siempre y cuando se ajusten a lo establecido en el punto 5.5 de esta Norma.

6.2.2 Para los efectos de cuantificación de las emisiones de humos, partículas suspendidas totales, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno deben seguirse los procedimientos establecidos en las Normas Mexicanas correspondientes, o en su caso, se deberá consultar a la autoridad competente

6.2.3 Cuando por una chimenea confluyan las emisiones gaseosas para ser descargadas a la atmósfera conjuntamente con las generadas por las de combustión la medición de las emisiones deberá realizarse por separado.

6.2.4 En el caso de que no se cuente con las especificaciones sobre la capacidad nominal del equipo de combustión, esta se determinará mediante la ecuación 6:

Ecuación 6

$$H_N = H_C \cdot V$$

Donde:

- $H_N$  = Capacidad térmica del equipo de combustión, expresada en megajoules por hora, (MJ/h).  
 $H_C$  = Poder calorífico del combustible empleado, expresado en megajoules por kilogramo, (MJ/kg).  
 $V$  = Consumo de combustible, expresado en kilogramos por hora, (kg/h).

6.2.5 Cuando se utilicen simultánea o alternadamente dos o más combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, la capacidad nominal del equipo de combustión se determinará mediante la ecuación 7.

Ecuación 7

$$H_{PN} = \frac{H_{C1} \cdot V_1 + H_{C2} \cdot V_2 + \dots + H_{Cn} \cdot V_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n}$$

Donde:

- $H_{PN}$  = Capacidad térmica ponderada del equipo de combustión, expresada en megajoules por hora (MJ/h).  
 $H_{C1}$  = Poder calorífico de cada uno de los combustibles empleados, expresado en megajoules por kilogramo (MJ/kg).  
 $V_i$  = Consumo de cada combustible, expresado en kilogramos por hora (kg/h).  
 $i$  = 1, 2, ..., n en donde "n" es el número de combustibles usados en un mismo equipo de combustión.

Para la presente Norma Oficial Mexicana se consideran los poderes caloríficos de los combustibles fósiles sólidos, líquidos y gaseosos indicados en el Anexo 4.

## 7. Vigilancia.

7.1 La Secretaría de Desarrollo Social por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, así como los Gobiernos del Distrito Federal, de las entidades federativas y, en su caso, de los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, vigilarán el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana.

## 8. Sanciones.

8.1 El incumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana, será sancionado conforme a lo dispuesto por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, su Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera y los demás ordenamientos jurídicos aplicables.

## 9. Vigencia.

9.1 La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

9.2 Los límites de emisión establecidos en las tablas 2 y 5 y los niveles regionales a que se refieren el numeral 5.3, serán aplicables a partir del 1o de enero de 1998.

En las zonas críticas en las que no exista disponibilidad de los combustibles con la calidad ecológica establezcan las normas oficiales mexicanas respectivas, el Instituto Nacional de Ecología, previa consulta al Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, suspenderá la aplicación de los límites de emisión de las tablas 2 y 5 por lo que hace a dióxido de azufre y partículas, aplicando los límites señalados en la Tabla 4 en tanto subsista dicha situación.

Dada en la Ciudad de México, D.F., a los veinticinco días del mes de noviembre de mil novecientos noventa y cuatro. - El Secretario de Desarrollo Social, Carlos Rojas Gutiérrez. - Rúbrica.

1994 AL 31 DE DICIEMBRE DE 1997  
**TABLA 4.**

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION MJ/h	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	DENSIDAD DEL HUMO	PARTICULAS (PST) mg/m <sup>3</sup> (kg/10 <sup>6</sup> kcal) (1) (2)			BIOXIDO DE AZUFRE ppm V (kg/10 <sup>6</sup> kcal) (1) (2)			OXIDOS DE NITRÓGENO ppm V (kg/10 <sup>6</sup> kcal) (1) (2)			EXCESO DE AIRE DE COMBUSTION % volumen (4)
		Número de mancha u opacidad	ZMCM	ZC	RP	ZMCM	ZC (5)	RP	ZMCM	ZC (3)	RP	
Hasta 5,250	Combustible o gasóleo	4	NA	NA	NA	1100 (4.08)	2100 (7.80)	2600 (9.81)	NA	NA	NA	60
	Otros líquidos	3	NA	NA	NA	1100 (4.08)	2100 (7.81)	2600 (9.81)	NA	NA	NA	
	Gaseosos	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
De 5,250 a 43,000	Líquidos	NA	100 (0.142)	425 (0.604)	600 (0.852)	1100 (4.08)	2100 (7.80)	2600 (9.81)	220 (0.588)	300 (0.801)	400 (1.064)	50
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	220 (0.563)	300 (0.767)	400 (1.023)	
De 43,000 a 110,000	Líquidos	NA	100 (0.142)	425 (0.604)	550 (0.781)	1100 (4.08)	2100 (7.81)	2600 (9.81)	180 (0.481)	300 (0.801)	400 (1.069)	40
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	180 (0.460)	300 (0.767)	400 (1.023)	
Mayor de 110,000	Sólidos	NA	70 (0.105)	325 (0.496)	435 (0.664)	1100 (4.32)	2100 (8.24)	2600 (9.81)	160 (0.449)	280 (0.785)	400 (1.122)	30
	Líquidos	NA	70 (0.099)	325 (0.462)	500 (0.710)	1100 (4.12)	2100 (7.81)	2600 (9.81)	160 (0.427)	280 (0.748)	400 (1.069)	
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	160 (0.409)	280 (0.716)	400 (1.023)	

TABLA 5  
10. ENERO DE 1998 EN ADELANTE

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION MJ/H	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	DENSIDAD DE HUMO  Número de mancha u opacidad	PARTÍCULAS (PST) mg/m <sup>3</sup> (kg/10 <sup>6</sup> kcal) (1) (2)			BIÓXIDO DE AZUFRE ppm V (kg/10 <sup>6</sup> kcal) (1) (2)			ÓXIDOS DE NITRÓGENO ppm V (kg/10 <sup>6</sup> kcal) (1)			EXCESO DE AIRE DE COMBUSTIÓN % volumen (5)
			ZMCM	ZC (3)	RP	ZMCM	ZC (3)	RP	ZMCM	ZC (4)	RP	
Hasta 5,250	Combustible o gasóleo	3	NA	NA	NA	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	50
	Otros líquidos	2	NA	NA	NA	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	
	Gaseosos	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
De 5,250 a 43,000	Líquidos	NA	75 (0.106)	350 (0.497)	450 (0.639)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	190 (0.507)	190 (0.507)	375 (1.0)	40
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	190 (0.486)	190 (0.486)	375 (0.959)	
De 43,000 a 110,000	Líquidos	NA	60 (0.085)	300 (0.426)	400 (0.568)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	110 (0.294)	110 (0.294)	375 (1.0)	30
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (0.281)	110 (0.281)	375 (0.959)	
Mayor de 110,000	Sólidos	NA	60 (0.090)	250 (0.375)	350 (0.525)	550 (2.16)	1100 (4.31)	2200 (8.16)	110 (0.309)	110 (0.309)	375 (1.052)	25
	Líquidos	NA	60 (0.085)	250 (0.355)	350 (0.497)	550 (2.04)	1100 (4.08)	2200 (8.16)	110 (0.294)	110 (0.294)	375 (1.0)	
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (0.281)	110 (0.281)	375 (0.959)	

Notas y significados de siglas en Anexo 2

54

**TABLA 6  
MEDICION Y ANALISIS DE GASES DE COMBUSTION**

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION MJ/h	PARAMETRO	FRECUENCIA MINIMA DE MEDICION	TIPO DE EVALUACION	TIPO DE COMBUSTIBLE
Hasta 5,250	Densidad de humo	1 vez cada 3 meses	puntual (3 muestras); mancha de hollín	líquido y gas
	CO <sub>2</sub> , CO, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	1 vez cada 3 meses	puntual (3 muestras); ver anexo 3	líquido y gas
	SO <sub>2</sub>	1 vez cada 3 meses	medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor	líquido
De 5,250 a 43,000	Partículas suspendidas totales	una vez por año	isocinético (mínimo durante 60 minutos); 2 muestras definitivas (2)	líquido
	NO <sub>x</sub>	una vez por año	continuo (4); quimiluminiscencia o equivalente	líquido y gas
	SO <sub>2</sub>	una vez por año	medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor	líquido
	CO <sub>2</sub> , CO, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	diario	puntual (3 muestras), ver anexo 3 o equivalente	líquido y gas
De 43,000 a 110,000	Partículas suspendidas totales	una vez por año	isocinético (mínimo durante 60 minutos); 2 muestras definitivas	líquido
	NO <sub>x</sub>	1 vez cada 6 meses	continuo (4); quimiluminiscencia o equivalente	líquido y gas
	SO <sub>2</sub>	una vez por año	medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor	líquido
	CO <sub>2</sub> , CO, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	una vez por turno	puntual (3 muestras), ver anexo 3 o equivalente	líquido y gas
Mayor de 110,000	Partículas suspendidas totales	1 vez cada 6 meses	isocinético (mínimo durante 60 minutos); 2 muestras definitivas	sólido, líquido
	NO <sub>x</sub>	permanente (3)	continuo (4); quimiluminiscencia o equivalente	sólido, líquido y gas
	O <sub>2</sub>	permanente	continua, campo magnético o equivalente, con registrador como mínimo o equivalente	líquido y gas
	SO <sub>2</sub>	una vez por año	medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor	sólido, líquido

**NOTAS:**

(1) Ver 6.1.1.4

(2) Ver 6.1.1.5

(3) El monitoreo continuo de NO<sub>x</sub> será permanente en las zonas metropolitanas de las ciudades de México, Guadalajara y Monterrey; con una duración de cuando menos 7 días una vez cada 3 meses en las zonas críticas, y con una duración de cuando menos 7 días una vez cada seis meses en el resto del país.

(4) Ver 4.13

Deberán realizarse las mediciones correspondientes a equipos de calentamiento industriales del ambiente de cualquier capacidad en enero y octubre de cada año

## ANEXO I

## NOTAS:

(1) Concentraciones referidas a 25 °C, 760 mm Hg, 5% de oxígeno en volumen y base seca. Ent en paréntesis se expresa el equivalente de la concentración en unidades de kg/10<sup>6</sup> kcal.

El factor para corregir el O<sub>2</sub> a la base del 5% de oxígeno, se calcula de acuerdo a la ecuación 7.

Ecuación 7

$$E_r = \frac{21 - O_r}{21 - O_m} \times E_m$$

Donde:

E<sub>r</sub> = Emisión calculada al valor de referencia del O<sub>2</sub>

E<sub>m</sub> = Emisión medida (NO<sub>x</sub> o CO)

O<sub>m</sub> = Valor medido para el O<sub>2</sub>

O<sub>r</sub> = Nivel de referencia para el O<sub>2</sub>

(2) Los valores de emisión de Partículas, Bióxido de Azufre y óxidos de Nitrógeno podrán ser determinados con promedios ponderados de fuente fija, haciendo uso del procedimiento descrito en el punto 5.2 de esta Norma.

(3) Se refiere únicamente a las Zonas Metropolitanas de Monterrey y Guadalajara y a las Ciudades de Tijuana, Baja California y Cd. Juarez, Chihuahua

(4) Determinado con la siguiente ecuación y medido antes del precalentador de aire o de cualquier infiltración que diluya los gases de combustión:

EA = (O<sub>2</sub> - 0.5 CO) 100 / (0.264 N<sub>2</sub> - O<sub>2</sub> + 0.5 CO); DONDE: O<sub>2</sub>, CO y N<sub>2</sub> corresponden al porcentaje en volumen de oxígeno, monóxido de carbono y nitrógeno respectivamente contenidos en los gases de combustión en base seca

(5) Para efectos del cumplimiento de los límites del bióxido de azufre, el corredor industrial Tampico-Madero-Altamira en el estado de Tamaulipas deberá cumplir con el valor establecido para el resto del país.

## SIGNIFICADO DE LAS SIGLAS:

ZMCM - Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

ZC - Zonas Críticas

RP - Resto del País

NA - No Aplica.

## ANEXO 2

## NOTAS:

(1) Concentraciones referidas a 25°C, 760 mm Hg, 5% de oxígeno en volumen y base seca. Entre paréntesis se expresa el equivalente de la concentración en unidades de kg/10<sup>6</sup> kcal.

El factor para corregir el O<sub>2</sub> a la base del 5% de oxígeno, se calcula de acuerdo a la ecuación 7.

Ecuación 7

$$E_r = \frac{21 - O_r}{21 - O_m} * E_m$$

Donde:

E<sub>r</sub> = Emisión calculada al valor de referencia del O<sub>2</sub>

E<sub>m</sub> = Emisión medida (NOx o CO)

O<sub>m</sub> = Valor medido para el O<sub>2</sub>

O<sub>r</sub> = Nivel de referencia para el O<sub>2</sub>

(2) Los valores de emisión de Partículas, Dióxido de Azufre y Óxidos de Nitrógeno podrán ser determinados con promedios ponderados de fuente fija, al hacer uso del procedimiento descrito en el punto 5.2 de esta Norma.

(3) Zonas críticas (especificadas en el punto 4.22 de esta norma).

(4) Se refiere únicamente a las Zonas metropolitanas de las ciudades de Monterrey y Guadalajara y las ciudades de Tijuana, Baja California y Cd. Juárez, Chihuahua.

(5) Determinado con la siguiente ecuación, y medido antes del precalentador de aire o de cualquier infiltración que diluya los gases de combustión:

EA = (O<sub>2</sub> - 0.5 CO) 100 / (0.264 N<sub>2</sub> - O<sub>2</sub> + 0.5 CO); donde O<sub>2</sub>, CO y N<sub>2</sub> corresponden al porcentaje en volumen de oxígeno, monóxido de carbono y nitrógeno respectivamente contenidos en los gases de combustión en base seca.

## SIGNIFICADO DE LAS SIGLAS:

ZC Zonas Críticas

NA No Aplica.

ZMCM Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

RP. Resto del país

## ANEXO 3

## CONTAMINANTES Y SUS METODOS DE EVALUACION PARA FUENTES FIJAS Y METODOS EQUIVALENTES

CONTAMINANTE	METODO DE EVALUACION	METODO EQUIVALENTE
Densidad de humo	• huella o mancha de hollin • opacidad	---
Particulas suspendidas totales	• isocinético	---
Oxidos de nitrógeno	• quimiluminiscencia	• infrarrojo no dispersivo
Oxidos de carbono	• infrarrojo no dispersivo • celdas electroquímicas* • orsat (O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> y CO)	---
Oxígeno	• celdas electroquímicas • paramagnéticos	• orsat (O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> y CO) • óxidos de zirconio (celdas electroquímicas)
SO <sub>2</sub>	medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor	Capacidad del equipo de combustión MJ/h
		Hasta 5,250 • vía húmeda (torino) • infrarrojo no dispersivo • celdas electroquímicas Mayores de 5,250 • vía húmeda • infrarrojo no dispersivo

Se calcula el valor dado que no se obtiene por medición directa.

## ANEXO 4

## PODER CALORIFICO

COMBUSTIBLE	MJ/kg DE COMBUSTIBLE
Gas natural	52
Gas L P	48
Butano	49
Isobutano	45
Propano	50
Butileno	49
Propileno	49
Metano	55
Petroleo diafano	46
Gasolina	47
Diesel	48
Gasoleo	42
Combustoleo pesado	42
Combustoleo ligero	43
Carbon mineral	Variable
Coque de petroleo	31

## ANEXO 5

## TABLA DE EQUIVALENCIAS

UNIDAD		X	=
MJ	megajoule	239	kcal
MJ	megajoule	0.277	kWh
kcal	kilocaloria	$4.186 \times 10^{-6}$	MJ
kcal	kilocaloria	$1.162 \times 10^{-3}$	kWh
kWh	kilowatio hora	3.6	MJ
kWh	kilowatio hora	860.4	kcal
kcal	kilocaloria	3.968	B.T.U
B.T.U	Unidad Termica Britanica	0.252	kcal
C.C	Caballo caldera	35.3	MJ/h
MJ/h	megajoule	0.028	C.C
S	Azulfre	2	SO <sub>2</sub>
SO <sub>2</sub>	Bioxido de azulfre	0.5	S

