



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

USO DE OXÍGENO PARA AHORRO DE ENERGÍA
EN HORNOS DE FUSIÓN DE VIDRIO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

MARÍA GUADALUPE MATA HERNÁNDEZ

DIRECTOR:

M en I. CUAUHTÉMOC LAGOS CHAVÉZ



CIUDAD DE MÉXICO

2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Objetivos generales.

- ✓ Comparar los sistemas de combustión tradicional con aire y sistema de combustión con oxígeno, aplicado al proceso de fusión de vidrio.
- ✓ Establecer los beneficios del uso de oxígeno en procesos de combustión para hornos de fusión de vidrio.
- ✓ Realizar balances de masa y energía para determinar los ahorros de combustible logrados con el empleo de oxígeno de alta pureza como comburente.
- ✓ Efectuar una corrida financiera para determinar la viabilidad económica del uso de oxígeno en hornos de fusión de vidrio.

Justificación

La industria química representa un importante sector en el mundo actual. Su impacto en la economía y en nuestro estándar de vida es evidente, dicha industria opera bajo un escenario económico y un ambiente competitivo. Existen fuertes interrelaciones entre componentes industriales tales que la introducción de una nueva tecnología puede afectar a varios procesos que componen en un momento dado la estructura de la industria, lo cual debe adaptar constantemente a cambios de mercados y patrones de desarrollo.

En el marco económico de un proceso u operación unitaria la cantidad de dinero que se obtiene de la operación debe exceder la cantidad de dinero que se requiere como insumos para que el proceso tenga éxito.

El desarrollo de la profesión de Ingeniero Químico tiene entre otras actividades, las de concebir, calcular, proyectar, hacer construir y funcionar instalaciones donde, de manera eficaz se lleven a cabo reacciones químicas u operaciones de separación, optimizando los recursos y adecuando los procesos para minimizar el consumo de energía para algún proceso en particular.

En la industria del vidrio la reducción del consumo energético se refleja económicamente en la optimización y la evaluación económica. Una parte medular que determina la eficiencia del proceso para este sector son los procesos de fundición, los cuales se rigen de acuerdo al tipo de horno que se esté utilizando y la eficiencia en la transferencia de calor y en la combustión que se obtenga, a partir de los métodos utilizados.

Las soluciones de problemas de transferencia de calor han experimentado un desarrollo sorprendente en los últimos años y por ello su conocimiento es imprescindible para la actuación del Ingeniero químico, dado que el conocimiento de lo anteriormente citado es la parte medular de la eficiencia energética, lo se refleja económicamente en la optimización y evaluación económica.

La amenaza del cambio climático y los compromisos adquiridos con el medio ambiente obligan al sector energético a realizar un gran esfuerzo en la reorientación de la producción de energía y técnicas de consumo de la misma, haciendo está más eficiente y reduciendo emisiones a la atmósfera

El desarrollo del presente proyecto pretende aportar una alternativa para la optimización de los procesos de fusión en la industria del vidrio, planteando una mejora para generar una combustión más eficiente con el uso de la *Oxicombustión*, utilizando O₂ de pureza elevada, ya que además de eliminar la mayor parte de N₂ de la atmósfera de combustión se reduce el volumen de los gases de escape , por lo cual es posible ahorrar energía porque no es necesario calentar el nitrógeno atmosférico a la temperatura de flama, y también se evita la formación de NO_x., y por tanto un ahorro de energía representa una combustión más completa y eficiente y así mismo un ahorro económico para el proceso.

En la implementación del cambio de sistemas de tratamiento con combustibles más limpios y el mejoramiento de las tecnologías de oxidación favorecen la eficiencia de la producción industrial al mismo tiempo que disminuye las intervenciones antrópicas sobre el ambiente.

En este documento se mencionan de forma breve diferentes procesos de fabricación de vidrio industrial. Se hace especial hincapié en los hornos de fusión, comentándose los factores que inciden en su consumo energético.

Se finaliza con la evaluación económica para dicho sector basados en la oxicombustión.

Índice

Capítulo 1 Fundamentos del Proceso de Combustión

1.1.	<i>Introducción</i>	1
1.2.	<i>Definiciones básicas</i>	3
1.3.	<i>Reacciones de combustión para algunos gases</i>	8
1.3.1.	<i>Gas Natural</i>	8
1.3.2.	<i>Gas Propano.</i>	9
1.3.3.	<i>Gas Butano.</i>	9
1.4.	<i>Mecanismo de combustión del gas metano</i>	10
1.5.	<i>Bases de combustión balance térmico</i>	12
1.6.	<i>Fuentes de suministro de aire</i>	17
1.7.	<i>Combustión perfecta</i>	19
1.8.	<i>Propiedades de los combustibles</i>	20
1.8.1.	<i>Propiedades de los combustibles Sólidos</i>	20
1.8.2.	<i>Propiedades de los combustibles Líquidos</i>	20
1.8.3.	<i>Propiedades de los combustibles Gaseosos</i>	26
1.9.	<i>Configuración de la Flama</i>	31
1.10.	<i>Temperatura de flama</i>	33
1.10.1.	<i>Clasificación de las flamas</i>	36
1.10.1.1.	<i>Flamas de premezcla</i>	36
1.10.1.2.	<i>Flamas de difusión</i>	38
1.10.2.	<i>Velocidad de la flama</i>	40
1.10.3.	<i>Límites de flamabilidad</i>	41
1.11.	<i>Estabilidad de la flama</i>	43
1.12.	<i>Efecto del % de premezcla, en la geometría de la flama</i>	46
1.13.	<i>Cálculo de la temperatura adiabática de flama</i>	47
1.14.	<i>Emisiones contaminantes generadas en procesos de combustión</i>	56
1.14.1.	<i>Óxidos de Nitrógeno</i>	57
1.14.2.	<i>Óxidos de Azufre (SO_x)</i>	62
1.14.3.	<i>Monóxido de Carbono (CO)</i>	64
1.14.4.	<i>Material Particulado</i>	64
1.15.	<i>Emisiones de Material Particulado generadas durante el proceso de producción de vidrio</i>	67

Índice de Figuras

Figura 1.1 Diagrama Sankey para un balance de calor típico de un horno.	14
Figura 1.2. Relaciones Viscosidad- Temperatura para aceites combustibles Típicos	25
Figura 1.3 Las columnas de la derecha enumeran las temperaturas requeridas para reducir la viscosidad de los líquidos para bombearlos a través de las tuberías.	26
Figura 1.4. Velocidad de mezcla vs. Velocidad de flama.	32
Figura 1.5. Zona de Combustión.....	33
Figura 1.6 Flama Bunsen	37
Figura 1.7.Comparación de Algunas Temperaturas de Flama.....	39
Figura 1.8. Características de Combustión de Algunos Combustibles.....	41
Figura 1.9 Retroceso de flama	44
Figura 1.10 Desprendimiento de flama	45
Figura 1.11.Efecto del % de premezcla, en la geometría de la flama.....	47
Figura 1.12 Reactor con flujo isotérmico constante.....	48
Figura 1.13 Relación entre la entalpía de combustión y la temperatura de flama adiabática	50
Figura 1.14 Calores específicos promedio de los gases.....	52
Figura 1.15 Iteraciones para cálculo de Temperatura de Flama	54
Figura 1.16 Gráfico de Sumatoria vs Tpropuesta.	55
Figura 1.17.Formación de NOx a medida que aumenta la temperatura en combustión convencional	61
Figura 1.18 Esquema de las medidas primarias para la reducción de emisiones de Óxidos de nitrógeno	62
Figura 1.19 Diferencias entre MP ₁₀ y MP _{2.5}	65
Figura 1.20 Partícula de Hollín.....	66
Figura 1.21 Emisiones en la producción de Vidrio.....	70

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Proporciones correctas para combustión perfecta.....	19
Tabla 1.2. Poder calorífico superior e inferior para diversos combustible.....	28
Tabla 1.3. Propiedades de algunos gases.	30
Tabla 1.4 Factores que influyen en el aspecto de la flama	46
Tabla 1.5. Mecanismos de Formación de los NOx	59

Capítulo 2 Combustión con Oxígeno

2.1	Introducción.....	73
2.2	Técnicas de combustión mejorada.	74
2.3	Teoría de la Oxidación.....	74
2.4	Formas de aplicación de oxígeno en sistemas de combustión.....	75
2.4.1	Enriquecimiento Simple ⁽¹⁾	76
2.4.2	Enriquecimiento con lanza ^{(2) (3) (4)}	77
2.4.3	Oxy-boosting ⁽⁴⁾	78
2.4.4	All Oxy Fuel (AOF) ^{(2) (3) (4)}	81
2.5	Aplicación en la Industria del Vidrio ⁽⁴⁾	82
	Oxígeno para la producción del Vidrio.....	82
	Pulido del Vidrio.....	83
	Oxidación “Flameless”.....	84
2.6	Ventajas de la combustión con oxígeno.....	85
	Procesos de Alta Temperatura.....	85
2.7	Eficiencia Térmica.....	86
2.8	Significado de aumentar la eficiencia de combustión.....	87
2.8.1	Flexibilidad.....	89
2.8.2	Ambiental.....	89
2.9	Tipos de quemadores.....	90
2.9.1	Quemadores.....	90
2.9.1.1	Quemadores de Combustibles sólidos.	90
2.9.1.2	Quemadores de combustibles líquidos.	91
2.9.1.3	Quemadores de Combustibles Gaseosos.	91
2.9.1.4	Quemadores de Premezcla.....	91
2.9.1.5	Manifold de quemadores o puertos pequeños.	92
2.9.1.6	Quemadores a presión.	92
2.9.1.7	Tipos de Pre-Mezcladores.	92
2.9.1.8	Quemadores a Gas de Mezcla en la boquilla.....	93
2.9.1.9	Quemadores Convencionales.	94
2.9.1.10	Quemadores Duales.	94
2.9.1.11	Tableros Típicos.....	95

Índice de figuras

Figura 2.1 Aplicación con quemadores Oxygas	75
Figura 2.2 Enriquecimiento Simple.....	76
Figura 2.3 Equipo de lanza de oxígeno	77
Figura 2.4 Enriquecimiento con lanza	78
Figura 2.5 Aplicación de Boosting en un horno tipo End Port.....	80
Figura 2.6 Aplicación de Boosting en un horno tipo Unit Melter.	80
Figura 2.7 Aplicación de AOF en un horno tipo Unit Melter	82
Figura 2.8 Pulido mediante un quemador de oxígeno	83
Figura 2.9 Cristales y vidrios de plomo y cuarzo pulidos con flama de oxígeno.....	84
Figura 2.10 Distribución de la temperatura en la cámara de combustión durante la combustión oxi-gas en modo flameless. La temperatura del horno es de 1200°C.	85
Figura 2.11 Influencia de la temperatura del aire de combustión y la concentración de oxígeno en la eficiencia de la combustión.....	88
Figura 2.12 Comparativo de Emisiones para combustión con Aire vs Oxígeno	90

Capítulo 3 Generalidades sobre Hornos de Fusión de Vidrio y procesos de producción.

3.1.	Introducción	99
3.2.	Industria del vidrio	101
3.2.1.	Producción de vidrio	103
3.2.1.1.	Tipos de vidrios	103
3.3.	Operaciones de la elaboración del vidrio	106
3.3.1.	Dosificación y Mezcla	107
3.3.2.	Conformado	109
3.3.3.	Procesos Secundarios y de Acabado	113
3.4.	Hornos de fusión	114
3.4.1.	Elementos generales que componen un horno para fundir vidrio	115
3.4.2.	Zona de fusión.....	116
3.4.3.	Profundidad	118
3.4.4.	Doghouse	119
3.4.5.	Superestructura	120
3.4.6.	Cámara de Combustión.....	120
3.4.7.	Paredes Laterales	120
3.4.8.	Bóveda	121
3.4.9.	Garganta	121
3.5.	Tipos de hornos utilizados en la industria vidriera.....	125
3.5.1.	Hornos de Fusión	125
3.5.2.	Horno Tipo Crisol	126
3.5.3.	Hornos de Cuba Convencionales	126
3.5.4.	Hornos con Recuperadores.....	127
3.5.5.	Hornos con Regeneradores.....	128
3.5.6.	Hornos de Fusión tipo UNIT-MELTER.....	131
3.5.7.	Hornos de Fusión Combinada	132
3.5.8.	Hornos de Recocido y temple	133
3.5.9.	Hornos de Oxidación	133

Índice de Figuras

Figura 3.1 Representación gráfica de las diferencias entre un cristal (a) y un vidrio (b)..... 100

Figura 3.2 Comparación del comportamiento del volumen específico con la temperatura de materiales cristalinos y no cristalinos. Los materiales cristalinos solidifican a la temperatura de fusión T_m La temperatura de transición vítrea T_g es una característica del estado cristalino. 101

Figura 3.3 Etapas básicas del proceso de producción de vidrio 107

Figura 3.4 Enformadora..... 108

Figura 3.5 Fabricación de Vidrio Plano 111

Figura 3.6 Procedimiento de Fabricación de Vidrio Plano Flotado 112

Figura 3.7Horno tipo Side Port 115

Figura 3.8 Relación entre el área de fusión y la relación entre la longitud y la anchura (flama en forma de U) para flamas transversales y en puerto trasero. 117

Figura 3.9 Ejemplo de construcción de gargantas..... 123

Figura 3.10 Diseño del empotrado de la garganta 123

Figura 3.11 Enfriamiento mejorado por aire 124

Figura 3.12 Enfriamiento en la garganta 125

Figura 3.13 Diagrama de Horno tipo End-Port 128

Figura 3.14 Tanque de horno típico puertos laterales (vista desde un extremo) 129

Figura 3.15 Tanque de horno típico puertos laterales (sección longitudinal). 130

Figura 3.16 Diagrama de Horno tipo Unit-Melter 132

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Tipos de Vidrio y sus características	105
Tabla 3.2 Composición química de Vidrios importantes	106
Tabla 3.3 Procedimientos de fabricación de Vidrio Plano	113

Capítulo 4 Eficiencia energética en hornos de fusión de vidrio

4.1	Introducción.....	137
4.2	Eficiencia térmica en hornos.....	138
4.2.1	Factores que determinan el consumo energético de los hornos de fusión de tipo continuo	138
4.2.1.1	Extracción Nominal.....	138
4.2.1.2	Factor de carga	139
4.2.1.3	Envejecimiento	139
4.2.1.4	Temperatura del aire secundario de combustión	139
4.2.1.5	Relación aire/combustible.....	139
4.2.1.6	Aislamiento.....	139
4.2.1.7	Porcentaje de cullet en la carga.	140
4.2.1.8	Otras mejoras.	140
4.3	Uso de oxígeno para mejorar la eficiencia energética.....	140
4.4	Influencia del oxígeno sobre el incremento en la temperatura de flama.....	141
4.5	Balances de materia y energía.....	145
4.5.1	Balance de materia en un sistema cerrado y abierto.....	145
4.5.1.1	Subdivisión de balances.....	146
4.5.1.2	Diagrama de Sankey	147
4.6	Caso de estudio. Horno tipo Unit Melter para producción artesanal de vidrio soplado.	147
4.6.1	Características de los hornos tipo Unit Melter.....	148
4.7	Cálculo del calor total requerido para el proceso de fusión	151
4.7.1	Cálculo de calor requerido para la descomposición de las materias primas	152
4.7.1.1	Cálculo de la cantidad de calor requerido para la fusión por materia prima para producción de una tonelada de vidrio. Intervalo de temperatura de 273.15 -298.15 K	157
4.7.1.2	Cálculo del calor requerido por materias primas durante las etapas de descomposición Dolomita. 298.15-797.65 K	160
4.7.1.3	Cálculo del calor requerido por materias primas durante las etapas de descomposición (Nitrato de sodio y calcita molida). Intervalo de temperatura [797.65-882.15 K]	165
4.7.1.4	Cálculo del calor requerido por materias primas durante las etapas de descomposición (Sulfato de sodio). Intervalo de temperatura [882.15-1092]K.....	170
4.7.1.5	Cálculo del calor requerido por materias primas durante las etapas de descomposición (Sulfato de sodio). Intervalo de temperatura [1092-1373.15K]	174
4.7.1.6	Vidrio ya formado en estado líquido. En un intervalo de temperatura de 1373.15-1730.85K. 178	
4.8	Cálculo de pérdidas de calor.....	184

4.8.1	Pérdidas de calor por cuerpo negro	184
4.8.2	Pérdidas de calor por paredes	186
4.9	Análisis de la eficiencia de los sistemas de combustión	190
4.9.1	Sistema. Aire-Gas Natural	190
4.9.1.1	Cálculo de Temperatura adiabática de flama	190
4.9.2	Sistema 100% Oxígeno-Gas Natural (AOF).....	195
4.10	Comparación entre los Sistemas de Combustión convencional con aire y el sistema AOF.....	196

Índice de Figuras

Figura 4.1 Comparación de algunas Temperaturas de Flama 144
Figura 4.2 Ejemplo de aplicación de diagrama de Sankey..... 147
Figura 4.3 Horno tipo Unit Melter vista plana..... 149
Figura 4.4 Unit Melter Elevación Longitudinal 150
Figura 4.5 Dimensiones del Horno 188

Índice de Tablas

Tabla 4.1 Requerimientos teóricos de energía para diferentes tipos de vidrio 152
Tabla 4.2 Composición de las materias primas para fabricación de vidrio sódico cálcico para 1 tonelada de vidrio..... 153
Tabla 4.3 Ecuaciones para el cálculo de calor específico y capacidades caloríficas de diversos componentes del vidrio sódico cálcico..... 154
Tabla 4.4 Temperaturas de descomposición de algunos compuestos. 155
Tabla 4.5 Reacciones de descomposición de las Materias primas. 156
Tabla 4.6 Requerimientos de energía para la descomposición de materias primas 182
Tabla 4.7 Cantidades de materias primas para 1 tonelada de vidrio sódico cálcico 183
Tabla 4.8 Boquillas del horno 185
Tabla 4.9 Composición química del refractario HYLALITE 28 y conductividades térmicas 186
Tabla 4.10 Cálculo de temperatura externa de las paredes..... 189
Tabla 4.11 Temperaturas de las paredes. 189
Tabla 4.12 Pérdidas de calor 189
Tabla 4.13 Ecuaciones para cálculo de capacidades caloríficas. 190
Tabla 4.14 Temperaturas adiabáticas en función del % de aire en exceso. 193

Índice de Gráficas

Gráfica 4.1 Flujo de combustible en función del aire en exceso 193
Gráfica 4.2 Variación de la Temperatura adiabática de Flama en función del Porcentaje de aire en exceso 194
Gráfica 4.3 Eficiencia en función de exceso de aire 195

Capítulo 5 Análisis económico del uso de Oxígeno en Hornos de Fusión de Vidrio

5.1	Introducción	199
5.2	Implementación de la Oxidación.....	200
5.2.1	Gas Natural	200
5.2.2	Oxígeno.....	202
5.3	Equipos para instalación del sistema AOF	203
a.	Tanques Criogénicos	203
b.	Vaporizadores	205
5.4	Caso de Estudio	207
	Balance	207

Índice de Figuras

Figura 5.1	Eficiencia térmica a diferentes concentraciones de oxígeno	203
Figura 5.2	Tanque criogénico	204
Figura 5.3	Vaporizador Ambiental.....	206
Figura 5.5	Diagrama de Sankey para un horno tipo Unit-Melter con sistema de combustión convencional	214
Figura 5.6	Diagrama de Sankey para un horno tipo Unit-Melter con sistema de combustión con oxígeno..	215

Índice de Tablas

Tabla 5.1	Capacidades para tanques criogénicos.....	205
Tabla 5.2	Resultados del sistema-Aire Gas Natural.....	211
Tabla 5.3	Resultados del sistema AOF.....	214
Tabla 5.5	Tabla comparativa de los sistemas Aire-GN vs AOF.....	216

Capítulo 1

Fundamentos del Proceso de Combustión

<<Los Ingenieros Químicos no son gente dulce y amable: les gustan las altas presiones y altas temperaturas >>

Steve LeBlanc

1.1. Introducción

Los procesos térmicos son los de mayor interés práctico por su escala de utilización a nivel mundial, siendo estos a la vez muy fáciles de realizar y muy difíciles de estudiar, sea el proceso de reacción química exotérmica automantenida por conducción de calor y difusión de especies, conocido como combustión.

El proceso de combustión en la ingeniería es uno de los más importantes, aunque con el paso de los años este ha disminuido, la mayor parte de la producción mundial de energía se hace por combustión de petróleo, carbón y gas natural.

Entre las aplicaciones están: la calefacción de habitáculos (hogueras, estufas, calderas), producción de electricidad (centrales térmicas), propulsión (motores alternativos, turbinas de vapor, turbinas de gas), proceso de materiales (reducción de óxidos, fundición, cocción), eliminación de residuos (incineración de basura), producción de frío.

Otras aplicaciones de la combustión, como producir altas temperaturas para iluminación o proceso de materiales, y su competencia con otros sistemas de generación de altas temperaturas (v.gr por resistencia eléctrica o por arco), se han visto también al hablar de los hornos.

El carácter multidisciplinario del proceso de combustión demanda un vasto soporte de ciencias básicas:

- La Termodinámica, que enseña si el proceso es posible a través de la composición final, la energía liberada y la temperatura alcanzada en el equilibrio;

- La Cinética química, que trata de predecir el mecanismo detallado de la reacción, la velocidad de la reacción, el por qué se producen radicales luminiscentes e ionizados, etc;¹
- La transmisión de calor y masa, que enseña cómo se difunden la energía térmica y las especies; y
- La mecánica de fluidos, que, con los datos anteriores, enseña a establecer los balances de flujos apropiados para permitir, al menos teóricamente, abordar la solución del problema.

La combustión es un proceso fácil de realizar porque genera mucha entropía y por tanto su viabilidad (tendencia a reaccionar) es muy alta; mucha energía ordenada en los enlaces químicos pasa bruscamente a energía térmica (desordenada) de las partículas producidas. De hecho, el mundo que nos rodea está integrado por mezclas reactivas en equilibrio metaestable, y a veces basta con forzar localmente la reacción para que se autopropague, normalmente formando un frente luminoso (flama). Sin embargo, el proceso de combustión es difícil de analizar por los siguientes motivos:

- Es un proceso multidisciplinario (termoquímico-fluidodinámico) fuertemente acoplado,
- Los procesos de transporte de especies y calor (fenómenos de no equilibrio) son dominantes,
- La fuerte exotermicidad da lugar a las altas temperaturas, enormes gradientes (flama), e importantes fuerzas de flotabilidad por dilatación diferencial,
- Enormes gradientes espaciales y los cortos tiempos de residencia en ellos provocan estados de no equilibrio local (quimiluminiscencia, ionización).

Por tales motivos este capítulo se dedicará a explicar las definiciones, bases, propiedades de los combustibles y sistemas de combustión.¹

¹ Mezclas Reactivas y combustión
<http://www4.tecnun.es>

1.2. Definiciones básicas

- Combustión es una reacción química de oxidación, relativamente rápida, que consiste en la unión de una materia combustible con el oxígeno, con desprendimiento de calor, que se desarrolla en fase gaseosa o heterogénea. Los grados de la combustión varían ampliamente, desde la combustión lenta hasta la combustión muy rápida o detonación. La velocidad de combustión y la integridad de la reacción de combustión o incineración dependen de la afinidad que presente el elemento combustible con el oxígeno y de las condiciones en que se realice la combustión (el tiempo, la temperatura y la turbulencia).²

Es esencial que los elementos del combustible tengan gran afinidad con el oxígeno.

- Combustible es una sustancia (sólida, gaseosa o líquida) que puede encender fácilmente, produciendo calor, luz u otra forma de energía.

Dos elementos, el carbono (C) y el hidrógeno (H₂) presentan una gran afinidad con el oxígeno (O₂) y se oxidan (queman) fácilmente produciendo calor.

El carbono se combina con el oxígeno produciendo bióxido de carbono y calor según la siguiente reacción si la oxidación es completa:



El hidrógeno se combina con el oxígeno formando vapor de agua y produciendo calor según la siguiente reacción:



² Mezclas reactivas y combustión
<http://www4.tecnun.es>

Otro elemento que aparece con frecuencia en los combustibles en cantidades pequeñas es el azufre (S), el cual también se combina con el oxígeno produciendo Bióxido de azufre y calor, de acuerdo a la siguiente reacción:



Un aspecto importante de estas reacciones es que son *exotérmicas*, es decir, se produce calor.

Los combustibles se combinan con el oxígeno en proporciones definidas y fijas. La ley de Avogadro establece que volúmenes iguales de gas, bajo condiciones idénticas de presión y temperatura, contienen el mismo número de moléculas. Por lo tanto, un pie cúbico de carbono en forma gaseosa y un pie cúbico de oxígeno, se combinan para formar $CO_2 + calor$, y dos pies cúbicos de hidrógeno se combinan con un pie cúbico de oxígeno para formar $2H_2O + calor$. Una mezcla de combustible y oxígeno en las proporciones exactas para completar la combustión, se define como *mezcla perfecta* y la combustión que se produce se denomina *combustión perfecta*, en relación estequiométrica.

Si es utilizada una cantidad mayor de combustible, en relación al oxígeno disponible, la reacción será incompleta y en lugar de producirse la reacción de la Ec.1.1, se da lugar a la Ec.1.4, que involucra la formación de monóxido de carbono (un gas indeseable y venenoso), produciendo menos calor.



A esta reacción se le llama *combustión incompleta* y a la mezcla reaccionante se le denomina *rica*. Los productos de combustión dan lugar a una atmósfera reductora (reduce los óxidos de metal a metal básico).

En caso contrario, cuando se suministra oxígeno en exceso, a la mezcla reaccionante se le conoce como *pobre*³, y se produce la siguiente reacción, en donde la combustión es completa ya que todo el carbón es oxidado:



La cantidad de calor liberada es la misma que con la combustión perfecta, pero la temperatura de flama y el calor disponible es menor, debido a que el oxígeno en exceso absorbe parte del calor.

Los productos de combustión después de la reacción se vuelven oxidantes (producen óxidos y cáscara sobre las superficies metálicas).

Los diferentes combustibles comerciales tienen diferentes características, dependiendo de las cantidades de carbono, hidrógeno y azufre disponibles en la molécula individual, por lo que el oxígeno requerido para quemar cada combustible tiene que ser determinado con base en las proporciones en las que se encuentran tales elementos.

El término *mecanismo de combustión* se refiere a las reacciones químicas mediante las cuales se obtienen los productos finales de combustión, a partir de una mezcla combustible y oxígeno.

En la actualidad, la teoría más aceptada que explica los mecanismos de combustión es la *Teoría de la Reacción en Cadena*. En esta teoría explica que una reacción compleja se utiliza mediante una serie de reacciones simples en las cuales se forman productos intermedios (eslabones), los cuales se forman en una reacción y luego se consumen en la siguiente, dando lugar a otros, hasta que se forman los productos finales.

Los eslabones o productos intermedios suelen ser:

- a) Átomos libres de gases diatómicos (H y O).

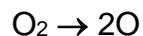
³ Como se infiere, el que la mezcla reaccionante sea rica o pobre, se refiere a la cantidad de combustible y no de oxígeno.

- b) Radicales libre (OH, CHO, CH, etc.).
- c) Compuestos orgánicos (formaldehído, alcoholes, etc.).

Los eslabones pueden existir únicamente una fracción de segundo, o sea que billones de ellos se forman y se destruyen simultáneamente en el transcurso de la reacción en cadena, la cual se divide en tres fases:

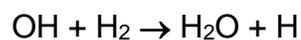
- a) Fase de iniciación.

Se producen los eslabones:



- b) Fase de propagación.

Se llevan a cabo reacciones intermedias que producen o multiplican los eslabones.



- c) Fase de terminación.

Se inhibe la formación de eslabones hasta que las reacciones se terminan. Los factores que inhiben la formación de eslabones pueden ser superficies frías, producción de productos finales, bajas presiones de componentes y bajas temperaturas.

El porcentaje de exceso de aire se calcula como la cantidad de aire adicional a la cantidad estequiométrica:

$$\%XS \text{ Aire} = \frac{(\text{Aire suministrado} - \text{Aire Esteq})(100)}{\text{Aire. Esteq.}} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Si $\% = 0$, mezcla estequiométrica

Si $\% > 0$, se tiene exceso de aire.

Si $\% < 0$, se tiene una deficiencia de aire, lo que se traduce en un exceso de combustible.

La *relación con exceso de combustible* (XS combustible) es la relación aire-combustible en una mezcla en la que hay más combustible que el requerido para una combustión perfecta, lo que implica que hay una deficiencia de aire.

$$\%XS \text{ Combustible} = \frac{(\text{Comb. suministrado} - \text{Comb. Esteq})(100)}{\text{Comb. Esteq.}} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Si $\% = 0$, mezcla estequiométrica.

Si $\% > 0$, se tiene exceso de combustible.

Si $\% < 0$, se tiene una deficiencia de combustible, lo que se traduce en un exceso de aire.

Los efectos perjudiciales del *exceso de aire* en una mezcla de combustión, se resumen como:

- a) Mayor consumo de combustible por unidad de producto.
- b) Temperatura de flama más baja.
- c) Menor transferencia de calor a la carga, debido a que la diferencia de temperaturas es menor.
- d) Riesgo de que se apague el quemador.

- e) Mayor cantidad de gases de combustión producidos y aumento en la presión interior del horno.

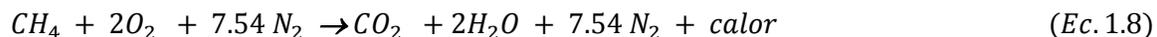
Los efectos perjudiciales del exceso de combustible en una mezcla de combustión, se resumen como:

- a) Mayor consumo de combustible por unidad de producto.
- b) Temperatura de flama más baja.
- c) La reacción de $C + O_2$ a CO , libera únicamente un 20% del total del calor que se libera con la reacción $C + O_2$ a CO_2 .
- d) Baja eficiencia térmica debido a que no todo el calor del combustible es liberado dentro del horno.
- e) Mayor costo económico del sistema.
- f) Riesgo potencial de explosión si el quemador se apaga debido a una atmósfera demasiado rica. El combustible adicional puede encontrar oxígeno adicional y una chispa u otra fuente de ignición que puede causar una explosión.

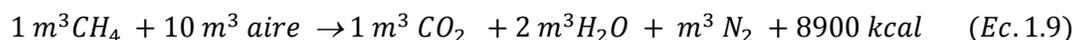
1.3. Reacciones de combustión para algunos gases

1.3.1. Gas Natural

La reacción principal en la combustión de gas natural es la combinación de metano con el aire:



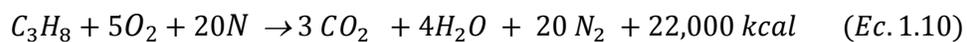
Debido a que cada m^3 de metano libera aproximadamente 8,900 kcal. al quemarse, se tiene:



De lo anterior se deduce que una mezcla de 10 m³ de aire con 1 m³ de gas natural se quemará completamente. La relación de aire a gas de 10 a 1 produce una combustión perfecta y por lo tanto es una mezcla estequiométrica.

1.3.2. Gas Propano.

El propano C₃H₈ es uno de los llamados gases licuados. Su origen son los subproductos de la refinación de la gasolina. La reacción de combustión del propano es:

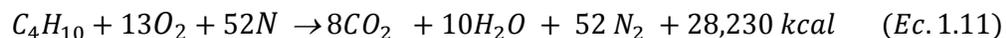


Un m³ de propano reacciona con 25 m³ de aire para producir 22,000 kcal. De forma equivalente, un pie³ de propano reacciona con 25 pies³ de aire para producir 2,500 BTU.

La presión de vapor de este gas lo hace fácil de vaporizar para uso doméstico e industrial a temperaturas ambiente normales.

1.3.3. Gas Butano.

El butano es otro de los gases llamados gases licuados. Su origen son los subproductos de la refinación de la gasolina. La reacción de combustión del butano es:



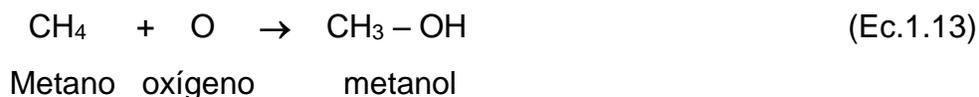
Un m³ de butano reacciona con 32 m³ de aire para generar 28,230 kcal. De forma equivalente, un pie³ de propano reacciona con 32 pies³ de aire para generar 3,200 BTU.

1.4. Mecanismo de combustión del gas metano

La reacción completa y terminada con productos finales es:

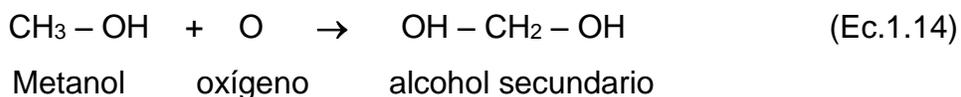


Pero realmente la primera reacción que ocurre es:

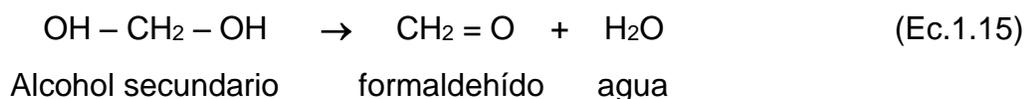


La fuerza de colisión conduce al átomo libre de oxígeno, a unirse a la molécula de metano rompiendo el enlace de un hidrógeno con el carbono. La apertura de los enlaces químicos, produce la liberación de energía que incrementa la temperatura de la molécula.

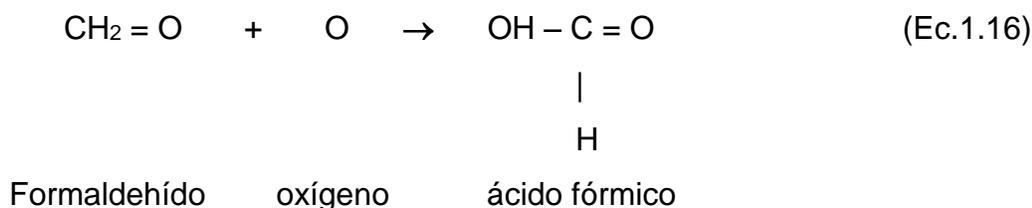
La siguiente fase es:



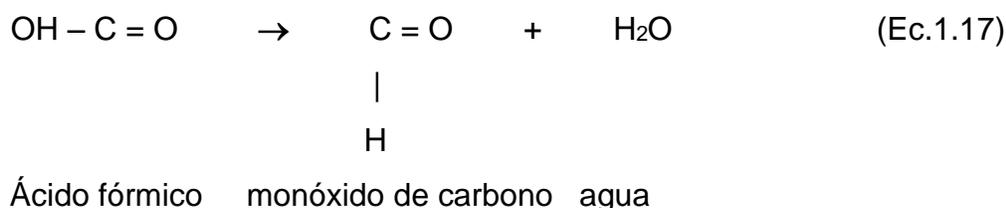
El metanol se une con otro oxígeno para formar un alcohol secundario. Este alcohol es muy inestable y se rompe casi inmediatamente, dando lugar a una molécula de formaldehído y una de vapor de agua:



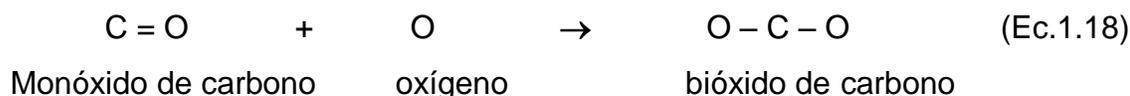
El formaldehído tiene gran afinidad por el oxígeno, por lo que cuando se le agrega otro átomo libre a la molécula, se forma un ácido:



Cada paso de la reacción en cadena, procede con un incremento en la energía con el consecuente aumento en la temperatura. En este estado de alta energía, el ácido fórmico es inestable y se descompone en monóxido de carbono y una segunda molécula de agua.



La molécula de monóxido de carbono se combina con el último átomo libre de oxígeno para formar bióxido de carbono y así se completa la reacción:



Todas estas reacciones toman lugar a niveles extremadamente altos de energía, se producen casi instantáneamente y a muy altas temperaturas. La temperatura molecular interna llega a ser del orden de los 2720°C (5000°F).

Las fases indicadas de la combustión producen una característica flama azul, cuando se presenta una mezcla aire-gas homogénea y hay suficiente oxígeno para combinarse con el metano.

Si durante el transcurso de la reacción en cadena, la temperatura de las moléculas baja drásticamente debido a algún factor externo, la reacción cesaría y los productos intermedios se quedarían aislados en sus diferentes estados de formación. Cuando esto ocurre se dice que la flama ha sido enfriada. Durante el proceso de combustión una flama contiene cantidades parciales de todos los productos intermedios, productos finales, eslabones y reactivos, en sus diferentes etapas de formación. Si algún medio refrigerante puesto en contacto con cualquier parte de la flama y se reduce la temperatura por debajo de los 650°C (1200 °F), la flama será enfriada y el proceso de combustión será inhibido con lo que se presentarán productos de combustión, alcoholes, aldehídos, monóxidos de carbono, dióxido de carbono y vapor de agua.

En la práctica, el enfriamiento de la flama puede presentarse en procesos industriales de baja temperatura, especialmente en calentadores de aire, secadores y estufas de recirculación. En el caso en que el aire se caliente por mezclado con gases calientes de chimenea, el aire puede convertirse en el medio refrigerante sobre la parte de la flama con la que entra en contacto en caso de que esté demasiado frío y la flama no esté protegida. Con el enfriamiento de la flama se da lugar a los productos indeseables; esta condición puede ser detectada al percibirse un olor agrio característicos de tales productos.

1.5. Bases de combustión balance térmico

El balance de energía de un horno es simplemente una relación de la manera en que fue utilizado el calor generado por el combustible. Se le denomina *calor total* al alimentado a un horno como resultado de la combustión de un combustible. Una parte de este calor es el que se utiliza para calentar el producto, al que se le llama *calor útil*.

La forma más simple de representar un balance de energía es:

$$\text{Calor Total} - \text{Calor Útil} = \text{Pérdidas} \quad (\text{Ec. 1.19})$$

La *eficiencia térmica total* de un horno o caldera, es la relación entre el calor útil y el calor total, expresado como porcentaje:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \left[\frac{\text{Calor útil}}{\text{Calor total}} \right] (100) \quad (\text{Ec. 1.20})$$

La *eficiencia térmica total* de un horno es importante porque proporciona la cantidad de calor total que se consume para calentar el producto, además de ser un medio de comparación del rendimiento con respecto a otros hornos, así como respecto a las modificaciones del mismo.

Las pérdidas, cantidades de calor que juegan un papel importante en el diseño se pueden clasificar en cinco grupos principales:

- ✓ Pérdidas con los gases de combustión.
 - Calor sensible de los gases de combustión a la temperatura de salida del horno, con respecto a la temperatura de referencia ambiente (pérdida seca).
 - Calor latente del vapor de agua contenido en los gases de combustión, con respecto a la temperatura de referencia ambiente (pérdida húmeda).
 - Calor perdido por combustión químicamente incompleta, cuando se trabaja con exceso de combustible.
- ✓ Calor perdido a través de paredes, techo y piso al ambiente exterior.
- ✓ Se incluyen pérdidas de calor por conducción a través de accesorios metálicos que atraviesan las paredes o techo, tales como termopares, anclajes mirillas etc.
- ✓ Calor perdido por radiación a través de aperturas tales como mirillas, puertas y entradas de quemador, etc.
- ✓ Calor utilizado para calentar los carros, soportes, cajas, transportadores.

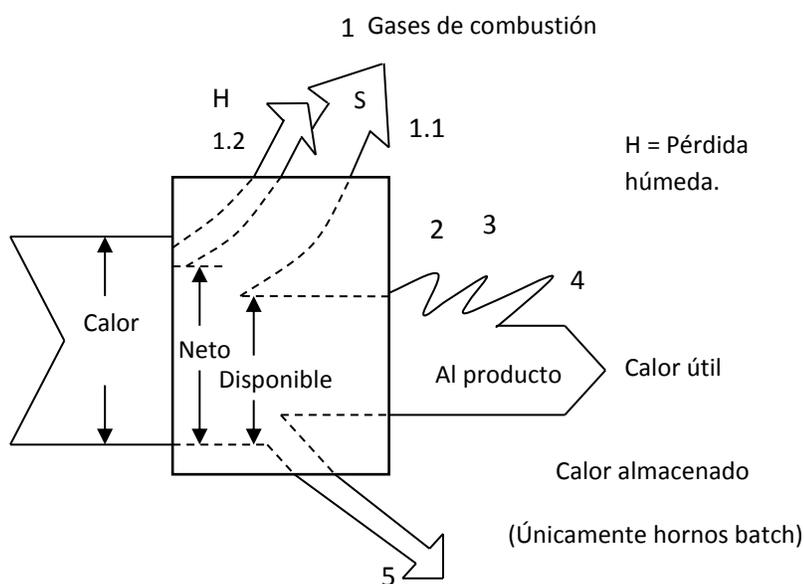
- ✓ Calor utilizado para calentar las paredes, techo y piso del horno, cuando se trata de un proceso por lotes.

Para hornos especiales existen otras pérdidas de calor tales como:

- a) Calor perdido a agua de enfriamiento.
- b) Calor perdido por radiación de superficies de metales líquidos en hornos de crisol.
- c) Calor perdido al introducir objetos o mecanismos de carga al horno.

Un diagrama Sankey es una gráfica de representar el balance de cualquier horno en una forma fácil de visualizar. En la Figura 1 se representa este diagrama generalizado para un horno típico.

Figura 1.1 Diagrama Sankey para un balance de calor típico de un horno.



$$\text{Calor total (CT)} - \text{Pérdida húmeda (H)} = \text{Calor Neto (CN)}$$

$$\text{Calor Neto (CN)} - \text{Pérdida seca (S)} = \text{Calor Disponible (CD)}$$

$$\text{Calor Disponible (CD)} - \text{Pérdidas 3 a 5} = \text{Calor Útil (CU)}$$

Los términos utilizados en el balance deben de estar en unidades consistentes de energía por unidad de tiempo, por unidad de combustible, o por unidad de producción.

Si un combustible se quema con la cantidad de aire correcta para una combustión perfecta, se producen gases de combustión (CO_2 , H_2O), los cuales son calentados por el calor generado, a una temperatura alrededor de los 1925°C (3500°F). Parte de este calor es transferido al horno y a su carga por radiación y convección.

Si los gases de combustión permanecieran dentro del horno el período de tiempo suficiente, los gases de combustión transmitirían calor al horno hasta que su temperatura se igualara con la del horno. En la práctica esto no sucede, sino que los gases salen del horno con un diferencial entre 55 a 110°C (100 a 200°F), arriba de la temperatura del horno.

La cantidad de calor que llevan estos gases es muy significativa ya que representa el 25% del calor total si la temperatura de los gases es de 427°C (800°F) y el 50% del calor total si la temperatura de los gases es de 1010°C (1850°F). La cantidad de energía que llevan los gases de combustión como entalpía (con y sin cambio de fase), se incrementa con la temperatura del horno.

La parte del calor total que permanece dentro del horno y su carga es el calor disponible que calienta la carga, el cuerpo del horno y el que debe compensar las pérdidas continuas a través de paredes, aperturas, etc. Normalmente se expresa como porcentaje del calor total o en unidades de calor por unidad de tiempo.

Como las pérdidas de energía por los gases de combustión varían con respecto a la temperatura, el calor disponible también varía. El calor disponible también presenta variación con respecto a la relación aire-combustible, ya que, con la relación estequiométrica perfecta, el calor disponible es el máximo a cualquier temperatura de los gases. Cuando se presenta una combustión con exceso de aire, el calor disponible disminuye, debido a que el exceso de aire (principalmente el N_2) almacena parte del calor total para elevar su temperatura con la de los gases calientes.

La baja eficiencia en un horno puede ser consecuencia del exceso de combustible sobre el calor disponible y es similar al efecto del exceso de aire. El exceso de combustible que entra en la mezcla no reacciona por falta de aire, pero sí absorbe

calor para llegar a la temperatura de los productos de la combustión y sale por la chimenea sin aportar calor al proceso.

La pérdida de calor por una combustión incompleta es aproximadamente proporcional a la deficiencia de aire en la mezcla. El calor útil es el calor que necesita la carga para alcanzar la condición de calentamiento deseado. El contenido total de calor de la carga de un horno es igual al calor sensible más el calor latente.

El **calor sensible** es el calor que causa un incremento en la temperatura de la carga y se determina con la siguiente fórmula, para cualquier material:

$$Q_{cs} = WCp(T_2 - T_1) \quad (\text{Ec. 1.21})$$

Donde:

$$Q_{cs} = \text{Calor sensible en kcal o BTU}$$

$$W = \text{Masa del material en kg o lb}$$

$$Cp = \text{Calor específico del material en } \frac{\text{Cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \text{ o } \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}}$$

$$T_2 = \text{Temperatura después del calentamiento en } ^\circ\text{C o } ^\circ\text{F}$$

$$T_1 = \text{Temperatura antes del calentamiento en } ^\circ\text{C o } ^\circ\text{F}$$

El **calor específico** de cualquier material, es la cantidad de calor requerida para incrementar la temperatura de una masa determinada de material, un grado de temperatura. Se expresa en kJ/kg^{°C} o J/g^{°C} o BTU/lb ^{°F} o Cal/g ^{°C}. Un BTU/lb ^{°F}, equivale a una Cal/g ^{°C}. El calor específico varía con la temperatura, pero para cálculos que no requieran de mayor precisión, puede utilizarse el valor del Cp promedio que resulte al evaluarlo a ambas temperaturas.

El **calor latente** se define como el calor absorbido por un material que no produce un incremento en su temperatura, sino un cambio de estado físico. El calor latente se expresa en unidades de energía por unidad de masa. El contenido total de

calor transferido o aceptado por un material, es la suma del calor sensible y el calor latente.

Se debe tener en cuenta que esta energía en forma de calor se invierte para el cambio de fase y no para el cambio de temperatura.

A condiciones de nivel del mar (1 atm = 760 mmHg), el agua ebulle y el vapor se condensa a 100°C, a esta temperatura se le da el nombre de punto de ebullición del agua. Si se desea que el agua pase de líquido a vapor o viceversa sin variar su temperatura, se necesita un intercambio de 540 cal/g. Este calor es necesario para cambiar de estado sin variar la temperatura se llama entalpía de vaporización.

Por definición el calor latente de vaporización de una sustancia es la cantidad de calor que requiere para cambiar un gramo de líquido en ebullición a 1 g de vapor, manteniendo constante su temperatura a una cierta presión.

$$Q_{lf} = W * \lambda_f \quad (\text{Ec. 1.22})$$

Donde:

$$Q_{lf} = \text{Calor suministrado para un cambio de fase en } \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \text{ o } \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$W = \text{Masa del material en kg o lb}$$

$$\lambda_f = \text{Calor latente de fusión } \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \text{ o } \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

1.6. Fuentes de suministro de aire

El suministro de oxígeno para la combustión usualmente proviene del aire. Debido a que el aire contiene una gran cantidad de nitrógeno, el volumen requerido de aire es mucho mayor que el volumen de oxígeno para la combustión.

El nitrógeno en el aire no forma parte de la reacción de combustión completa, más sin embargo va con ella durante su recorrido Sin embargo absorbe parte del calor y da como resultado la liberación de energía en forma de óxidos de nitrógeno y productos de la combustión en grandes cantidades. Lo anterior significa que a

menor temperatura de flama el resultado será visto en la producción de óxidos de nitrógeno debido al uso de aire en vez de oxígeno puro.

De lo anterior vemos que el aire involucrado en la combustión puede ser de tres tipos:

Aire Primario. Es el aire que se mezcla con el combustible en o dentro del quemador.

Aire Secundario. Es el aire usualmente suministrado alrededor del quemador. Por lo general sirve para dar forma y dirección a la flama además de enfriar la base del quemador y su estructura de soporte.

Aire terciario. Es aquella cantidad de aire enviada después del aire secundario o a través de todas las aberturas del horno.

1.7. Combustión perfecta

La combustión perfecta resulta de la mezcla y quema correcta del combustible y el oxígeno en proporciones exactas.

Si se suministra más oxígeno (exceso de aire), decimos que la mezcla es pobre y que la reacción es oxidante. Esto da como resultado una flama corta y más clara y definida. El exceso de oxígeno no forma parte de la reacción.

Combustible	Vol O ₂	Vol Aire	masa de O ₂	masa Aire	Pies ³ O ₂	Pies ³ aire	m ³ O ₂	m ³ Aire
	Vol comb.	Vol comb.	Peso comb.	Peso comb.	lbs comb	lbs comb	kg comb	kg comb
Acetileno, C ₂ H ₂	2.50	11.90	3.08	13.30	36.50	174.00	228.00	10.80
Benceno, C ₆ H ₆	7.50	35.70	3.08	13.30	36.50	174.00	228.00	10.80
Butano, C ₄ H ₁₀	6.50	31.00	3.59	15.50	42.50	174.00	265.00	12.60
Carbón, C	-	-	2.67	11.50	31.60	203.00	1.97	9.39
Monóxido de Carbono, CO	0.50	2.38	0.57	2.46	6.76	150.00	0.42	2.01
Etano, C ₂ H ₆	3.50	16.70	3.73	16.10	44.20	32.20	276.00	13.10
Hidrógeno, H ₂	0.50	2.38	8.00	34.50	94.70	451.00	5.92	28.20
Ácido Sulhídrico, H ₂ S	1.50	7.15	1.41	6.08	26.70	79.50	1.04	4.97
Metano, CH ₄	2.00	9.53	4.00	17.20	47.40	228.00	2.96	14.10
Naftaleno, C ₁₀ H ₈	-	-	3.00	12.90	35.50	169.00	2.22	10.60
Octano, C ₈ H ₁₈	-	-	3.51	15.10	41.60	198.00	2.60	12.40
Propano, C ₃ H ₈	5.00	23.80	3.64	15.70	43.10	205.00	2.69	12.80
Propileno, C ₃ H ₆	4.50	21.40	3.43	14.80	40.60	193.00	2.54	12.10
Sulfuro, S	-	-	1.00	4.31	11.80	56.40	0.74	3.52

Tabla 1.1 Proporciones correctas para combustión perfecta.

Fuente: North American Combustion Handbook. 3ª. Ed., North American Mfg. Co., E.U.A.,1986.

1.8. Propiedades de los combustibles

Los combustibles son sustancias orgánicas utilizadas exclusiva y principalmente para la producción de calor útil. Pueden dividirse en las tres clases naturales, combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

1.8.1. Propiedades de los combustibles Sólidos

El diseño y operación de un equipo que maneje combustible sólido debe poner una cuidadosa atención a muchas de las propiedades del combustible, entre las cuales se encuentran el poder calorífico, contenido de materia volátil, contenido de ceniza, contenido de humedad, temperatura de fusión de ceniza y propiedades de aglomeración.

1.8.2. Propiedades de los combustibles Líquidos

Resulta importante entender algunas de las propiedades por las que se clasifican combustibles, como son:

- a) *Densidad (density)*: Masa por unidad de volumen de un líquido. En el sistema métrico se denota en Kg/m³, Kg/lit, y en el sistema inglés como lb/gal, lb/pie³.
- b) *Gravedad específica (specific gravity)*: Relación de la densidad de un líquido con respecto a la densidad del agua a 20°C.
- c) *Gravedad API (API Gravity)*: Propiedad similar a la densidad, pero expresada en unidades de grados API (°API). La gravedad API se puede definir por la siguiente fórmula:

$$\text{Gravedad API en } ^\circ\text{API} = \left(\frac{141.5}{\text{Gravedad específica a } 15.6^\circ\text{C}} \right) - 131.5 \quad (\text{Ec. 1.22})$$

A 60°F el peso específico del agua es de 62.3 lb/ft³, 8.34 lb/US gallon, o 1000 kg/m³, por lo tanto la gravedad específica del agua es de 1.0, la gravedad del agua en grados API es 10°. Las relaciones entre estas unidades se encuentran en las siguientes formulas.

$$spgr_{60/60F} = \frac{141.5}{\text{°API} + 131.5} \text{ donde } \text{°API} \text{ se miden a } 60^{\circ}\text{F}(15.6^{\circ}\text{C})$$

$$spgr_{60/60F} = \frac{\text{lb} / \text{ft}^3}{62.3} \text{ donde } \text{lb} / \text{ft}^3 \text{ se miden a } 60^{\circ}\text{F}(15.6^{\circ}\text{C})$$

$$spgr_{60/60F} = \frac{\text{lb} / \text{gal}}{8.34} \text{ donde } \text{lb} / \text{gal} \text{ se miden a } 60^{\circ}\text{F}(15.6^{\circ}\text{C})$$

La gravedad específica de un combustible líquido cambia de acuerdo a su temperatura debido a expansión térmica (cuando la temperatura se incrementa) y contracción térmica (cuando la temperatura decrementa. Cuando una gravedad específica es especificada, la temperatura a la cual fue medida, debe también especificarse.

d) *Temperatura de inflamación (Flash point)*: Temperatura mínima a la cual un combustible líquido, en un contenedor abierto, vaporiza lo suficiente para que al acercarse una flama externa, los vapores se consuman instantáneamente, produciéndose una flama momentánea, es decir mientras un combustible es calentado, su vapor se acumula arriba de la superficie del líquido. Si está lo suficientemente concentrado, la exposición a una flama abierta resultará en un estallido, o flash. La temperatura más baja a la cual ocurre se le llama el flash point.

e) *Punto de ignición (Fire point)*: Temperatura mínima a la cual un combustible líquido, en un contenedor abierto, vaporiza lo suficiente para que al

acercarse una flama externa los vapores enciendan y mantengan una flama por un mínimo de cinco segundos.

El Fire point es la temperatura a la cual la flama se sostiene por lo menos 5 segundos. Los puntos Flash y Fire indican hasta qué punto se pueden fraccionar los combustibles líquidos. Es de importancia ya que indican relativamente el peligro de almacenamiento de varios combustibles

En la práctica, los estándares comerciales marcan límites máximos y mínimos de temperatura de inflamación, por razones de seguridad de almacenamiento y características de ignición. Un criterio aceptado para los límites bajos de la temperatura de inflamación es:

- Un combustible líquido sin precalentamiento debe tener una temperatura de inflamación mínima de 38°C (100°F).
- Un combustible líquido que requiera precalentamiento debe tener una temperatura de inflamación mínima de 49 a 66°C (120 a 150°F). Por debajo de los 49°C se considera peligroso.

El tipo de equipo, localización de los tanques de almacenamiento, requerimientos de precalentamiento y condiciones del equipo, son factores que influyen para fijar los límites bajos.

Cuando los venteos de tanques de almacenamiento están muy cerca de edificaciones, el calentamiento del combustible por el sol, causará la formación de vapores del combustible que pueden escapar hacia los edificios, haciéndose presente el riesgo de incendio.

Cualquier fuga en las tuberías o en los equipos, puede construir un riesgo de incendio cuando se utilizan combustibles con muy bajo punto de inflamación.

- f) *Punto de deslizamiento (pour point)*: La temperatura a la cual una muestra de un combustible líquido no fluirá a condiciones estándar. Esta propiedad

proporciona un índice de los problemas de almacenamiento y de manejo que el combustible trae consigo, a temperaturas muy bajas.

g) *Contenido de carbón (carbon residue)*: Cantidad de carbón depositada como residuo después de que una muestra de combustible líquido ha sido evaporada, expresada como porcentaje. Este índice proporciona una idea muy imprecisa acerca de la probabilidad de que un combustible deposite carbón en una cámara de combustión.

h) *Contenido de Agua y sedimentos (water and sediment)*: Cantidad de agua libre y lodos que se encuentran emulsificados o depositados en un combustible líquido, expresada como un porcentaje de acuerdo a la prueba BSW (Bottom sediment and water). El agua en el combustible tiende a producir una combustión inestable. El sedimento tiende a tapar las boquillas de los quemadores, reguladores y filtros.

Estas propiedades se determinan centrifugando 50 ml de aceite combustible mezclado con 50 ml de bencol al 90% de 1400 rpm a 1500 rpm y 120°F. El agua y el sedimento son acumulados en el fondo y medidos. Cualquier apreciable cantidad de agua causará flamas discontinuas. Los sedimentos tienden a obstruir a los quemadores y los equipos de control

i) *Contenido de ceniza (ash content)*: Medida en % en masa, se determina quemando el material combustible de un aceite con masa conocida. La materia mineral realmente es la ceniza y usualmente consiste de una diminuta cantidad de tierra o arena. La ceniza no es un problema significativo en los quemadores, pero puede afectar la transferencia de calor de las superficies, o fundirse y atacar a los refractarios.

j) *Viscosidad (viscosity)*: Se define como la resistencia de un líquido a fluir. Se determina midiendo el tiempo en que cierta masa de líquido, a cierta temperatura, fluye a través de un orificio estandarizado, por acción de la gravedad. Las unidades más comunes en las que se expresa la viscosidad son:

- a) Segundos Saybolt Universales (SSU).
- b) Segundos Saybolt Furol (SSF).

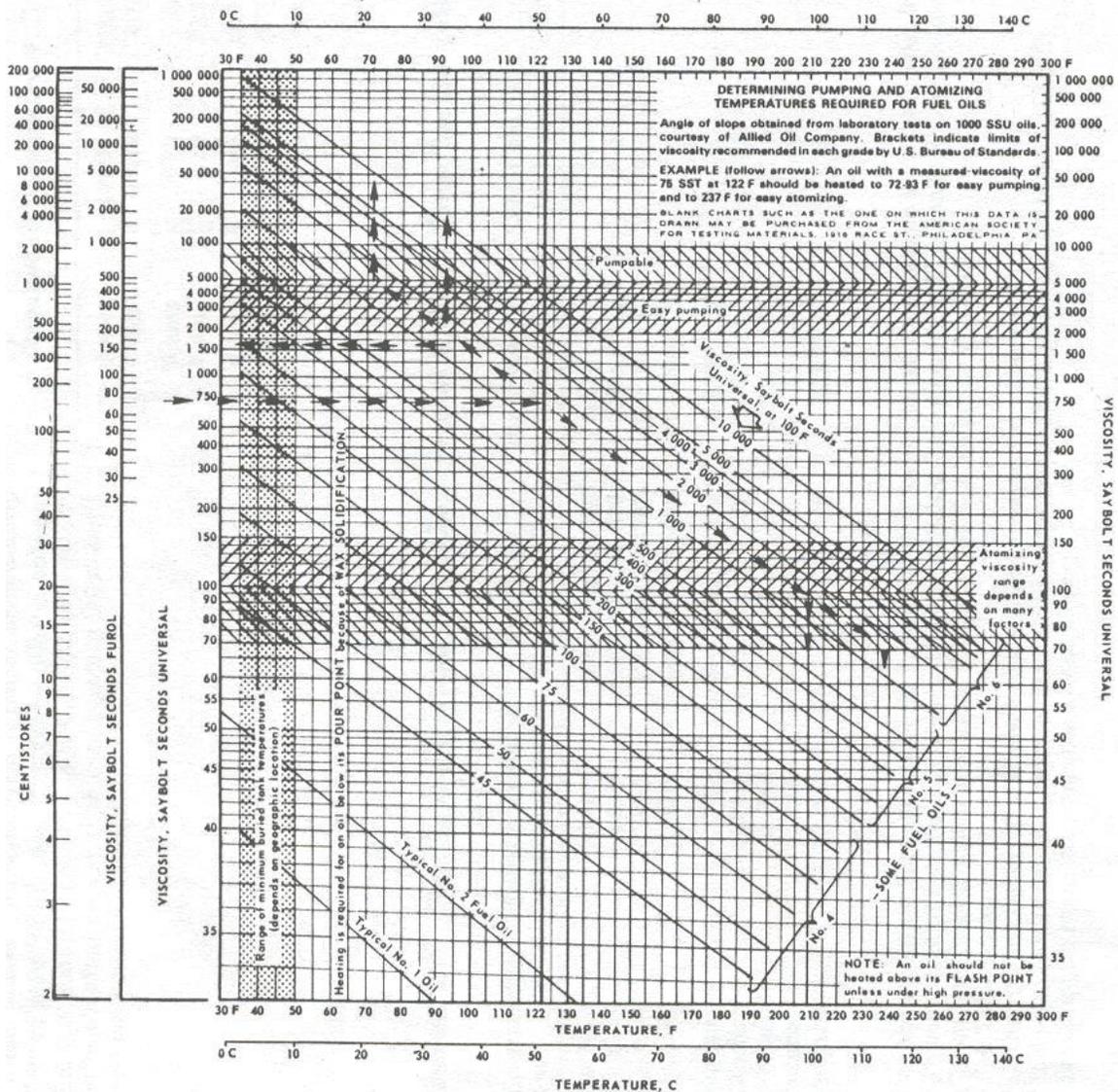
El instrumento para medir la viscosidad se llama viscosímetro. Cuando se da una lectura de viscosidad, es necesario mencionar el tipo de viscosímetro utilizado (el Universal o el Furol) y la temperatura a la que fue tomada la lectura. Una viscosidad de 200 SSF a 122°F significa que una muestra de 60 cm³ de líquido tardó 200 segundos en fluir a través de un viscosímetro Furol, a una temperatura de 122°F.

El viscosímetro Universal se utiliza para medir viscosidades hasta 1000 segundos, a una temperatura de 38°C (100°F); mientras que el viscosímetro Furol se utiliza para medir viscosidades arriba de 1000 segundos, a una temperatura de 122°F (50°C).

La relación de las escalas Universal y Furol a la misma temperatura es de 10 a 1 aproximadamente.

La viscosidad cinemática es una forma de expresar y medir la viscosidad. El viscosímetro utilizado para determinar esta viscosidad es de mayor grado de precisión. La unidad de viscosidad cinemática es el centistoke. La diferencia básica que existe al medir la viscosidad cinemática con respecto a los métodos Universal y Furol, radica en el viscosímetro, el cual tiene una columna de líquido constante, con lo que se tiene una presión constante de líquido sobre el orificio, proporcionando una mayor precisión en la medición, ya que los viscosímetros Universal y Furol, tienen columnas de líquido variables.

Cuando la temperatura de un combustible líquido se incrementa, su viscosidad se reduce y fluye más fácilmente. De aquí que los aceites pesados sean frecuentemente calentados antes de ser bombeados a las líneas de alimentación.



Fuente: North American Combustion Handbook. 3ª. Ed., North American Mfg. Co., E.U.A.,1986.

Figura 1.2. Relaciones Viscosidad- Temperatura para aceites combustibles Típicos

Si la viscosidad de un aceite en particular es conocida a dos temperaturas diferentes. Una línea recta puede ser dibujada entre los dos puntos conocidos en la gráfica anterior para conocer las características viscosidad-temperatura de dicho combustible.

El efecto de la viscosidad en la atomización del aceite es una importante consideración para una combustión completa y limpia. Una buena combustión

depende una atomización apropiada del combustible íntimamente mezclado con el aire. Con quemadores de atomizador de baja presión, una viscosidad mayor del rango de 70 a 100 SSU tiende a producir gotas demasiado largas para una mezcla adecuada del aceite con el aire, produciendo formación de carbón en los blocks y dentro del horno. Otra consideración importante es que la variación de la viscosidad afecta considerablemente los efectos del flujo a través de los orificios o de las válvulas, por lo cual es importante determinar el grado de calentamiento para la viscosidad de trabajo requerida para un control confiable y una combustión limpia.

Figura 1.3 Las columnas de la derecha enumeran las temperaturas requeridas para reducir la viscosidad de los líquidos para bombearlos a través de las tuberías.

		Required oil temperature, F, C		Kinematic Viscosity			
		10 000 SSU	2200 cs	2000 SSU 440 cs		100 SSU 20.7 cs	
Fuel oil designation	6 max	10 000	2200	138 F	59 C	265 F	129 C
	6 min	1 000	220	82	28	195	91
	5 max	750	165	72	22	182	83
	5 min	150	32.1	20	-7	122	50
	4 max	100	20.7	2	-17	100	38
	4 min	45	6.9	-75	-59	27	-3
	2 max	38	3.5	-	-	2	-17
		Viscosity at 100 F, 38 C					

Fuente: North American Combustion Handbook. 3ª. Ed., North American Mfg. Co., E.U.A.,1986

1.8.3. Propiedades de los combustibles Gaseosos

Los combustibles gaseosos pueden ser analizados volumétricamente en términos de sus componentes químicos que contienen. Otras propiedades importantes se discuten a continuación.

- a) *Gravedad específica de un gas*: Es una medida conveniente de la densidad de un gas relativa a la del aire (0.0763 lb/ft³ o 1.225 kg/m³ a condiciones estándar).

$$\text{Grav. Espec} = \frac{\text{densidad del gas}}{\text{densidad del aire}} = \frac{\text{densidad de gas } \text{lb}/\text{ft}^3}{0.0763} = \frac{\text{densidad de gas } \text{kg}/\text{m}^3}{1.225} \quad (\text{Ec. 1.23})$$

b) *Poder Calorífico.*

Es el calor total obtenido en una reacción de combustión de una cantidad específica de combustible a las condiciones estequiométricas correctas de aire, ambos estando a 60°F cuando la combustión inicia, y los productos de la combustión han sido enfriados hasta 60°F antes de que el calor liberado sea medido. También conocido como poder calorífico superior.

Poder Calorífico Inferior. Es el valor del Poder Calorífico Superior menos el calor latente de vaporización del agua formada por la combustión del hidrógeno en el combustible. Para algún combustible sin hidrógeno los valores de Poder Calorífico Superior e Inferior son los mismos. Las cantidades de calor son medidas en BTU, kilocalorías, Whatts-Segundo, o Joules.

Mediciones experimentales han determinado la cantidad de calor liberado en una combustión perfecta para varios combustibles.

Si cierto combustible se mezcla con la cantidad apropiada de aire y se coloca dentro de una cámara cerrada dónde la liberación de energía se pueda medir y controlar, la cantidad total de calor generado dependerá de la temperatura de los gases de combustión. Por ejemplo, una libra de diésel libera alrededor de 18,500 BTU (4662 kcal, 19.5 MJ) si los productos son enfriados hasta 15.6 °C (60°F), pero sólo libera 16,300 (4,108 kcal, 17.2 MJ) si se enfrían hasta 260°C (500°F). Cuando una perfecta mezcla de combustible y aire originalmente a 15.6 (60°F). se quema y posteriormente se enfrían hasta 15.6 °C (60°F) el calor total es liberado y es un término del Poder Calorífico Superior del combustible. El término Poder Calorífico Inferior o Neto es usado en algunos países, por lo tanto la tabla de abajo muestra algunos valores típicos, y deberán tomarse como tal, debido a que éstos pueden variar debido a la composición de cada uno por región geográfica o del país dónde se emplee.

Poder calorífico superior e inferior para diversos combustibles						
Combustible*	Poder calorífico por unidad de volumen			Poder calorífico por unidad de masa		
	BTU/pie3	kcal/m3	MJ/m3	BTU/lb	kcal/kg	MJ/kg
Acetileno	1.477	13.141	55.09	21.502	11.947	50.01
	1.426	12.687	53.19	20.769	11.539	48.31
Gas de Alto Horno	92	819	3.43	1.179	655	2.74
	92	819	3.43	1.079	599	2.51
Butano Comercial	3.291	29.279	122.75		-	0
	2.991	26.61	111.56		-	0
Butano	3.271	29.101	122.01	21.321	11.846	49.59
	3.018	26.851	112.57	19.678	10.933	45.77
Monóxido de Carbono	321	2.856	11.97	4.347	2.415	10.11
	321	2.856	11.97	4.347	2.415	10.11
Gases de Coque	554	4.929	20.66		-	0
	497	4.422	18.54		-	0
Etano	1.773	15.774	66.13	22.323	12.403	51.92
	1.622	14.431	60.5	20.418	11.344	47.49
Gasolina	-	-	0.00		-	0
	-	-	0.00		-	0
Hidrógeno	325	2.891	12.12	61.095	33.944	142.11
	275	2.447	10.26	51.623	28.682	120.08
Ácido Sulfídrico	646	5.747	24.10	7.097	3.943	16.51
	595	5.294	22.19	6.537	3.632	15.21
Metano	1.012	9.004	37.75	23.875	13.265	55.53
	911	8.105	33.98	21.495	11.943	50
Metanol	752	6.69	28.05	9.7	5.389	22.56
	651	5.792	24.28	8.4	4.667	19.54
Gas Natural	1000	8.897	37.30		-	0
	910	8.096	33.94		-	0
Propano	2.524	22.456	94.15	21.669	12.039	50.4
	2.322	20.658	86.61	19.937	11.077	46.37
Propano Comercial	2.499	22.233	93.21		-	0
	2.319	20.632	86.50		-	0

*Combustibles (Calor de vaporización a temperatura de ebullición y 14.7 psia, BTU/lb) <pies cúbicos ideales por US galones de líquido>
Fuente: North American Combustion Handbook. 3ª. Ed. North American Mfg.Co., E.U.A., 1986.

Tabla 1.2. Poder calorífico superior e inferior para diversos combustible

Existen dos expresiones para el poder calorífico de un combustible gaseoso

- Poder Calorífico Alto o Bruto:

El calor total obtenido de la combustión de una cantidad específica de gas y su cantidad de aire estequiométricamente correcta, iniciando cuando ambos están a 60°F y terminando cuando los productos se enfrían hasta 60°F.

- Poder Calorífico Bajo o Neto:

El valor del poder calorífico alto menos el calor latente de vaporización del agua formado por la combustión del hidrógeno contenido en el combustible. Para los combustibles que no contienen hidrogeno, el valor del poder calorífico alto y el bajo es el mismo.

- c) Contenido condensable de Hidrocarburos

Los términos húmedo o seco indican si los gases naturales contienen más o menos de 0.1 galones de hidrocarburos condensables (usualmente gasolina natural) por cada 1000 ft³ de gas.

- d) Contenido de azufre

Los términos dulce y amargo indican una pequeña o gran proporción de sulfuro de hidrógeno (H₂S) u otros compuestos sulfurados.

- e) Expansión de los gases

Todos los gases son comprensibles. Están sujetos a la expansión y a compresión conforme su presión y temperatura cambian.

Un metro cubico de gas no tiene mucho significado si no se ha especificado la temperatura, presión y el tipo de gas al que se hace referencia. De la tabla anterior, es aparente que una libra de aire puede ocupar un volumen desde 1.68 pies cúbicos hasta 18.13 pies cúbicos, o el gas natural, desde 2.8 hasta 30.22 pies cúbicos, simplemente variando la temperatura o la presión en un rango relativamente pequeño.

$$PV = NRT \quad (\text{Ec. 1.24})$$

La ecuación 1.24 se conoce como la ley del gas ideal o la ley general de los gases. R es la constante de gas universal. El valor de R depende de las unidades en las cuales se haya especificado el sistema con el cual se esté trabajando.

Gas	Masa (M)	Densidad, stp lb/ft ³	Gravedad del Gas
Aire	28.9	0.0762	1.00
Butano C ₄ H ₁₀	58.1	0.1533	2.02
Bióxido de Carbono, CO ₂	44.0	0.1161	1.52
Metano CH ₄	16.0	0.0456	0.59
Nitrogeno, N ₂	28.0	0.0739	0.97
Oxígeno, O ₂	32.0	0.0844	1.11
Propano, C ₃ H ₄	44.1	0.1164	1.53
Vapor de Agua, H ₂ O	18.0	0.0475	0.62

Tabla 1.3. Propiedades de algunos gases.

Fuente: Elaboración propia

Mediante la sustitución directa de dos valores conocidos en la ecuación de la ley general del gas ideal, el tercer valor puede ser determinado. Sin embargo, si en un sistema dado el volumen es conocido a una condición entonces el volumen a otra serie de condiciones puede ser determinado utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (\text{Ec. 1.25})$$

Donde las presiones y temperaturas están en unidades absolutas.

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} \times \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{Ec. 1.26})$$

$$Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1} \times \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{Ec. 1.27})$$

En la práctica, es común manejar los gases a condiciones estándar. En EU las condiciones de presión y temperatura estándar son a 14.69 psi y a 60°F.

El problema de la expansión del gas debe mantenerse en mente cuando se trabaja con un flujo de gas o aire. La gravedad de un gas puede ser encontrada para cualquier gas a cualquier temperatura y presión utilizando las siguientes expresiones:

$$G_{STP} = \frac{M_{gas}}{M_{aire}} = \frac{M_{gas}}{28.9} \quad (Ec. 1.28)$$

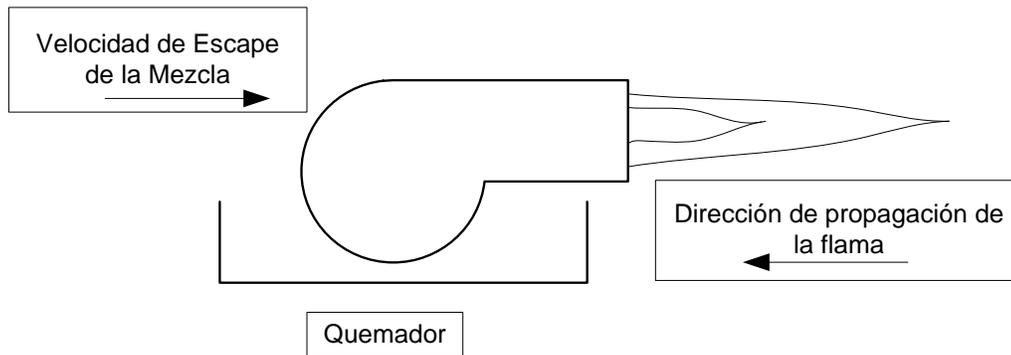
1.9. Configuración de la Flama

Cuando una mezcla de aire combustible alimentada a través de un tubo, sale por el extremo abierto del tubo y se pone en contacto con una fuente de ignición (chispa eléctrica, superficie caliente, otra flama, etc.), se forma una flama cuando la velocidad de escape se iguala con la velocidad de propagación de la flama.

Si la velocidad de escape de la mezcla es mayor que la velocidad de propagación de la flama, ésta se extinguirá. Si la velocidad de propagación de la flama es mayor que la velocidad de escape de la flama, ésta se introducirá al interior del tubo, a lo que se le conoce como *retroceso de flama (flasback)*.

La velocidad de propagación de flama varía con cada combustible. Este es un factor importante a considerar cuando se hace un cambio de combustible en un sistema; especialmente en sistemas de premezclado.

Figura 1.4. Velocidad de mezcla vs. Velocidad de flama.



Fuente: Guía básica. Calderas eficientes. 2012.

Al acercarse una fuente de ignición al extremo abierto del tubo, las moléculas de la mezcla en la periferia empiezan a reaccionar y a producir calor. Al iniciarse una reacción en cadena hacia el centro, existe una fracción de segundo de diferencia entre una reacción y otra y por esto cada reacción se lleva a cabo un poco más adelante de la siguiente, dando a la flama una forma de cono.

Otro fenómeno que afecta y produce la forma de cono de la flama, es que la velocidad de la mezcla en el centro del tubo, es mayor que la velocidad cerca de las paredes del tubo, donde la restricción por fricción es mayor.

Las partes de una flama pueden representarse teóricamente por el diagrama de la figura 1.5, en conjunto con sus diferentes temperaturas. En este diagrama se puede observar que la mezcla inicial debe de calentarse de la temperatura inicial T_0 a una temperatura de ignición T_i , antes de que la reacción pueda iniciarse, en la denominada *zona de reacción*, donde se lleva a cabo la mayor parte de las reacciones en cadena de la combustión.

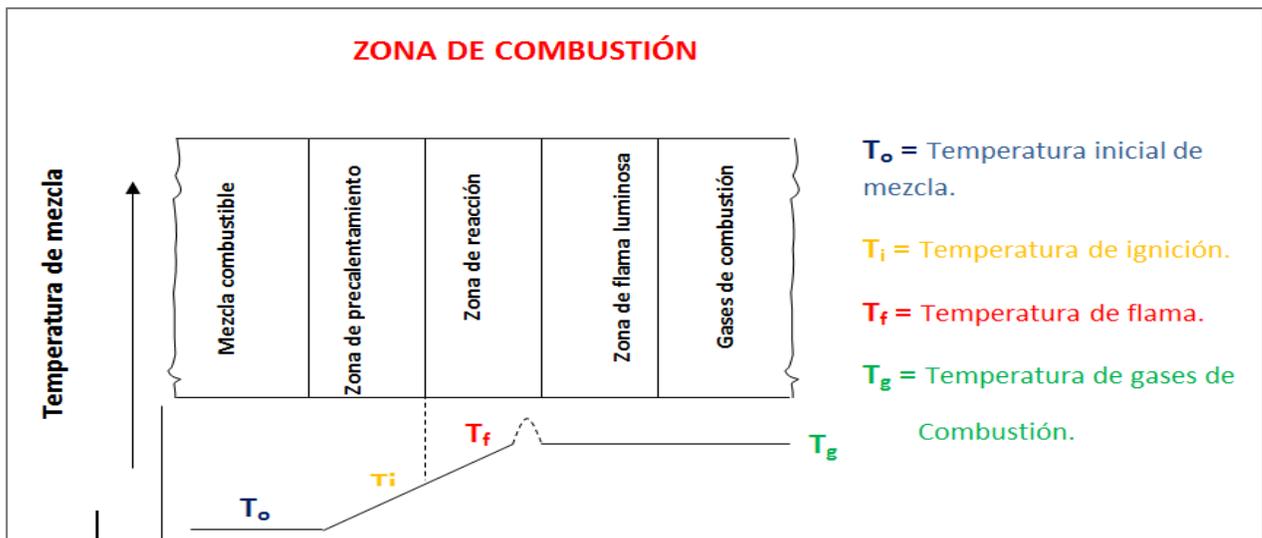
La región adyacente a la zona de reacción, es denominada como *zona de flama luminosa* y es donde se emiten las radiaciones visibles de la flama. Estas dos zonas son prácticamente inseparables, ya que el ancho de ambas es de unos diez

milésimos de pulgada en una flama de aire y gas premezclados. Existen infinidad de formas de flamas, debido a los diferentes factores que afectan la forma de la misma.

Algunos de los factores más importantes que afectan la forma de una flama en quemadores industriales son:

- a) El tipo de combustible.
- b) El diseño del quemador.
- c) La presión de alimentación del aire y del combustible.
- d) El por ciento de premezcla aire - gas.
- e) Tipo de atomización (si el combustible es líquido).
- f) Condiciones de presión en la cámara de combustión.

Figura 1.5. Zona de Combustión⁴



1.10. Temperatura de flama

La flama es el espacio físico donde se produce una reacción de combustión que emite calor y luz. Como la combustión es una reacción exotérmica (libera calor), los gases producidos en la misma adquieren temperaturas elevadas, con lo que

⁴ Fuente: Elaboración propia

emiten radiación, en parte luminosa, lo que da la característica de color en la flama, pudiendo ser ésta de distintos colores o prácticamente invisible, como es el caso de la combustión con hidrógeno.

Para que una flama se mantenga estable en el tiempo, en la zona de combustión la velocidad de aporte de la mezcla de combustible y comburente debe ser igual a la velocidad con la que se propaga la combustión, es decir, la velocidad de propagación de la flama.

Por otra parte para que se mantenga esta flama, el aporte de combustible y comburente debe encontrarse en una proporción situada dentro de los límites inferior y superior de inflamabilidad.

El calor generado por una reacción de combustión se distribuye de tres maneras:

- a) Calentamiento de los productos de la combustión y la mezcla inicial de aire– combustible.
- b) Calentamiento del medio por radiación.
- c) Calor que se pierde por disipación a los alrededores.

Si todo el calor generado por la combustión se ocupara en el calentamiento de la mezcla y de los productos de combustión, estos últimos se calentarían hasta llegar a una temperatura máxima, conocida como *la temperatura teórica de la flama (o temperatura de flama adiabática)*. La temperatura de flama es mayor cuando las pérdidas a los alrededores son mínimas. La adición de aire en exceso o combustible en exceso únicamente provee más material que absorbe el calor de combustión provocando que la temperatura de flama no pueda elevarse como una mezcla perfecta aire-combustible.

Particularmente a altas temperaturas ocurre un fenómeno que no permite que la temperatura llegue a su valor teórico máximo llamado *disociación*, entendida como la reacción de combustión en sentido inverso, lo que significa que los productos de combustión se transforman en combustibles y oxígeno nuevamente, absorbiendo calor que fue liberado originalmente por la combustión. Esto es:



Mientras más alta es la temperatura, mayor es el fenómeno de disociación. Llega un momento en que el calor generado por la combustión, es absorbido por la disociación; la temperatura a la que se llega en tal punto de equilibrio, es la temperatura teórica de flama, considerando la disociación.

La *temperatura de flama real* es igual a la temperatura teórica menos la caída de temperatura debido al calor transferido al medio, antes de que el proceso de combustión se haya completado. Esta temperatura se determina experimentalmente por observación, por lo que varían los valores, dependiendo del método.

La temperatura de un horno nunca puede igualar la temperatura teórica de flama porque siempre habrá paredes a las que se transfiera el calor de la combustión. La temperatura de la flama depende de la relación aire – combustible, por lo que la temperatura teórica siempre está expresada para una mezcla perfecta.

También la temperatura del aire de la mezcla tiene efecto sobre la temperatura teórica y real de la flama. Mientras mayor temperatura tenga el aire de la mezcla, mayor será tanto la temperatura teórica como la real.

Cuando a una mezcla de aire – combustible, se le agrega un exceso de aire, las temperaturas teórica y real disminuyen en proporción a la cantidad de exceso de aire que se agregue. El efecto de un exceso de combustible es similar, las temperaturas de flama disminuyen en proporción a la cantidad de exceso de combustible.

A menos que el aire y el combustible estén pobremente mezclados resultando en una combustión incompleta, la temperatura de flama no es función del diseño del quemador. Sin embargo, la temperatura de flama actual es intencionalmente disminuida mediante el incremento del calor transferido desde la flama en quemadores diseñados para aire en exceso o flamas luminosas.

1.10.1. Clasificación de las flamas

Las flamas se pueden clasificar según confluyan los reactivos a la zona de combustión en:

- Flamas de premezcla (la mezcla se produce previa a la zona de flama)
- Flamas de difusión (la mezcla se produce en la misma zona de flama)

En la práctica, pueden presentarse flamas de tipo intermedio, es decir, flamas parcialmente premezcladas, o flamas en las que cada una de las corrientes es laminar y la otra turbulenta.

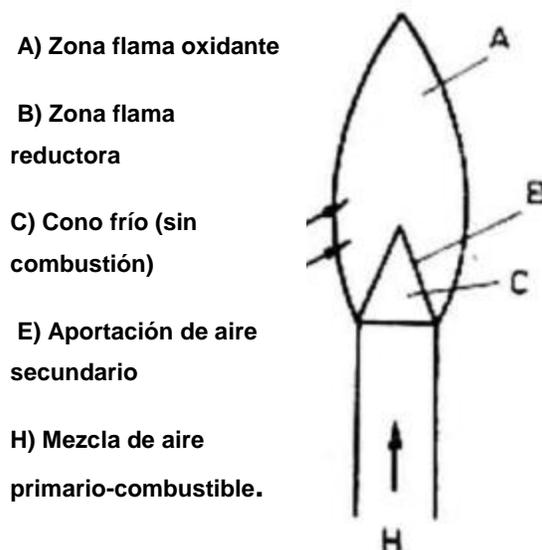
Según el tipo de movimiento de los fluidos que intervienen, también se clasifican en flamas laminares y turbulentas.

Las flamas laminares se caracterizan por tener números de Reynolds bajos, inferiores a 2000, mientras que las turbulentas tienen números de Reynolds mayores a 4000.

1.10.1.1. Flamas de premezcla

Es la combustión en la que se mezclan previamente el combustible con aire u oxígeno y a continuación la mezcla entre combustible y comburente, producen una combustión muy eficiente. Es la habitual de los combustibles gaseosos, como los mecheros de laboratorio, los hornillos de gas y los quemadores a gas de calderas.

Figura 1.6 Flama Bunsen



Fuente: Guía básica. Calderas eficientes.2012

Estas flamas pueden presentarse de dos formas básicas:

- **Laminares:** Forman un frente de flamas continuo, claramente definido, con forma aerodinámica. Se puede observar como flamas de propagación en tubos o como flamas esféricas propagándose desde una fuente de ignición. La Flama divide una región de mezcla reactante fría de la zona de gases de combustión calientes.

La flama laminar ideal es plana y adiabática. La flama es una región delgada en la que tienen lugar el precalentado, la ignición y la combustión. Su espesor a presión atmosférica para la mayoría de las flamas es del orden de 1 mm.

- **Turbulentas:** el flujo no regular de los reactivos produce una rápida fluctuación, acelerando la mezcla de combustible y comburente. Por ello son de muy alta eficiencia en cuanto a la producción de calor por unidad de volumen ocupado.

Este tipo de combustión es utilizado en los quemadores de calderas a gas y en los motores de combustión interna.

1.10.1.2. Flamas de difusión

Los combustibles líquidos y sólidos, y algunos gases (en circunstancias especiales), son los que producen este tipo de flamas.

Una vela proporciona un buen ejemplo. El combustible (cera en este caso) se funde y vaporiza por el calor de la flama y emerge como una corriente estacionaria de vapor, procedente de la mecha. El aire arrastrado forma una corriente de convección hacia la base de la flama (difunde de afuera hacia adentro). Debido a que ciertas partes son ricas en combustibles, las flamas de difusión de los hidrocarburos suelen ser amarillas a causa de la presencia de partículas de carbón incandescentes.

Si no hay aire suficiente para oxidar este carbón, en las últimas etapas de combustión la flama puede producir humo.

Algunas flamas de difusión no producen carbón, por ejemplo, la flama de alcohol metílico.

Figura 1.7. Comparación de Algunas Temperaturas de Flama.

Observed flame temperature		Theoretical flame temperature		Fuel	Air (or O ₂) temp., F/C	Equivalence ratio
F	C	F	C			
		5630	3110	Acetylene in O ₂	(60/16)	—
		5385	2974	Hydrogen in O ₂	(60/16)	—
		5120	2827	Natural gas in O ₂	(60/16)	—
4207	2319	4770	2632	Acetylene	60/16	1.00
3812	2100	4475 ¹	2468	Carbon monoxide	60/16	1.00
4190	2310			Gasoline		
		4100	2260	Natural gas	1400/760	1.00
		4070	2243	Natural gas	1400/760	1.11 (rich)
3713	2045	4010 ¹	2210	Hydrogen	60/16	1.00
		4000	2204	Natural gas	1100/593	1.00
		3920	2160	Natural gas	900/482	1.00
		3800	2093	Natural gas	600/316	1.00
3155 ²	1735 ²	3610	1988	Coke oven gas	60/16	1.00
3416	1880	3562	1961	Natural gas	60/16	1.00
		3460	1904	Methane ¹	60/16	1.00
		3400	1871	Methanol	60/16	1.00
				Natural gas	60/16	1.18 (rich)
		3300	1816	Natural gas	60/16	0.86 (lean)
		3010	1654	Producer gas	60/16	1.00
		3000	1649	Natural gas	60/16	1.49 (rich)
		2895	1591	Natural gas	60/16	0.70 (lean)
		2650	1454	Blast furnace gas	60/16	1.00

¹ Not corrected for dissociation. ² In an actual production furnace firing refractories.
³ Methane, ethane, propane, butane have theoretical flame temperatures in the 3484F to 3583F (1918C to 1973C) range; observed flame temperatures in 3416F to 3497F (1880C to 1925C) range.

Fuente: North American Combustion Handbook. 3ª. Ed., North American Mfg. Co., E U. A., 1986.

1.10.2. Velocidad de la flama

Una flama es simplemente una envoltura o una zona dentro de la cual la reacción de combustión está ocurriendo a una velocidad tal que produce una radiación visible. El frente de la flama es el contorno tridimensional al lado del cual la combustión se inicia, la línea divisoria entre la mezcla aire-combustible y los productos de combustión.

En flamas estables, el frente de la flama aparenta ser estacionario. Esto es debido a que la flama se mueve hacia el quemador con la misma velocidad a la que la mezcla aire-combustible se proyecta fuera del quemador.

Si la mezcla aire-combustible se alimenta al quemador a una velocidad muy alta, la flama puede apagarse, sin embargo, muchos quemadores permiten un rango considerable de velocidades de alimentación por diseño particular de la boquilla del quemador.

Si la mezcla aire-combustible se alimenta al quemador a una velocidad muy baja, la flama puede retroceder dentro del quemador. La flama retrocede hasta llegar al punto de mezclado o puede enfriarse por contacto con las paredes del quemador.

La velocidad de la flama depende en factores como:

- Presión,
- Temperatura
- Efectos de enfriamiento de los alrededores, y no puede ser confiablemente predecible excepto en casos muy específicos.
- La proporción entre el combustible y el comburente con que se realiza la mezcla previa (coeficiente de exceso de aire).
- Las características del combustible.
- Las características del comburente. Los gases no combustibles, como el nitrógeno presente en el aire ambiente, disminuyen la velocidad de

propagación, al contrario que los gases combustibles, como el hidrógeno, que la aumentan.

- La temperatura de la mezcla. A medida que aumenta la temperatura de la mezcla, aumenta la velocidad de propagación.

Cabe señalar que el precalentamiento de la mezcla combustible-aire da como resultado en un considerable aumento en la velocidad de la flama.

Figura 1.8. Características de Combustión de Algunos Combustibles.

Fuel	Minimum ignition temp, F/C ^Δ		Calculated flame temperature, † F/C		Flammability limits % fuel gas by volume [○]				Maximum flame velocity, fps and m/s		% Theoretical air for max. flame velocity
	in air	in O ₂	in air	in O ₂	lower	upper	lower	upper	in air	in O ₂	
Acetylene, C ₂ H ₂	581 ^c /305	—	4770/2632	5630/3110	2.5	81.0	—	—	8.75/2.67	37.0/11.3 ^l	83
Blast furnace gas	—	—	2650/1454	—	35.0 ^h	73.5	—	—	—	—	—
Butane, commercial	896/480	—	3583/1973	—	1.86	8.41	—	—	2.85/0.87	—	—
Butane, n-C ₄ H ₁₀	761/405	541/283 ^l	3583/1973	—	1.86	8.41	1.8 ⁿ	49 ⁿ	1.3/0.40	11.6/3.55 ^l	97
Carbon monoxide, CO	1128 ^c /609	1090/588 ^l	3542 ^h /1950	—	12.5 ^f	74.2 ^f	16 ^m	94 ^m	1.7/0.52	—	55
Carbureted water gas	—	—	3700/2038	5050/2788	6.4	37.7	—	—	2.15/0.66	—	90
Coke oven gas	—	—	3610/1988	—	4.4 ^f	34.0 ^f	—	—	2.30/0.70	—	90
Ethane, C ₂ H ₆	882 ^c /472	—	3540/1949	—	3.0	12.5	3 ⁿ	66 ⁿ	1.56/0.48	—	98
Gasoline	536 ^f /280	—	—	—	1.4	7.6	—	—	—	—	—
Hydrogen, H ₂	1062 ^c /572	1040/560 ^l	4010/2045	5385/2974	4.0	74.2	4 ^m	94 ^m	9.3/2.83	38.5/11.7 ^l	57
Hydrogen sulfide, H ₂ S	558 ^f /292	—	—	—	4.3	45.5	—	—	—	—	—
Mapp gas, C ₂ H ₄ †	850/455	—	—	5301/2927	3.4	10.8	—	—	—	15.4/4.69	—
Methane, CH ₄	1170 ^c /632	1033/556 ^l	3484/1918	—	5.0	15.0	5.1 ⁿ	61 ⁿ	1.48 ^a /0.45	14.76/4.50	90
Methanol, CH ₃ OH†	725/385	—	3460/1904	—	6.7	36.0	—	—	—	1.6/0.49	—
Natural gas	—	—	3525 ^g /1941	4790 ^g /2643	4.3	15.0	—	—	1.00/0.30	15.2/4.63	100
Producer gas	—	—	3010/1654	—	17.0 ^f	73.7	—	—	0.85/0.26	—	90
Propane, C ₃ H ₈	919/493 ^l	874/468 ^l	3573/1967	5130/2832	2.1	10.1	2.3 ⁿ	55 ⁿ	1.52/0.46	12.2/3.72	94
Propane, commercial	932/500	—	3573/1967	—	2.37	9.50	—	—	2.78/0.85	—	—
Propylene, C ₃ H ₆	—	—	—	5240/2893	2.4 ⁿ	10.3 ⁿ	2.1 ⁿ	53 ⁿ	—	—	—
Town gas (Br. coal) ^d	700/370	—	3710/2045	—	4.8†	31.0	—	—	—	—	—

*Combustión con aire a temperatura y presión estándar.

†Las temperaturas de flama son teóricas, calculadas para una relación estequiométrica, se ha considerado la disociación.

Fuente: North American Combustion Handbook. 3ª. Ed., North American Mfg. Co., E U. A., 1986.

1.10.3. Límites de flamabilidad

No todas las mezclas de aire u oxígeno – combustible se queman con una combustión autosostenida. Existen límites altos y bajos en las relaciones del comburente con el combustible, las cuales tienen una gama determinada en la cual se puede llevar a cabo las reacciones. Los límites de flamabilidad se le llaman también límites de explosividad, y se expresan en porcentajes de volumen del combustible en una mezcla aire-combustible.

- **Límite inferior de flamabilidad**

Se define como la concentración mínima de vapor o gas en una mezcla con el aire, por debajo de la cual no existe propagación de la flama al ponerse en contacto con la fuente de ignición.

El límite inferior de flamabilidad está relacionado con el punto de inflamación, de forma que este último se puede definir también como la temperatura mínima a la que la presión del vapor del líquido o del gas combustible puede producir una mezcla inflamable en el límite inferior de inflamabilidad.

- **Límite superior de flamabilidad**

Se define como la concentración máxima de vapor o gas en mezcla con el aire, por encima de la cual no tiene lugar propagación de la flama al ponerse en contacto con una fuente de ignición.

La prevención de una combustión indeseada se puede conseguir operando fuera del rango de inflamabilidad en procesos con aire, en particular, asegurando que los procesos se desarrollaron por debajo del límite inferior de inflamabilidad o adoptando un factor de seguridad 4-5, que equivale a estar en el 25-20% del límite inferior de inflamabilidad.

Algunas veces no es recomendable trabajar en esos límites, ya que puede ser inseguro debido a que en una mezcla rica (atmósfera reductora), se producen gases de combustión dañinos y se produce CO (monóxido de carbono) que es un gas venenoso. Otro límite es la atmósfera a la cual se requiere trabajar el proceso, es decir, con un exceso de aire, el cual contiene oxígeno, puede provocarse que se oxide la superficie del material con el que se esté trabajando. Ver tabla de la figura anterior (Figura 1.8. Características de Combustión de Algunos Combustibles.)

1.11. Estabilidad de la flama

El comportamiento o estabilidad de flama dentro de un sistema de combustión, puede hacer la diferencia entre una combustión útil y eficiente o inútil e ineficiente, esta propiedad esta usualmente en función de la configuración de la boquilla del quemador. Esta estabilidad se puede interpretar como la forma que desarrolla la flama, la cual debe ser generalmente cónica. Un sostenedor de flama posiciona el área de iniciación de flama (parte baja de la misma) cumpliendo lo siguiente:

- Temperatura de Ignición de la mezcla,
- Comprobando que la mezcla aire- combustible, esté dentro de los límites de flamabilidad
- Que la velocidad de alimentación de la mezcla sea igual a la velocidad de la flama.

Muchos quemadores dentro de la industria en nuestros días proveen una estabilidad adecuada de la flama en un amplio rango de potencia de quemado y variadas relaciones aire/combustible.

Para que la flama quede adherida al quemador y, por tanto sea estable, debe existir un equilibrio entre la velocidad de salida de la mezcla combustible por el quemador y a velocidad de avance de la flama.

La inestabilidad de la flama se produce por:

- Aumento de la velocidad de salida de la mezcla aire-combustible en relación a la velocidad de avance de la flama hasta un límite que pueda producir un despegue o desprendimiento de la flama.
- Disminución de la velocidad de salida de la mezcla aire-combustible en relación a la velocidad de avance de la flama hasta un límite que pueda producir un retroceso de la flama.

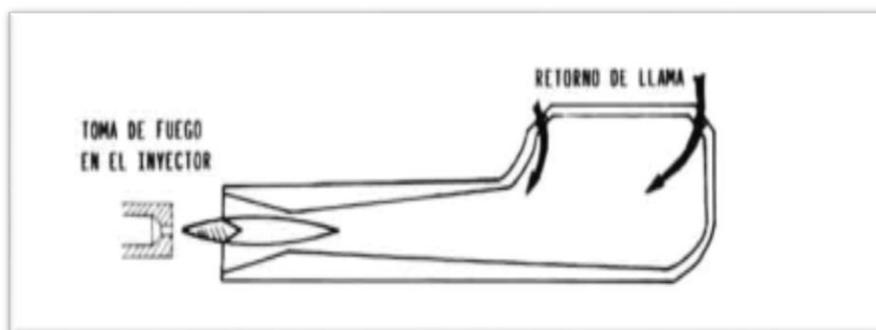
Este último fenómeno suele ser frecuente en gases con alto contenido en hidrógeno, debido a su alta velocidad de propagación de flama.

Los defectos de estabilidad de flama más habituales son:

- Retroceso de flama

El retorno de la flama se produce cuando la flama se propaga al interior del quemador y se debe a que la velocidad de propagación de la combustión. Se corrige aumentando la presión de alimentación o cambiando el inyector.

Figura 1.9 Retroceso de flama



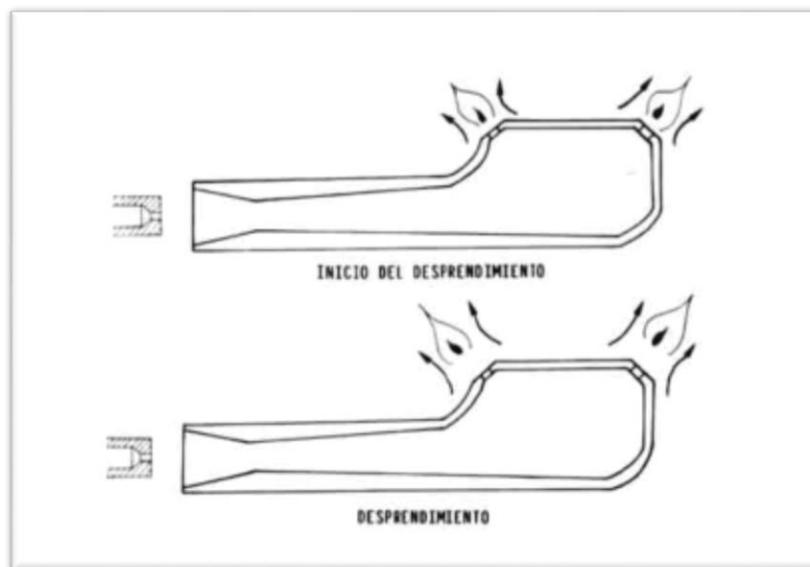
Fuente: Guía básica. Calderas eficientes.2012

- Desprendimiento de flama

El desprendimiento de la flama se produce cuando la velocidad de salida de la mezcla aire-gas por los orificios de la cabeza del quemador es superior a la velocidad de propagación de la combustión. Se corrige disminuyendo la presión de la alimentación, cambiando el inyector o regulando el aire primario. También puede darse este fenómeno si existe un exceso de aire primario y, en este caso, deben ajustarse las lumbreras del quemador.

Tienen tendencia al desprendimiento los quemadores se encuentran alimentados por gas natural, butano, propano o sus mezclas con aire.

Figura 1.10 Desprendimiento de flama



Fuente: Guía básica. Calderas eficientes.2012

- Puntas amarillas

El fenómeno de las puntas amarillas se caracteriza por la aparición de flecos amarillos en la cima del cono azul en el interior de la flama. Estos flecos amarillos son debidos a la formación de partículas de carbono en el interior de la flama producidas por la incorrecta combustión de los hidrocarburos que componen el gas combustible. Estas partículas de carbono están sometidas a temperaturas muy elevadas, por lo que, llevadas a la incandescencia, dan la coloración amarilla de la flama.

Estas partículas de carbono deben recibir el oxígeno necesario para su combustión antes de que su temperatura sea demasiado baja, si no, se escapan de la flama, pudiéndose depositar si encuentran una superficie fría.

La aparición de puntas amarillas es característica de cada gas y se produce cuando hay un exceso de gas combustible o una falta de aire primario.

- Estabilización de la flama

Los diferentes factores que influyen en la estabilidad y aspectos de las flamas son mostrados en la

Varlación de un factor quedando los demás constantes	Tendencia al desprendimiento	Tendencia al retorno de llama	Aparición de las puntas amarillas (calidad de la combustión)
Porcentaje de aireación primaria ↑	↑	↑	↓
Diámetro del inyector ↑	↑	↓	↑
Diámetro de los orificios ↑	↓	↑	↑
Profundidad de los orificios diámetro ↑	↓	↓	nulo
Sección de salida ↑	↓	↑	↓
Separación de los orificios ↑	↑	nulo	↓

Tabla 1.4.

Varlación de un factor quedando los demás constantes	Tendencia al desprendimiento	Tendencia al retorno de llama	Aparición de las puntas amarillas (calidad de la combustión)
Porcentaje de aireación primaria ↑	↑	↑	↓
Diámetro del inyector ↑	↑	↓	↑
Diámetro de los orificios ↑	↓	↑	↑
Profundidad de los orificios diámetro ↑	↓	↓	nulo
Sección de salida ↑	↓	↑	↓
Separación de los orificios ↑	↑	nulo	↓

Tabla 1.4 Factores que influyen en el aspecto de la flama

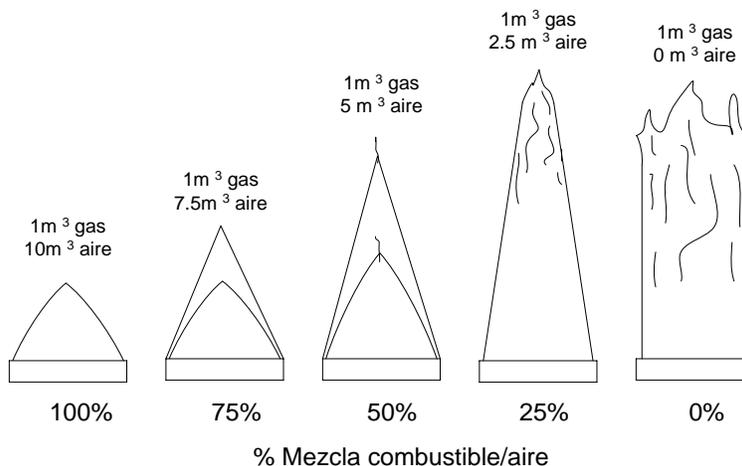
Fuente: Guía básica. Calderas eficientes.2012

De acuerdo con esta tabla y el defecto de estabilidad observado, se pueden adoptar las medidas correctoras adecuadas.

1.12. Efecto del % de premezcla, en la geometría de la flama

Conforme va disminuyendo el porcentaje de premezcla, las moléculas del gas tardan más tiempo en encontrar átomos libres de oxígeno con los cuales combinarse, por lo que pasa más tiempo entre una reacción y otra; como la flama está en movimiento hacia delante, tiende a alargarse.

Figura 1.11. Efecto del % de premezcla, en la geometría de la flama.



Fuente: www.infra.com.mx

La Figura 1.11. Efecto del % de premezcla, en la geometría de la flama ilustra el fenómeno anterior; una premezcla del 100% tiene una flama pequeña bien definida con un color azul pálido. Esto se debe a que todo el aire requerido para combustión está mezclado con el gas y la mezcla se enciende tan pronto llega a la boquilla. Una flama con 75% de premezcla sería un poco más larga y se caracteriza por un cono doble; el 25% de las moléculas de gas, requiere más tiempo para encontrar oxígeno en el aire secundario. Con 25% de premezcla casi todo el color azul ha desaparecido y el color amarillo predomina; la longitud de la flama es mucho mayor. Con 0% de premezcla se tiene una flama de gas crudo, que se caracteriza por su gran longitud y color totalmente amarillento.

Esto es debido a que todo el aire de combustión es tomado del aire secundario. Este tipo de flama tiende a producir humo negro, lo que indica que algunos átomos

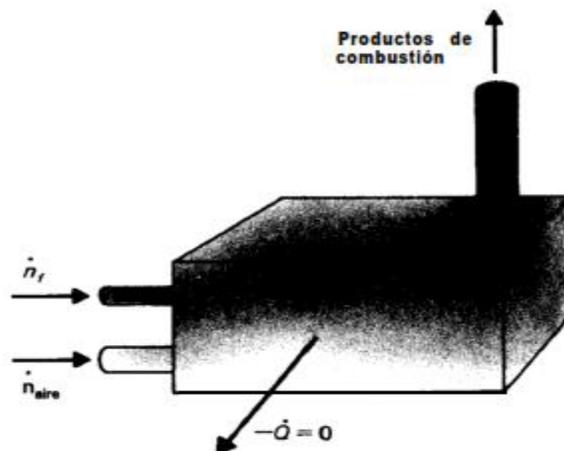
incandescentes de carbón no se alcanzan a combinar con oxígeno y al alejarse de la zona de reacción se enfrían, convirtiéndose en partículas de hollín.

1.13. Cálculo de la temperatura adiabática de flama

Una medida de la utilidad de un combustible particular es su entalpía de combustible particular es su entalpía de combustión. Sin embargo, en ciertos casos el ingeniero está más interesado en producir una temperatura elevada que una gran cantidad de energía liberada. Este es el caso en el diseño de equipos de proceso que requieren una temperatura mínima de operación como secadores y hornos para procesos químicos.

Supóngase que el reactor de combustión de la Figura 1.12 Reactor con flujo isotérmico constante se va a aislar perfectamente, de tal modo que no tenga lugar ninguna transferencia de calor y el reactor opere adiabáticamente.

Figura 1.12 Reactor con flujo isotérmico constante



Fuente: Principios de Termodinámica para ingenieros. John R. Howell, Richard O. Buckius

$$\dot{Q} = \sum_p \dot{m}_p h_p - \sum_r \dot{m}_r h_r$$

(Ec. 1.31)

Donde los subíndices r y p significan reactivos y productos, respectivamente. Permítase que la reacción se lleve a cabo en las condiciones particulares del estado de referencia, es decir, a la presión de 1 atm y con la temperatura mantenida constante a $25^{\circ}\text{C} = 77^{\circ}\text{F}$ por la transferencia de calor desde el reactor.

En este caso la primera ley dada por la ecuación 1.31 y aplicada al reactor se reduce a:

$$\sum_p \dot{m}_p h_p = \sum_r \dot{m}_r h_r \quad (\text{Ec. 1.32})$$

Suponiendo que los reactivos entran al reactor en el estado estándar de referencia, la ecuación 1.32 con base en la unidad molar de combustible queda.

$$\frac{1}{n_f} \sum_p n_p \bar{h}_p = \frac{1}{n_f} \sum_r n_r \bar{h}_r^{\circ} \quad (\text{Ec. 1.33})$$

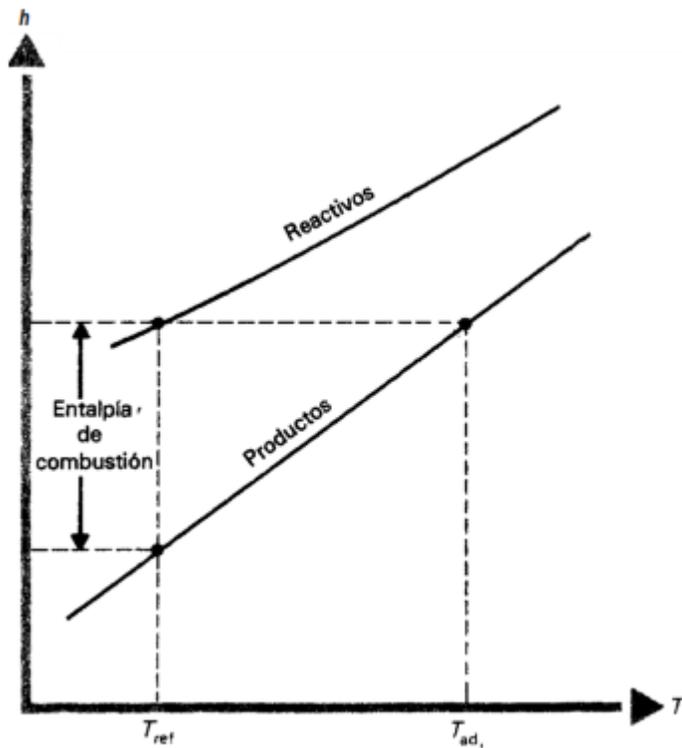
Cuando se dispone de los datos de entalpía de combustión para el combustible que se desea emplear, resulta conveniente sustituir la ecuación 1.31 en la ecuación 1.33 para eliminar el término de los reactivos:

$$\frac{1}{n_f} \sum_p n_p \bar{h}_p = \frac{1}{n_f} \sum_p n_p \bar{h}_p^{\circ} - \bar{q}^{\circ} \quad (\text{Ec. 1.34})$$

La entalpía que sale del reactor, transportada por los productos de combustión, es igual a la entalpía que sale de los productos en estado estándar de referencia más (ya que \bar{q}° tiene un valor negativo) la energía liberada por la reacción de combustión.

La solución de la ecuación 1.33 para la temperatura de los productos de combustión (suponiendo que sea la misma para todos los productos debido al mezclado del reactor) es iterativa.

Figura 1.13 Relación entre la entalpía de combustión y la temperatura de flama adiabática



Fuente: Principios de Termodinámica para ingenieros. John R. Howell, Richard O. Buckius

Supone una temperatura y se encuentran los valores de \bar{h}_p en las tablas o por cálculo. Los valores de \bar{h}_p se sustituyen en el lado de los productos en la ecuación 1.33 y el resultado se comprueba del lado de los reactivos de la ecuación 1.33. El proceso se repite hasta que se encuentra una temperatura que satisfaga la igualdad. En el caso donde no hay exceso de aire, la temperatura recibe el nombre de **temperatura de flama adiabática** para el combustible.

La temperatura teórica de flama adiabática es la mayor temperatura que se puede obtener del combustible empleado en la reacción de combustión (a menos que se realice

precalentamiento de los reactivos hasta temperaturas superiores a la del estado estándar de referencia), dado que no se permite ninguna transferencia de calor

con los alrededores y no hay exceso de aire presente que absorba algo de la entalpía de combustión.

Con frecuencia, la temperatura real es menor debido a la disociación o ionización de los productos de combustión o a la presencia de reacciones que se supuso no tendrían lugar. En algunos casos, la operación a las condiciones estequiométricas puede producir una temperatura de flama menor que a las condiciones ligeramente fuera de las estequiométricas. Por ejemplo, a la temperatura del quemador pueden ocurrir reacciones adicionales; que el CO, se disocie para formar CO o que se formen cantidades importantes de óxidos de nitrógeno. En ese caso, realmente tiene lugar una temperatura de flama adiabática superior cuando se trabaja en condiciones diferentes a las estequiométricas, donde estas reacciones se han suprimido.

Otro método de encontrar T_p (temperatura adiabática de flama) consiste en escribir la ecuación 1.34 como:

$$\sum_p n_p (\bar{h}_p - \bar{h}_p^o) = -n_c \bar{q}^o \quad (\text{Ec. 1.35})$$

Y entonces remplazar los cambios de entalpía en función de los calores específicos para un quemador a presión constante o en considerar que la entalpía es independiente de la presión (hipótesis de gas ideal), de modo que la ecuación 1.34 queda:

$$\sum_p n_p \int_{T^o}^{T_p} \bar{c}_{p,p} dT = -n_c \bar{q}^o \quad (\text{Ec. 1.36})$$

Ahora se emplea la expresión polinomial, para el lado izquierdo y se realiza la iteración hasta la convergencia. Obsérvese que, para una T^o fija, las T_p integrales individuales de cada uno de los productos tiene la forma $\int_{T^o}^{T_p} \bar{c}_p(T) dT$.

Es factible definir un valor de \bar{c} promediando respecto a la temperatura mediante la relación

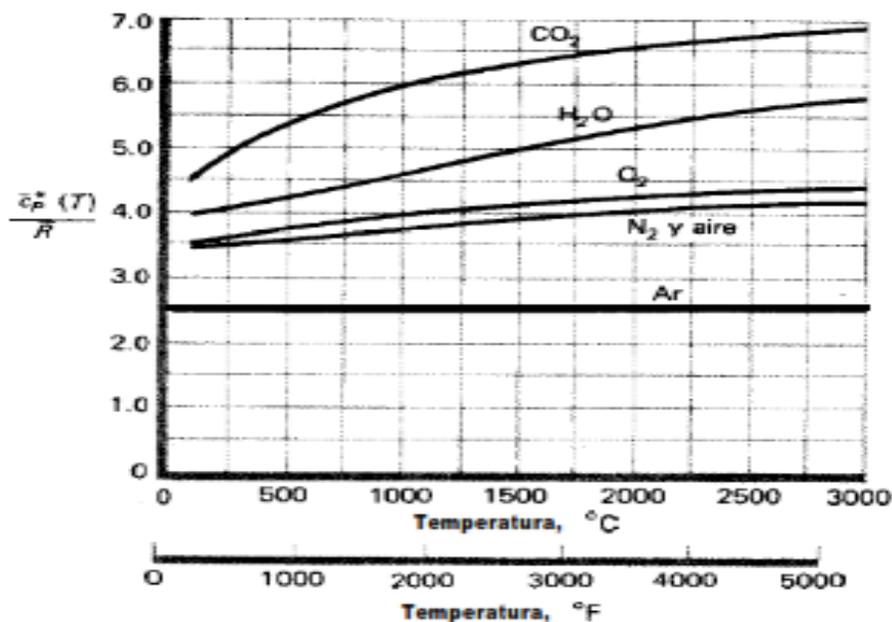
$$\bar{c}_p^*(T) = \frac{1}{T - T^o} \int_{T^o}^{T_p} \bar{c}_{p,p}(T) dT \quad (\text{Ec. 1.37})$$

Y la ecuación 1.37 se reduce a:

$$(T_p - T^o) \sum_P n_p \bar{c}_{p,p}^*(T_p) = -n_f \bar{q} \quad (\text{Ec. 1.38})$$

Ahora el proceso iterativo quedó algo simplificado. En el caso del valor de T_p considerado, se encuentran valores de \bar{c}_p^* para cada compuesto, y la convergencia se demuestra mediante la prueba de igualdad en la ecuación 1.39. La Figura 1.14 Representa la gráfica de $\bar{c}_p^*(T)$.

Figura 1.14 Calores específicos promedio de los gases.



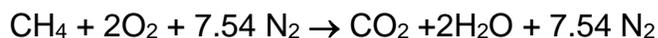
Fuente: Principios de Termodinámica para ingenieros. John R. Howell, Richard O. Buckius

Ejemplo:

Calcule la temperatura teórica de flama adiabática para el metano.

Solución

La entalpía de combustión para el metano (con producción de vapor de agua) igual a 802,900 kJ/kmol. Las entalpías en el estado estándar de referencia para los productos también se dieron en ese ejemplo. La reacción química es:



Sustituyendo los valores conocidos en la ecuación 1.34 para 1 kmol de combustible, se obtiene:

$$\begin{aligned} \sum_p n_p \bar{h}_p &= \bar{h}_{\text{CO}_2} + 2\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} - \bar{q}^o \\ &= -393.8 \times 10^3 + 2(-242 \times 10^3) - (-802,700) \\ &= -75,100 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

El lado derecho de esta ecuación, no incluye el N₂ ya que esta última expresión se refiere a la temperatura de los productos que dejan el reactor.

Empleando en primer lugar las expresiones polinomiales de los calores específicos para determinar la temperatura de flama adiabática, la expresión del lado izquierdo mediante este método queda:

Para el CO₂,

$$\int_{T^o}^{T_p} \bar{c}_p(T) dT = 22.26(T_p - 298) + (5.981 \times 10^{-2}) \left(\frac{T_p^2 - 298^2}{2} \right) \\ - (3.501 \times 10^{-5}) \left(\frac{T_p^3 - 298^3}{3} \right) + (7.469 \times 10^{-9}) \left(\frac{T_p^4 - 298^4}{4} \right)$$

Para H₂O,

$$2 \int_{T^o}^{T_p} \bar{c}_p(T) dT = 2 \left[32.24(T_p - 298) + (0.1923 \times 10^{-2}) \left(\frac{T_p^2 - 298^2}{2} \right) \right. \\ \left. + (1.055 \times 10^{-5}) \left(\frac{T_p^3 - 298^3}{3} \right) - (3.595 \times 10^{-9}) \left(\frac{T_p^4 - 298^4}{4} \right) \right]$$

y para N₂,

$$7.52 \int_{T^o}^{T_p} \bar{c}_p(T) dT = 7.52 \left[28.90(T_p - 298) \right. \\ \left. - (0.1571 \times 10^{-2}) \left(\frac{T_p^2 - 298^2}{2} \right) \right. \\ \left. + (0.8081 \times 10^{-5}) \left(\frac{T_p^3 - 298^3}{3} \right) - (2.873 \times 10^{-9}) \left(\frac{T_p^4 - 298^4}{4} \right) \right]$$

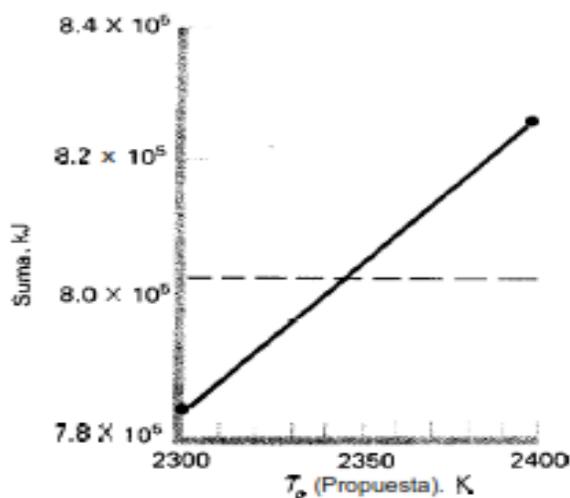
Se escogen valores de T_p se evalúa el lado izquierdo de la primera ley y se compara con el del lado derecho. La representación gráfica de las iteraciones resulta útil para la interpretación de los resultados.

Figura 1.15 Iteraciones para cálculo de Temperatura de Flama

T_p [Propuesta], K	$n[\bar{h}(T_p) - \bar{h}^o], \text{kJ}$			Suma, kJ	$-q^0, \text{kJ}$
	CO ₂	H ₂ O	N ₂		
2300	1 10,700	174,200	499,200	784,100	802,700
2400	1 17,300	183,900	523,700	824,900	802,700
2346	1 13,700	178,700	5 10,500	802,900	802,700

La gráfica de la suma $\sum_p n_p[\bar{h}(T_p) - \bar{h}_p^o]$ contra T_p (propuesta) se muestra en la Figura 1.16

Figura 1.16 Gráfico de Sumatoria vs Tpropuesta.



Obsérvese que la tercera propuesta se escogió con base en una interpolación lineal entre los valores seleccionados de 2300 y 2400 K y también cómo este caso corresponde al resultado correcto. Con frecuencia esto ocurre en los problemas de combustión porque \bar{n} es casi lineal con T dentro de intervalos regularmente grandes de temperatura y el procedimiento de iteración converge muy rápidamente.

También debe notarse que la mayor parte de la entalpía de los productos sale con el hidrógeno más que con los productos de reacción **CO₂**, y **H₂O**.

El valor calculado no corresponde muy bien al valor tabulado de 2285 K para la temperatura de flama adiabática del metano, que se leería en tablas de entalpía de combustión y temperatura de flama. Esta diferencia se debe en parte al empleo de las relaciones $\bar{c}_p(T)$ fuera del intervalo de temperaturas para el cuál se determinaron (generalmente este intervalo abarca de 273 a 1800 K).

1.14. Emisiones contaminantes generadas en procesos de combustión

Productos de Combustión

Se le llaman *productos de combustión* a todos los compuestos derivados de la oxidación de C, H y S contenidos en un combustible (CO_2 , CO , SO_2 , SO_3 , H_2O), así como a los gases inertes (N_2) y el exceso de O_2 que normalmente salen por las chimeneas y ductos de salida de los gases. Cuando existen condiciones de exceso de combustible, partículas de carbón incandescentes aparecen en los productos de combustión.

En el caso de combustión con gases, si la flama es enfriada, pueden aparecer subproductos intermedios en los productos de combustión, tales como aldehídos y alcoholes.

Un contenido de CO y H_2 indicaría que existe una atmósfera reductora y que la combustión es incompleta. Sin embargo, una ausencia de estas sustancias no necesariamente indicará que se tiene una combustión completa, ya que con un exceso de aire, tampoco se encontrarían con CO ni H_2 en los gases de combustión. Si se encontrara O_2 , se indica una condición de exceso de aire.

Con respecto a la calidad de la combustión, se tiene que si la atomización y el mezclado son pobres, un exceso de aire se tendrá que suministrar para que todo el combustible se quemara. Si la flama o los productos intermedios de la combustión, entran en contacto con una superficie fría o con alguna corriente de aire frío o agua, la combustión, tales como CO_2 , O_2 , H_2 y aldehídos en los gases de combustión.

En el análisis de gases de una combustión perfecta, no aparecen CO , H_2 , ni O_2 . Además, el porcentaje de CO_2 debe ser máximo.

En los casos donde se utiliza exceso de aire, es necesario agregar el volumen del exceso de aire al volumen calculado de los gases de combustión. En los casos en los que se presenta un exceso de combustible, es difícil predecir el volumen o el análisis de los productos de combustión, pero el peso total de los productos será igual al peso del combustible más el peso del aire alimentado.

1.14.1. Óxidos de Nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno son reconocidos como un alto riesgo para la salud y el medio ambiente. Contribuyen a la contaminación del aire y a la lluvia ácida. Existen varios óxidos de nitrógeno, pero los dos relacionados con la combustión son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). NO_x se refiere a cualquiera de estos dos gases.

El NO se forma casi exclusivamente durante la combustión y es incoloro e inodoro. El NO₂ tiene un color café rojizo y un olor asfixiante se produce cuando los productos de combustión se combinan con el aire atmosférico. Tanto el NO como el NO₂ son interconvertibles en la atmósfera.

Los NO_x juegan un mayor rol en la formación de smog a través de una reacción química en la cual el NO es convertido en NO₂. El co-producto de esta reacción es el Ozono (O₃). Tanto el NO como el NO₂ son considerados tóxicos, siendo el NO₂ uno de los gases más tóxicos encontrados en la atmósfera.

El NO creado en el aire como resultado de la combustión, no toma lugar con una simple reacción entre el nitrógeno y el oxígeno, sino que una serie de etapas que involucran átomos de nitrógeno y oxígeno junto con radicales OH se ven involucrados en su formación.

A la temperatura ambiente el oxígeno y el nitrógeno tiene poca tendencia a reaccionar entre sí puesto que su reacción de formación es extremadamente endotérmica. La energía necesaria solo está disponible a temperaturas altas, como las generadas en procesos de combustión (de 1300 a 2500°C). Incluso a tales temperaturas únicamente se producen cantidades muy pequeñas de NO, pero tienen importancia en términos de atmosférica.

En general podemos decir que el tiempo de residencia de los gases en la zona de combustión, así como la temperatura de la flama, y la concentración de oxígeno determinan la cantidad de NO que realmente se forma.

Si el efluente de la combustión se enfría lentamente a medida que es emitido, el NO se convertiría en O₂ y N₂. Sin embargo, en la mayor parte de los equipos de combustión, una fracción importante de la energía térmica de los productos gaseosos se cede rápidamente ya bien por la conversión en trabajo o en la transferencia de calor. Bajo tales circunstancias el NO permanece en los escapes a baja temperatura, pues no tiene tiempo de descomponerse.

El NO₂ aparece debido a la reacción del NO con el O₂, pero esto tan sólo sucede a bajas temperaturas (menos de 150°C); así pues se encuentra muy poco NO₂ en la mezcla gaseosa a temperaturas de combustión y podemos decir que el 90% del total del NO_x que se emite es NO.

Una vez en la atmósfera, tanto el NO como el NO₂, entran en un conjunto de reacciones fotoquímicas que desembocan en el aumento de concentración del NO₂, y en una disminución de la de NO. Dichas reacciones forman parte del ciclo fotolítico del NO₂, en la cual, con la participación del O₂ atmosférico y de la energía del sol, se produce la circulación del NO₂. En este proceso las concentraciones de NO y NO₂ no varían sino fuera por la existencia de reacciones competidoras que implican a hidrocarburos y que traen como resultado la formación de compuestos perjudiciales como el “smog” fotoquímico o la lluvia ácida.

Centrándonos ya en los mecanismos de formación de los óxidos de nitrógeno podemos distinguir tres tipos, a los que denominaremos:

NO_x térmico: producido por oxidación de nitrógeno contenido en el aire de combustión.

NO_x del combustible: resultante de la oxidación del nitrógeno contenido en el combustible.

NO_x instantáneo: se forma por la conversión del nitrógeno molecular en presencia de hidrocarburos, en el frente de la flama.

Óxidos de Nitrógeno	Lugar de Formación	Mecanismo de reacción	Factores principales que afectan la formación del NO
NO Térmico	Flama (Zona de pre-reacción)	a) Exceso de O ₂ $\text{NO}_2 + \text{O} \longrightarrow \text{NO} + \text{N}$ $\text{N} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{NO} + \text{O}$ b) Exceso de Combustible $\text{N} + \text{OH} \longrightarrow \text{NO} + \text{H}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentración de átomos de O₂ atómico ▪ Tiempo de residencia ▪ Temperatura ≥1300°C
NO Combustible	Flama	Sobre compuestos de carbono, entre otros, parcialmente desconocidos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentración de O₂ ▪ Tiempo de residencia
NO Instantáneo	Flama	$\text{CN} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{HCN} + \text{H}$ $\text{CN} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{HCN} + \text{OH}$ $\text{CH} + \text{N}_2 \longrightarrow \text{HCN} + \text{N}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentración de átomos de O₂ en la reacción de combustión ▪ Exceso de aire
NO₂	Flama	$\text{NO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enfriamiento rápido de la reacción de combustión (turbinas de gas)
	Conductos y Chimenea	$2\text{NO} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_2$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura menor de 650°C ▪ Concentración de O₂ ▪ Tiempo de residencia
	Atmósfera	$\text{NO}_2 + h\nu \longrightarrow \text{NO} + \text{O}$ $\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \longrightarrow \text{O}_3 + \text{M}$ $\text{NO} + \text{O}_3 \longrightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentración de O₂ ▪ Intensidad de insolación ▪ Tiempo de residencia ▪ Polución de aire

Tabla 1.5. Mecanismos de Formación de los NOx

Fuente: Reducción de emisiones contaminantes en grandes instalaciones de combustión.2012

Formación de NO_x Térmico

El mecanismo de reacciones que se producen es conocido con el nombre de Zeldovich, el cual se expone a continuación:



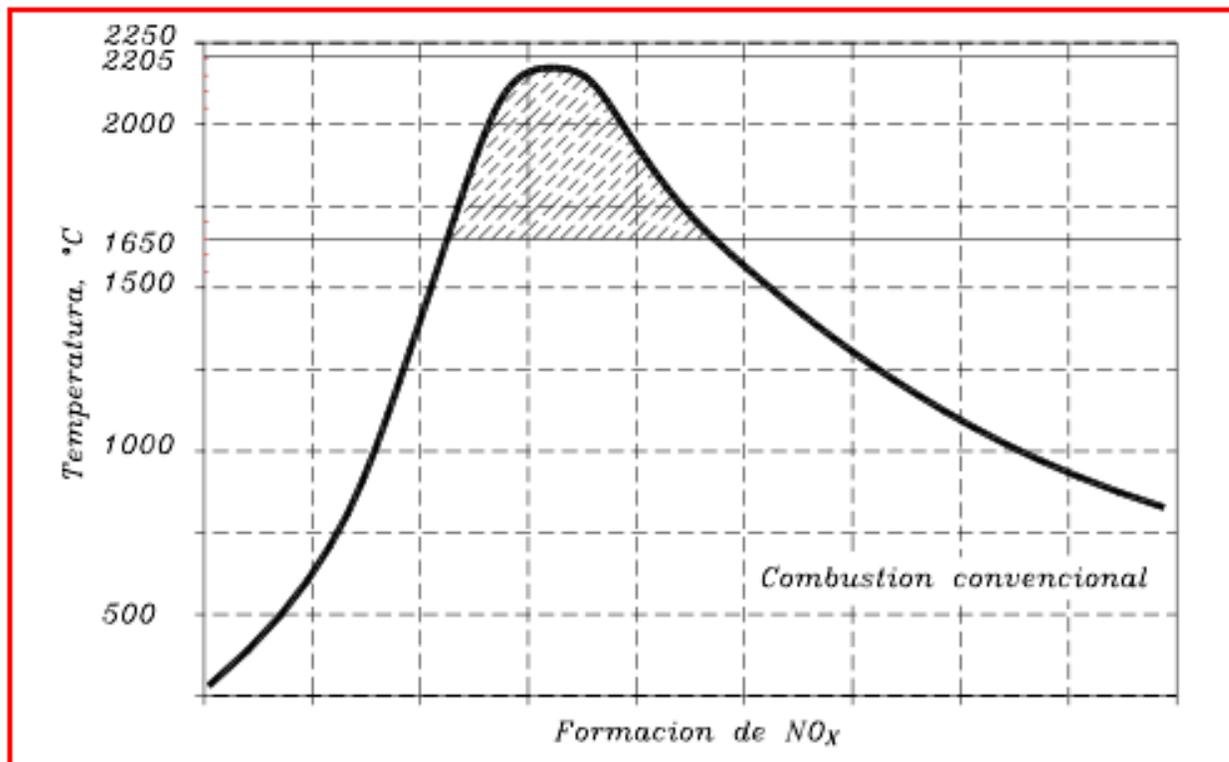
La formación del NO térmico crece exponencialmente con la temperatura y es considerable la cantidad del mismo que se puede generar en presencia de una flama con temperaturas alrededor de los 500°C. Del mismo modo, cuando las temperaturas de combustión son inferiores a 1000°C, las emisiones de NO se reducen significativamente, dependiendo en tal caso, del contenido en nitrógeno del combustible. La conversión es pues favorecida por las altas temperaturas, e intervienen además como condiciones favorables del tiempo de residencia en la zona de flama y la concentración del oxígeno, siendo proporcional la formación de NO térmico a la raíz cuadrada de la concentración de oxígeno.

La formación de NO térmico, es el mecanismo predominante por el que se producen emisiones de NO_x, cuando se queman combustibles líquidos y gaseosos.

En la práctica la formación de NO térmico en una caldera depende de:

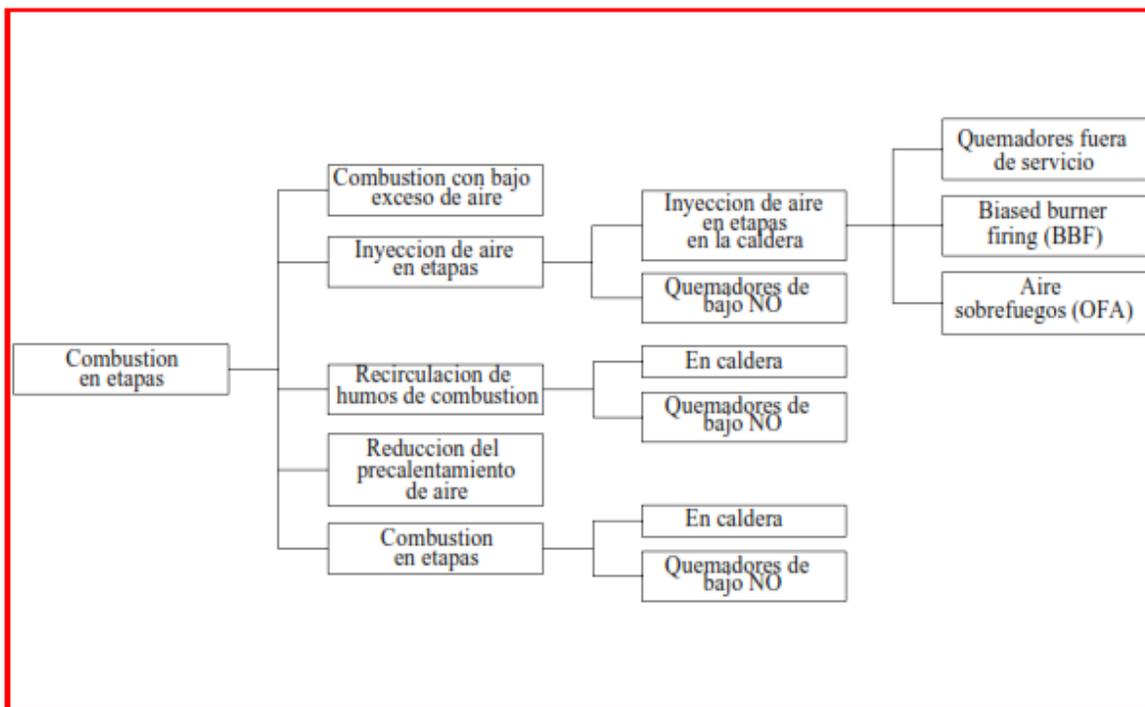
- Parámetros de la combustión (temperatura y exceso de aire)
- Diseño de la caldera
- Diseño de los quemadores
- Potencia de Funcionamiento de la caldera

Figura 1.17. Formación de NO_x a medida que aumenta la temperatura en combustión convencional



Fuente: Reducción de emisiones contaminantes en grandes instalaciones de combustión.2012

Figura 1.18 Esquema de las medidas primarias para la reducción de emisiones de Óxidos de nitrógeno



Fuente: Reducción de emisiones contaminantes en grandes instalaciones de combustión 2012.

En la Figura 1.18, estas medidas están basadas en la modificación de parámetros de operación ya sea combustión mayores concentraciones de oxígeno, diseños de sistemas de combustión, y quemadores de bajo NO_x.

1.14.2. Óxidos de Azufre (SO_x)

El óxido de azufre que se emite a la atmósfera en mayores cantidades es el anhídrido sulfuroso (SO₂) en menor proporción, que no rebasa el 1 ó 2 % del anterior, el anhídrido sulfúrico (SO₃).

El SO₂ es un gas incoloro, de olor picante e irritante en concentraciones superiores a 3 ppm. Es 2.2, veces más pesado que el aire, a pesar de lo cual se desplazará rápidamente en la atmósfera. Es un gas bastante estable.

El anhídrido sulfúrico (SO₃) es un gas incoloro y muy reactivo que condensa fácilmente. En condiciones normales no se encuentra SO₃ en la atmósfera en

cantidades significativas, debido a que reacciona rápidamente en presencia de humedad, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4).

La combustión de cualquier sustancia que contenga azufre produce emisiones de SO_2 y SO_3 , la cantidad de SO_3 producida depende de las condiciones de la reacción, especialmente de la temperatura y oscila entre 1 y 10 por ciento de los SO_x producidos.

El azufre del combustible se oxida a bióxido de azufre, en las primeras etapas de combustión principalmente de los combustibles fósiles, por la siguiente reacción:



En las últimas etapas de combustión, una cantidad muy pequeña de dióxido de azufre (menor al 3%), se oxida a trióxido de azufre, siguiendo diversos mecanismos de reacción; pero la reacción general está representada por:



Este O_3 es susceptible de descomponerse al combinarse con el vapor de agua de los gases de combustión, para formar ácido sulfúrico, el cual puede depositarse y causar problemas de corrosión:



El ácido sulfúrico formado en esta última reacción cae en forma de lluvia ácida sobre la corteza terrestre, provocando un fuerte impacto en el medio ambiente.

Independientemente del mecanismo de reacción, siempre será necesario el oxígeno para transformar al SO_2 en SO_3 , la razón por lo que resulta muy conveniente realizar la combustión con el menor exceso de aire y así minimizar esta conversión.

1.14.3. Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono se produce en las primeras etapas de la combustión como resultado de una combustión incompleta del carbono combustible, de acuerdo a la siguiente reacción:



Casi inmediatamente, el monóxido de carbono reacciona con oxígeno para formar CO_2 , siempre que la temperatura sea mayor a $1\,000^\circ\text{C}$, según la reacción:

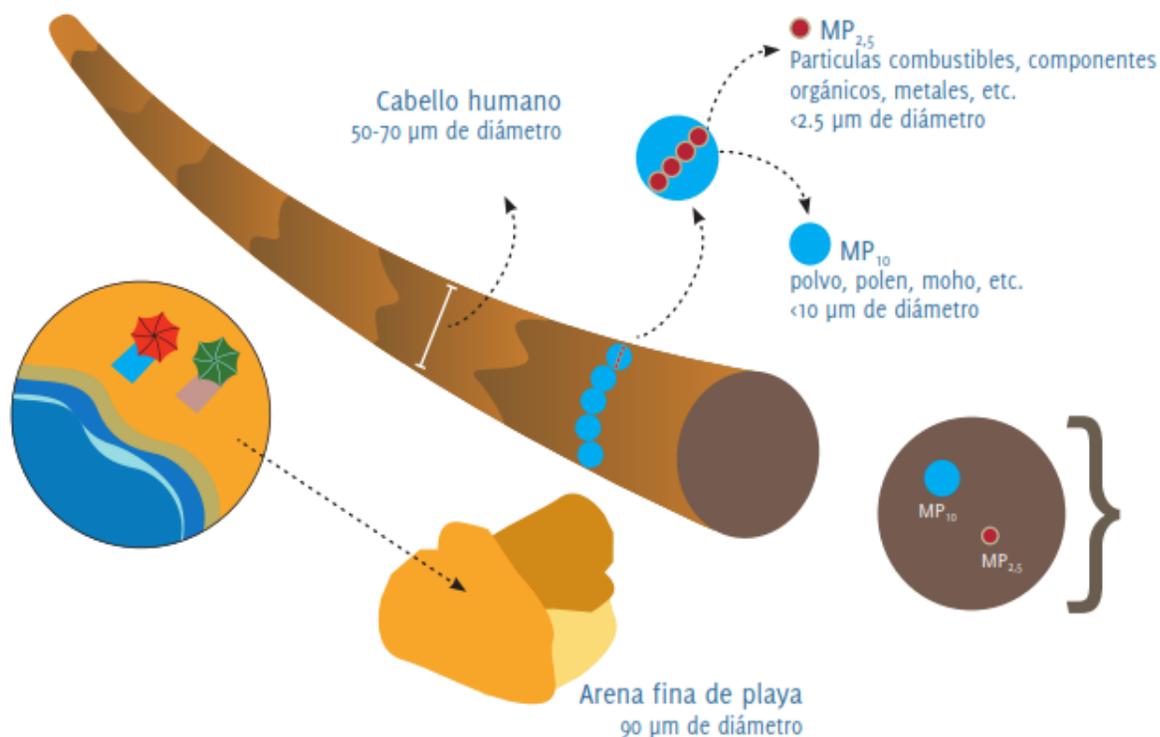


El monóxido de carbono se une a una cantidad adicional de oxígeno para formar CO_2 , de esta manera el carbono original queda completamente oxidado. Para que esta oxidación se realice antes de que los gases salgan de la región reactiva de la flama se requiere un buen mezclado aire-combustible.

Si no se propicia esta mezcla, los gases de salida contendrán altas concentraciones de CO y de oxígeno sin reaccionar; lo cual es inconveniente, ya que por el elevado calor de combustión de la reacción de combustión del CO, su producción implica una disminución considerable en la eficiencia del equipo.

1.14.4. Material Particulado

El material Particulado (MP) es el contaminante que más significativamente ha sido asociado a eventos de mortalidad y mortalidad en la población (Pope y Dockery, 2006). Dicho contaminante se clasifica según su diámetro el cual depende de la intensidad de sus impactos. Existen dos métricas comúnmente utilizadas para clasificar el material Particulado, partículas menores o a 10 micrones conocidas como MP_{10} y partículas menores a 2.5 micrones, conocidas como $\text{MP}_{2.5}$. De esta forma, en el MP_{10} se pueden distinguir dos fracciones la fracción gruesa, es decir, entre 2.5 y 10 micrones y la fracción fina, menor a 2.5 micrones.

Figura 1.19 Diferencias entre MP₁₀ y MP_{2.5}

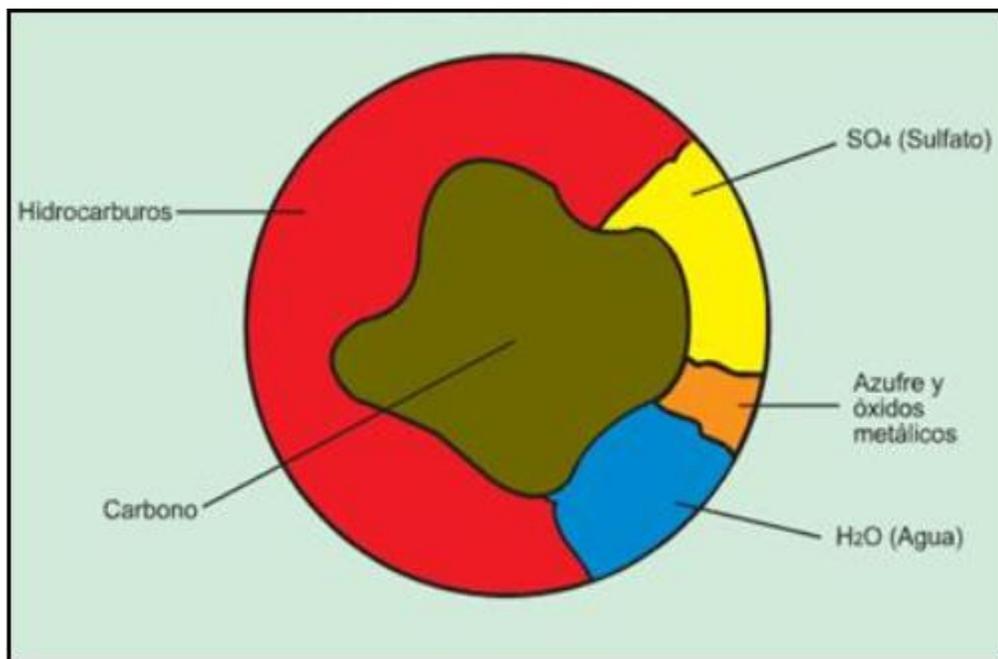
Fuente: www.mma.gob.cl

Emisiones de material particulado comunes en procesos de combustión

Hollín: Es carbono reconstituido a partir de compuestos ya oxidados, cuando se dan zonas de baja concentración de oxígeno con alta temperatura. Estas partículas sólidas, denominadas comúnmente hollín, consta de un núcleo de carbono puro, al que se hallan adheridos los siguientes componentes:

- Hidrocarburos (HC).
- Agua (H₂O).
- Sulfato (SO₂).
- Azufre y óxidos metálicos varios.

Figura 1.20 Partícula de Hollín



Fuente: www.mma.gob.cl

Humos: Son partículas submicrométricas de tipo aerosol que emanan de los gases de combustión. Puede estar compuesto además de finas gotitas de especies condensables a la temperatura y presión ambientales. Las partículas se forman por condensación de vapores de compuestos orgánicos.

Cenizas: Es el material mineral que se encuentra en la composición de los combustibles.

1.15. Emisiones de Material Particulado generadas durante el proceso de producción de vidrio

- **Preparación de materias primas**

En esta etapa se producen emisiones de material particulado, en ocasionadas por manipulación de materias primas de origen mineral finamente molidas.

Se generan residuos sólidos durante las operaciones de recepción de materias primas, como en el traslado de las mismas dentro de la fábrica. Esto se produce en general debido al derrame durante operaciones de manipulación y trasvasije.

Debido a que las materias primas suelen mezclarse en seco, no se producen residuos líquidos.

- **Fusión**

Durante la operación de fusión de las materias primas es cuando se produce la mayor cantidad de emisiones atmosféricas, estas consisten tanto en material particulado, como de gases, las cuales están asociadas al funcionamiento de los hornos de fundido.

Las emisiones de material particulado son debidas a la volatilización del material contenido en el baño fundido, el cual al combinarse con los gases presentes es emitido en forma condensado. El material particulado puede contener metales pesados (arsénico, plomo, cadmio, etc.), dependiendo de las materias primas utilizadas.

Los gases emitidos consisten principalmente de óxidos de nitrógeno (NO_x), los que se forman debido a las altas temperaturas alcanzadas en el horno y a la presencia de nitrógeno tanto en el aire de combustión como en las materias primas en fusión.

También son emitidos óxidos de sulfuro (SO_x), formado principalmente a partir del azufre contenido el combustible, y en menor medida en las materias primas. Como regla general se puede suponer que todo el nitrógeno y azufre contenido tanto en las materias primas como en el combustible, es emitido en la forma de NO_x y SO_x.

Los residuos sólidos asociados al proceso de fundición, corresponden principalmente al material particulado captado por los equipos secos de control de emisiones atmosféricas (filtros de manga y precipitadores electrostáticos). Si se utilizan equipos húmedos de control de gases (scrubber o venturi scrubbers) para abatir las emisiones de SO_x, se pueden generar tanto residuos sólidos como líquidos.

Los residuos sólidos se generan al evaporarse el agua contenida en el líquido de lavado, el cual consiste en carbonato de sodio disuelto en agua. Dependiendo de las materias utilizadas en la fabricación del vidrio, el residuo puede contener selenio, cromo, cadmio, cobalto, plomo y sulfato de sodio. El funcionamiento de los equipos de control húmedos también puede eventualmente generar residuos líquidos.

Si se utiliza Reducción Catalítica Selectiva (SCR) o Reducción Catalítica No Selectiva (SCR), para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno (haciéndolos reaccionar con amoníaco para producir nitrógeno y agua), se pueden producir tanto residuos líquidos como sólidos.

Otro residuo sólido lo constituyen la escoria de los hornos consiste en trozos no usados de vidrio fundido. La escoria está compuesta fundamentalmente de óxido de magnesio y sulfato de sodio, pudiendo contener también metales pesados.

Cuando son cambiados los ladrillos refractarios de los hornos (aproximadamente cada 9 años), también éstos pasan a constituir residuos sólidos del proceso.

- **Formado del vidrio.**

Durante las operaciones de formado de envases, se producen emisiones de COV y material particulado, producto de la descomposición del lubricante del molde al entrar éste en contacto con la gota de vidrio fundido.

También se producen emisiones gaseosas, al limpiar el molde de su recubrimiento de grafito, lo que se hace aplicándoles 1,1,1 – tricloroetano el que se evapora rápidamente a la atmósfera.

Pueden generarse residuos líquidos debido al contaminarse el agua de enfriamiento de las máquinas de formado con aceite lubricante.

- **Recocido.**

Emisiones de material particulado y gases son generadas como subproducto del proceso de combustión del horno túnel de recocido.

- **Acabado.**

Material particulado y residuos sólidos se generan de los procesos de acabado con arranque de viruta (pulidos, arenados, esmerilados y otros).

Se genera material particulado y gases en los procesos de esmaltado donde es necesario horneado de la pieza. Se generan emisiones de COV en los procesos

de pintado donde se utilizan compuestos orgánicos. Residuos líquidos pueden ser originados de las operaciones de decorado con ácido.

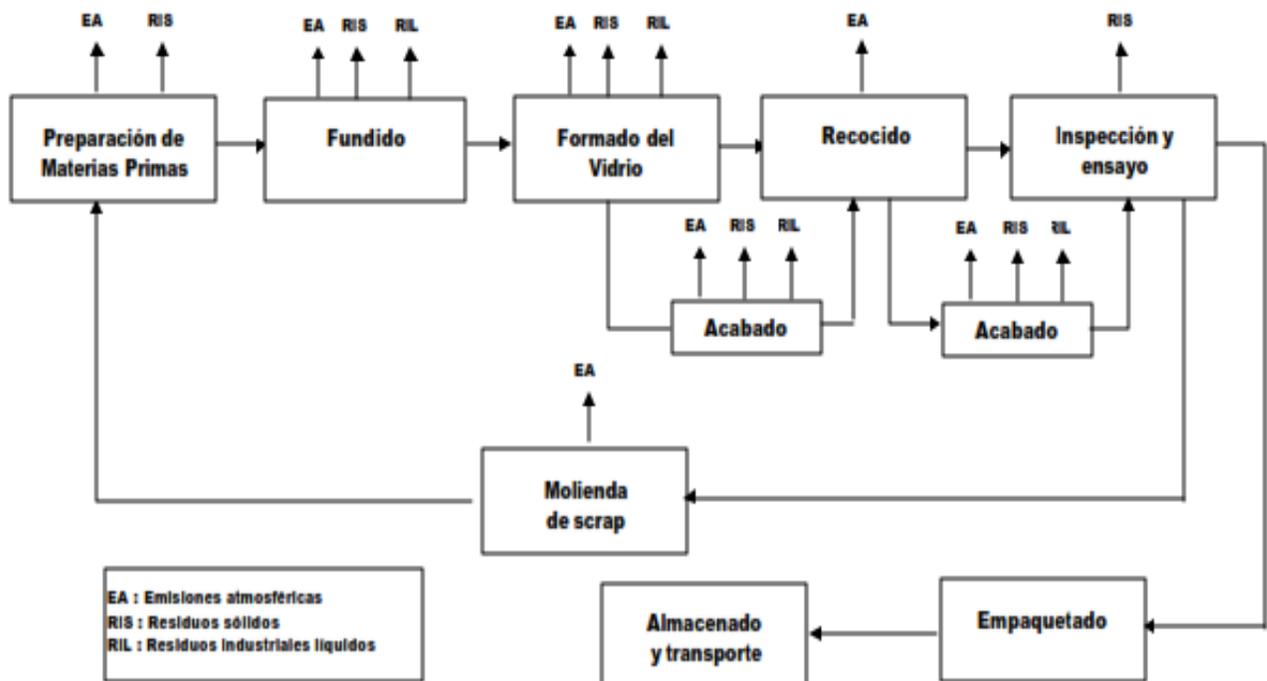
- **Inspección y ensayo.**

Se generan residuos sólidos provenientes de las piezas defectuosas (scrap), cuando éstas no son recicladas.

- **Molienda de scrap.**

Se generan emisiones de material Particulado durante las operaciones de molienda de scrap, que es en seco.

Figura 1.21 Emisiones en la producción de Vidrio



Fuente: EPA 1995.

Capítulo 2

Combustión con Oxígeno

<<No temas ir lento, teme solo a detenerte >>

Proverbio Chino

2.1 Introducción

El aire enriquecido con oxígeno es una de las técnicas con mayor área de oportunidad para incrementar la eficiencia de los procesos de combustión y así la transferencia de calor durante el proceso (Zhou et al., 2011). Entre las ventajas de utilizar aire enriquecido con oxígeno se encuentran los ahorros de combustible de hasta el 15%, las reducciones en las emisiones de CO₂ de hasta un 25% y los incrementos en la eficiencia energética de hasta el 20% (Li & Fan, 2012)., como resultado de reducciones en la temperatura de ignición, aceleramiento de la combustión, mejor transferencia de calor y menores pérdidas de energía en los gases de combustión. La aplicación de esta técnica a escala industrial en un amplio rango de operaciones principalmente procesos de fusión a altas temperaturas.

La técnica de enriquecimiento de aire con oxígeno también presenta ventajas ambientales significativas, como la captura de CO₂, y la reducción de emisiones de NO_x por debajo de los niveles de quemadores de bajo NO_x y la disminución en la formación de hollín. Estos efectos se deben a que el incremento en la concentración de oxígeno en el aire de combustión afecta la cinética química, la transferencia de calor, la tasa de calentamiento y la temperatura de flama (Madero & Herrera, 2013)

El uso de oxígeno puro como comburente en concentraciones de 99% provoca el incremento en la temperatura de flama, mismo que es aprovechado en aplicaciones industriales de alta temperatura, como son la fusión de materiales y las reacciones de descomposición térmica, entre las que destacan la fusión de vidrio, la producción de cemento, acero, metales ferrosos y aluminio, con aumentos de producción entre el 15 y 65%, y aumentos en eficiencia de combustión entre el 10 y 30% (Daood et al., 2011).

El incremento en la concentración de oxígeno ocasiona cambios termodinámicos en los procesos de combustión, es evidente que el incremento en la concentración de oxígeno en los reactivos conlleva una disminución de la presencia de nitrógeno y, por lo tanto, el calor

específico de los productos de combustión disminuye, lo que permite un incremento en la temperatura de flama adiabática; este aumento de temperatura supera el efecto de la disminución del calor específico, y el efecto neto es un incremento en la entalpía específica de los productos de combustión, con lo que se obtiene mayor calor disponible en los procesos donde es aplicado. (Madero & Herrera, 2013)

Cuanto mayor sean las temperaturas de flama en el horno mejor será la transferencia de calor. Esto es debido a que los fenómenos de transferencia dependen de la temperatura de la flama.

2.2 Técnicas de combustión mejorada.

- Enriquecimiento simple con oxígeno.
- Lanza de Oxígeno.
- Oxyboosting.

All Oxy-fuel (AOF). La ausencia de nitrógeno en un sistema oxígeno-combustible tiene las siguientes ventajas:

- Mayor temperatura de flama
- Mejor transferencia de calor ya que favorece la transferencia por radiación
- Mejor aprovechamiento del poder calorífico del combustible
- Reducción de emisiones a la atmósfera.

2.3 Teoría de la Oxcombustión

La eficiencia en los procesos de combustión puede incrementarse de dos formas distintas, o bien precalentando el aire de combustión o mediante la oxcombustión.

El oxígeno puede introducirse dentro de la cámara de combustión usando diferentes técnicas:

- Quemadores de oxígeno/Combustible
- Inyección directa de oxígeno mediante lanzas
- Enriquecimiento del aire de combustión

- Postcombustión

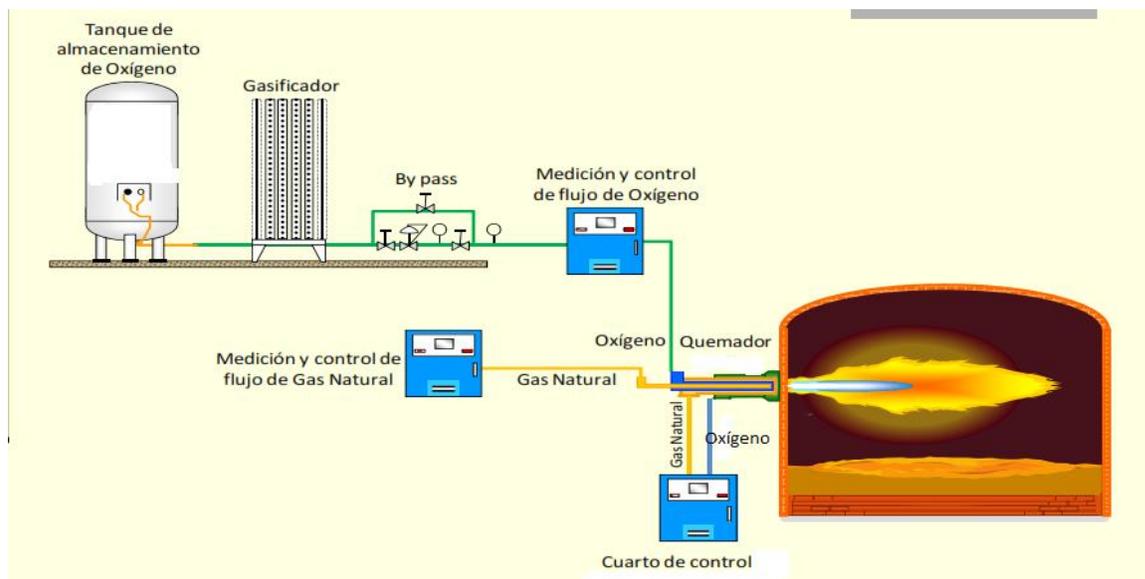
La correcta elección de una de estas opciones implica una serie de beneficios dependiendo del proceso en cuestión:

- Temperaturas más altas
- Mayor Flexibilidad del proceso
- Ciclos de fusión más cortos
- Reducido volumen de los gases de combustión
- Emisiones más bajas
- Incremento de la capacidad productiva
- Costos de fusión más bajos

2.4 Formas de aplicación de oxígeno en sistemas de combustión

Existen diferentes alternativas para aplicar el oxígeno en un sistema de combustión, desde un enriquecimiento simple hasta el uso de la mezcla oxígeno puro-combustible. Las diferentes formas de aplicación de oxígeno en sistemas de combustión se verán a continuación.

Figura 2.1 Aplicación con quemadores Oxygas



Fuente: www.praxair.com.mx

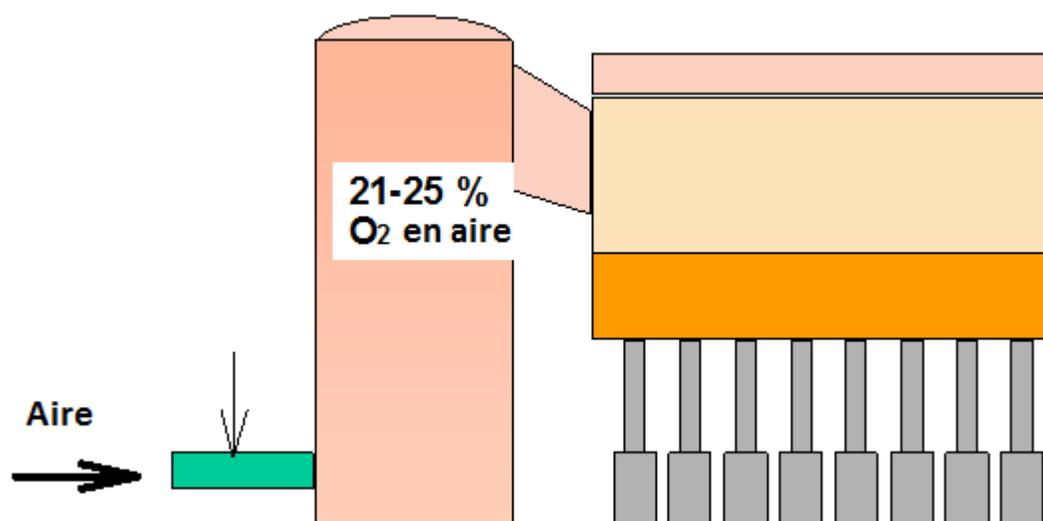
2.4.1 Enriquecimiento Simple ⁽¹⁾

El contenido normal de oxígeno en el aire es de aproximadamente 21% en volumen. Cuando incrementa el % volumen de oxígeno en el aire se requiere menos aire para lograr una combustión en relación estequiométrica, con el consecuente beneficio de arrastrar una menor cantidad de Nitrógeno, lo que incrementa la eficiencia térmica del sistema.

El enriquecimiento del aire de combustión normalmente se logra inyectando oxígeno puro en el cabezal que distribuye aire de combustión hacia los quemadores. El nivel típico de enriquecimiento se ubica entre 21-25 % por volumen de oxígeno en el aire.

Con el enriquecimiento simple, normalmente no es necesario sustituir los componentes del sistema de combustión convencional a aire, por lo que se emplean los mismos quemadores y válvulas de control.

Figura 2.2 Enriquecimiento Simple



Fuente: www.paxair.com.mx

⁽¹⁾<http://www.praxair.com.mx>

⁽²⁾<http://www.infra.com.mx>

⁽³⁾<http://www.abelolinde.es>

⁽⁴⁾<http://www.carburos.com>

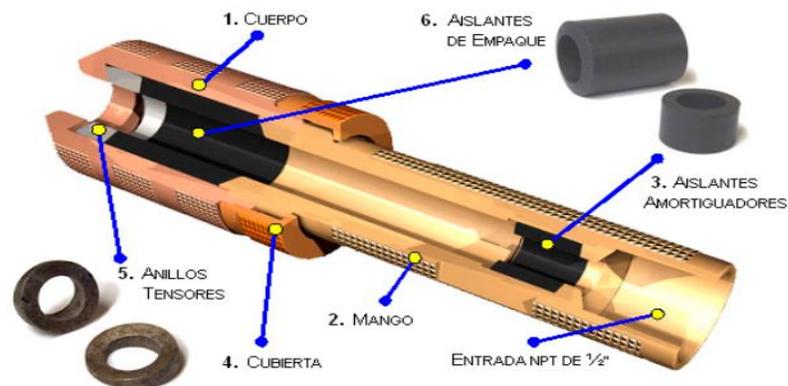
A las temperaturas de fusión de vidrio, la radiación es el mecanismo predominante de transferencia térmica. Las velocidades de transferencia térmica de la conducción y la convección dependen linealmente de la diferencia de la transferencia térmica debida a la radiación, que es proporcional a la diferencia entre la temperatura de flama y la del vidrio, elevada cada una a la cuarta potencia. El oxígeno aumenta la temperatura de la flama, lo cual incrementa significativamente la radiación, el modo predominante de transferencia térmica. Por lo tanto, con el enriquecimiento con oxígeno, el producto absorbe más calor, se pierde menos calor en la salida del gas de combustión y el proceso de combustión es más eficaz.

2.4.2 Enriquecimiento con lanza ⁽²⁾ ⁽³⁾ ⁽⁴⁾

El enriquecimiento con lanza es similar al enriquecimiento simple, con la única diferencia de que la inyección del oxígeno puro se realiza en la flama directamente dirigiendo un chorro mediante una lanza. Por tanto, la flama debe ser ligeramente deficiente en aire de combustión, de tal manera que el oxígeno requerido para quemar en proporción estequiométrica se obtiene directamente del que se está inyectando mediante la lanza.

El enriquecimiento con lanza ofrece la ventaja de tener la flama más radiante en zonas más específicas, como puede ser la parte inferior de la flama dirigida hacia el producto al que nos interesa transmitirle calor.

Figura 2.3 Equipo de lanza de oxígeno

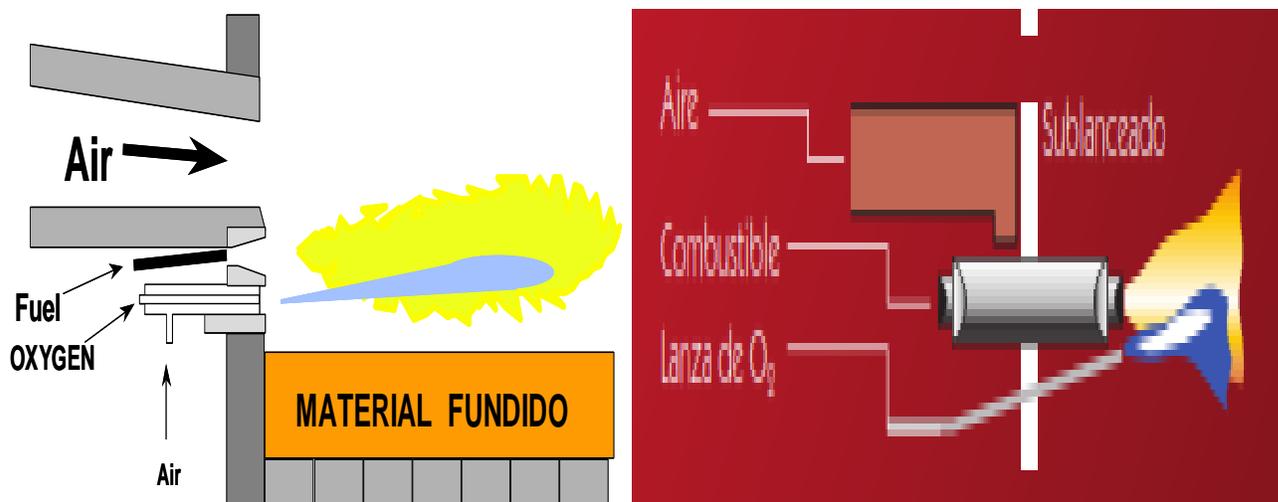


Fuente: Oxy-Arc International Inc. (2007)

Este método ha sido el modo más rentable de usar oxígeno para complementar la combustión de aire-combustible. La inyección estratégica de oxígeno al lado, debajo o a través de las flamas de aire combustible ha permitido a los hornos de fusión de vidrio alcanzar los objetivos en términos de tasas de producción, uso eficiente del combustible y la calidad del vidrio.

Los beneficios de la inyección de oxígeno aumentan al tener la mezcla de oxígeno y combustible en el punto donde es más necesario; es decir, en las zonas del espacio de combustión que necesitan oxígeno o en la zona inferior de las flamas de aire-combustible (en el lado de la superficie del vidrio), donde la temperatura de la flama tiene un mayor impacto sobre la transferencia térmica al material fundido. El hecho de saber cuántas lanzas se debe instalar, dónde colocarlas y las velocidades de flujo a utilizar permite elegir una solución más rentable.

Figura 2.4 Enriquecimiento con lanza



Fuente: www.infra.com.mx

2.4.3 Oxy-boosting⁽⁴⁾

Este método consistente en usar oxígeno complementario es relativamente nuevo para los fabricantes de vidrio y ha sido posible gracias a las nuevas ofertas de quemadores de oxicomcombustible de última generación desarrollados para la conversión total de los hornos de fusión a oxicomcombustible. El concepto de refuerzo con oxígeno utiliza este tipo de quemadores en el horno de fusión de aire-combustible con el fin de incrementar la producción, la calidad, el rendimiento y la estabilidad del horno. En función de las

necesidades se puede adaptar el funcionamiento para conseguir los beneficios deseados. El refuerzo con oxicomcombustión se suele utilizar para aumentar la tasa de producción en un horno que ha alcanzado su producción nominal o que se ha deteriorado debido a una anomalía o una pérdida de rendimiento del sistema de combustión de aire-combustible

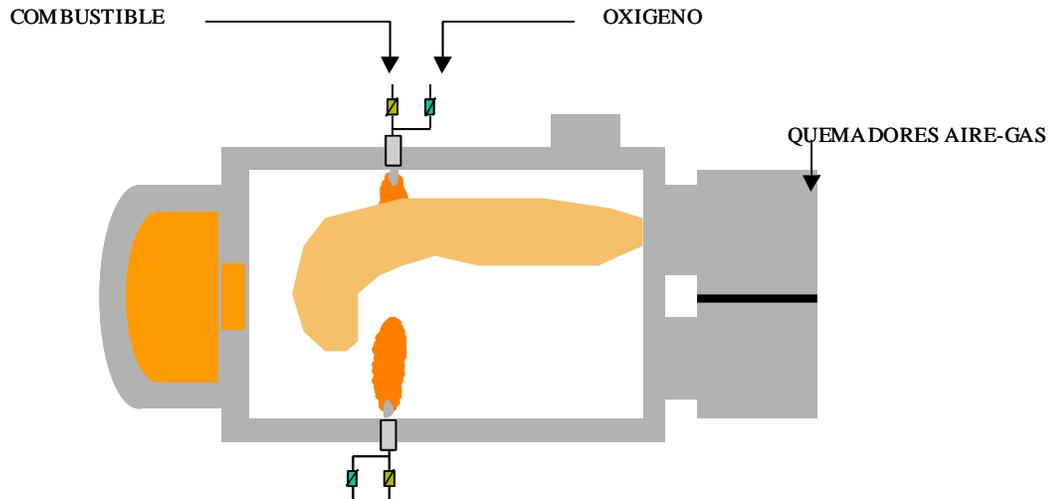
Las flamas a alta temperatura empleadas en la oxicomcombustión se colocan sobre la mezcla fría de materias primas para conseguir maximizar la transferencia térmica. De esta forma, el vidriado se produce antes y se mejora significativamente la velocidad de fusión. Esta velocidad de fusión superior permite aumentar la producción o reducir el consumo total de combustible.

La aplicación de oxígeno mediante la técnica denominada Boosting (*Oxyfuel Boosting*) consiste en suministrar parte de la energía térmica requerida por el sistema mediante quemadores que queman la mezcla oxígeno 100%-combustible. De esta forma, se sustituyen parte de los quemadores a aire por quemadores oxígeno –combustible, o bien se pueden instalar de forma adicional a los quemadores ya existentes, los cuales deben disminuir su capacidad total. Dado que la flama de la reacción oxígeno-combustible es más caliente y mucho más radiante, la misma posee una mayor capacidad de transferencia de calor a los productos (coeficientes de transferencia de calor más altos), lo cual conduce a lograr tiempos de proceso más cortos (como podría ser un tiempo de fusión menor del vidrio o metales ferrosos y no ferrosos).

Normalmente el empleo del boosting se enfoca a la reducción de tiempos de proceso con flamas muy eficientes localizadas de forma muy específica, más que a lograr reducciones en el consumo de combustible, sin embargo, esta reducción en la gran mayoría de los casos no compensa económicamente por el uso del oxígeno

En la siguiente figura se muestra un esquema típico de aplicación de Boosting en un horno tipo End Port para fusión de vidrio.

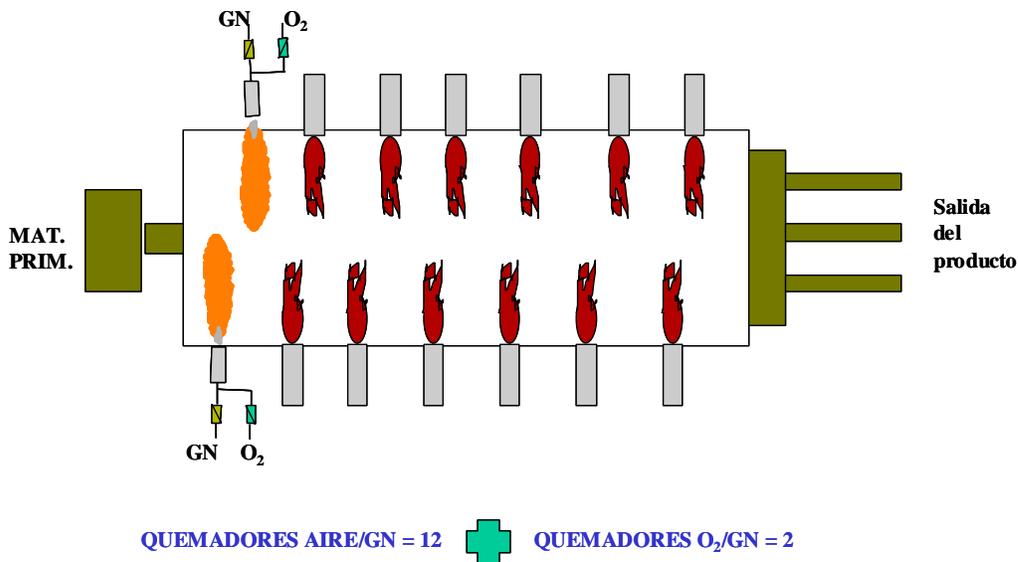
Figura 2.5 Aplicación de Boosting en un horno tipo End Port



Fuente: www.praxair.com

En la figura 2.6 se muestra un esquema tipo aplicación de Boosting sustituyendo parte de los quemadores a aire en un horno tipo Unit Melter.

Figura 2.6 Aplicación de Boosting en un horno tipo Unit Melter.



Fuente: www.praxair.com

2.4.4 All Oxy Fuel (AOF)^{(2) (3) (4)}

La aplicación de oxígeno mediante la técnica denominada *All Oxy Fuel (AOF)* consiste en la sustitución completa de los quemadores a aire por quemadores oxígeno combustible. En esta técnica es necesario sustituir de forma prácticamente completa los componentes del sistema de combustión dado que se requieren quemadores especiales para quemar la mezcla oxígeno combustible, nuevas válvulas dado que se maneja menor flujo de combustible a presiones diferentes, así como el tren de válvulas para el oxígeno.

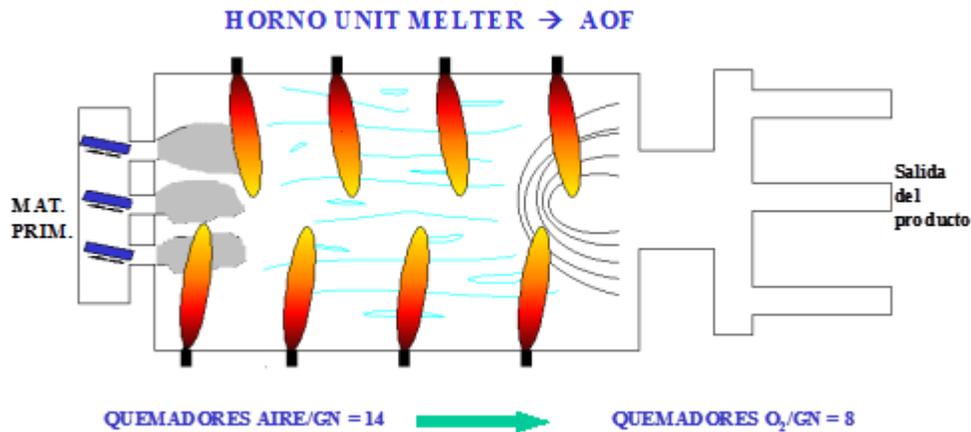
El empleo de esta técnica es indicada cuando se pretende lograr un ahorro de combustible importante, especialmente en procesos que se llevan a cabo a altas temperaturas (los cuales son técnicamente insuficientes), en cuyos casos el ahorro en el combustible compensa los gastos con oxígeno, además de las ventajas operacionales que implica trabajar 100% con quemadores oxígeno combustible, las cuales se pueden enumerar como sigue:

- a) Mejor transferencia de calor hacia los productos (flama más radiante), lo cual conduce a acortar los tiempos de proceso.
- b) Mejor distribución de la temperatura en el interior del horno.
- c) Menor presión interna (ayuda a alargar la vida de los refractarios)
- d) Reducción drástica del volumen de los productos de combustión (hasta un 70% menor)
- e) Reducción drástica de los niveles de emisiones contaminantes (NO_x , CO y material particulado principalmente).

Una de las limitantes que tiene esta técnica es que cuando se emplean numerosos quemadores en el horno la sustitución completa de los mismos requiere una inversión de capital elevada.

En la figura que sigue se muestra un esquema de la aplicación de la técnica AOF en un horno tipo Unit Melter.

Figura 2.7 Aplicación de AOF en un horno tipo Unit Melter



Fuente: www.praxair.com

2.5 Aplicación en la Industria del Vidrio ⁽⁴⁾

Oxígeno para la producción del Vidrio

Las altas temperaturas de fusión del vidrio requieren un uso intensivo de energía. Es crucial hacer un buen uso de energía. Así como optimizar el consumo de combustible.

Por otra parte, la quema de combustibles fósiles genera emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) a la atmósfera. Si añadimos oxígeno o sustituimos el aire totalmente por oxígeno, el proceso será más eficiente, el consumo de combustibles y las emisiones de NO_x se verán reducidos.

Se pueden conseguir los siguientes beneficios con la adición de oxígeno en procesos de fusión de vidrio:

- Aumento de la capacidad de producción
- Menor consumo de combustibles
- Menor volumen de gases de escape
- Menor contenido en NO_x en los gases de combustión
- Prolongación de vida del horno
- Flexibilidad de Operación

Pulido del Vidrio

Productos de alta calidad como copas de vino y cava y frascos para perfumes, entre otros, que exigen detalles y acabados en su superficie, sólo pueden ser manufacturados mediante pulidos. La práctica más común para lograr productos de alta calidad es el pulido ácido, en el cual se generan ácidos residuales que deben ser tratados posteriormente y que representan un problema medioambiental.

La utilización de oxígeno ofrece una alternativa económica y amigable con el medio ambiente, en la que no intervienen ácidos sino quemadores de oxígeno adaptados al proceso. Esta técnica es fácil de integrar en el proceso existente y es idónea para todos los tipos de vidrio. El pulido mediante oxígeno se efectúa entre el proceso de amoldamiento y templado, corrigiendo defectos, marcas de herramientas, pequeñas roturas y suavizando bordes afilados.

Figura 2.8 Pulido mediante un quemador de oxígeno



Fuente: Messer Gases for life. Aplicaciones de gases para la metalurgia 2013

Resumiendo, las ventajas de esta aplicación:

- Elimina defectos en la superficie del producto final
- Aumenta el brillo

- Amigable con el medio ambiente y la salud
- Se suprimen sustancias ácidas en el proceso
- Ahorro económico, ya que no es necesario tratar los ácidos residuales
- Fácil de implementar

Figura 2.9 Cristales y vidrios de plomo y cuarzo pulidos con flama de oxígeno



Fuente: Messer Gases for life. Aplicaciones de gases para la metalurgia.2013

Oxicombustión “Flameless”

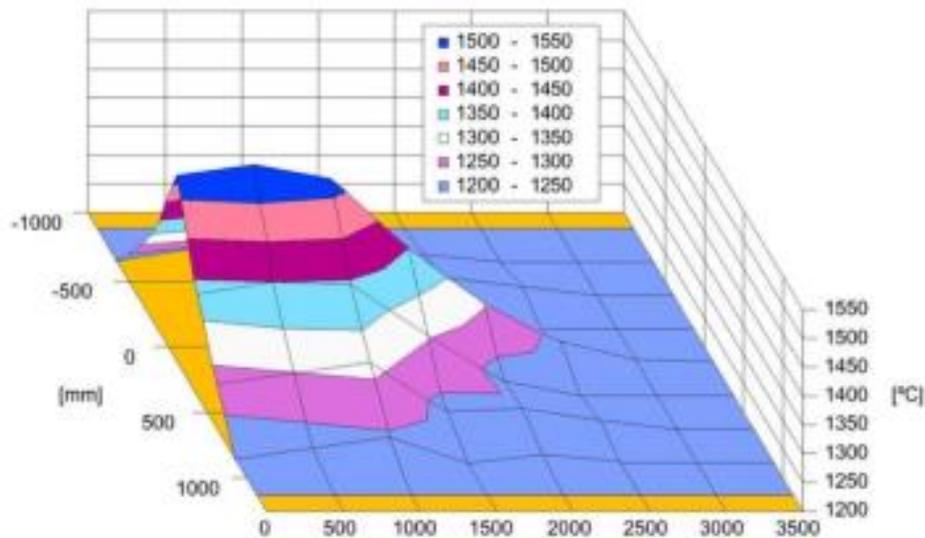
La oxicombustión diluida o “flameless”, cuyo nombre científico exacto es el de combustión volumétrica, es un proceso en el cual la llama se diluye con los gases de escape a fin de enfriar y alargar la llama. El resultado de dicho procedimiento hace la llama prácticamente invisible. Este tipo de combustión conlleva reducciones de las emisiones de NO_x y una distribución más homogénea de la temperatura en el interior del horno (aun así las flamas diluidas emiten la misma cantidad de calor)

Con una recirculación apropiada de los gases de escape dentro del horno, se alcanza la disolución de la flama, lo que conduce a temperaturas menores en la boquilla del quemador y las emisiones NO_x son mucho más bajas. Este efecto se puede lograr tanto con quemadores de oxígeno/combustible como en los de aire/combustible.

El gráfico que aparece a continuación muestra la distribución de temperatura en el interior del horno. Para una combustión oxi-gas en modo sin flama (flameless) la temperatura es

más baja, pero mejor distribuida a lo largo del horno, debido a las recirculaciones internas de la atmósfera del horno justo en frente de la boquilla del quemador.

Figura 2.10 Distribución de la temperatura en la cámara de combustión durante la combustión oxi-gas en modo flameless. La temperatura del horno es de 1200°C.



Fuente: Messer Gases for life. Aplicaciones de gases para la metalurgia.2013

En el gráfico de la figura 2.10 se muestra la distribución de temperatura en el interior de un horno. Para una combustión en modo flameless (sin flama) aunque la temperatura es más baja está mejor distribuida a lo largo del horno, debido a las recirculaciones internas de la atmósfera del horno justo en frente de la boquilla del quemador.

2.6 Ventajas de la combustión con oxígeno

Procesos de Alta Temperatura

Dentro de la industria en los procesos de alta temperatura pareciera increíble que el uso de O_2 frecuentemente es más rentable que sustituirlo por aire, “aparentemente” gratuito, en muchos de los procesos industriales donde se efectúa un proceso de combustión. La razón

es muy simple: el aire no es tan gratuito como parece, hay que comprimirlo y precalentarlo para conseguir las temperaturas requeridas para una combustión y eficiencia suficiente.

Puesto que el aire se compone en su mayoría de nitrógeno que es contraproducente para una combustión eficiente, debido a que el nitrógeno se calienta inevitablemente junto con el resto de los componentes que conforman la mezcla de aire y aumenta de forma innecesaria el volumen de los gases de escape, así como la demanda energética. A elevadas temperaturas, el nitrógeno genera óxidos de nitrógeno (NOx) indeseados, muy costosos de separar de los gases de combustión.

El empleo de oxígeno actualmente es indispensable en procesos de fundición en altos hornos u hornos rotativos. El uso del oxígeno para fundición de vidrio en hornos de cubilote presenta numerosas ventajas. El oxígeno ahorra energía (combustibles fósiles) y disminuye las emisiones de contaminantes. La oxicomustión conlleva considerables reducciones en los gastos de inversión.

2.7 Eficiencia Térmica

Una de las ineficiencias de la combustión convencional con aire es la gran cantidad de nitrógeno que arrastra el sistema, el cual no toma parte en la reacción de combustión y solo se calienta para abandonar el sistema, llevando consigo un porcentaje importante de la energía liberada por la reacción de combustión.

En la combustión asistida con oxígeno un determinado porcentaje o la totalidad del aire de combustión se reemplaza por oxígeno puro o de una concentración elevada (típicamente 90% en volumen ó más), con lo cual se reduce la cantidad de nitrógeno alimentada al sistema. Al realizar lo anterior, se alcanza una temperatura de flama más alta, con lo cual se tiene energía de una mayor calidad, que se puede aprovechar de forma más eficiente.

Una forma típica de determinar la eficiencia térmica de un sistema es mediante la ecuación:

$$\eta = \frac{T_{flama} - T_{gases}}{T_{flama} - T_{amb}} \quad (Ec. 2.1)$$

Donde:

T_{Flama} = *Temperatura de Flama,*

T_{gases} = *Temperatura de salida de los gases de combustión*

T_{amb} = *Temperatura ambiente*

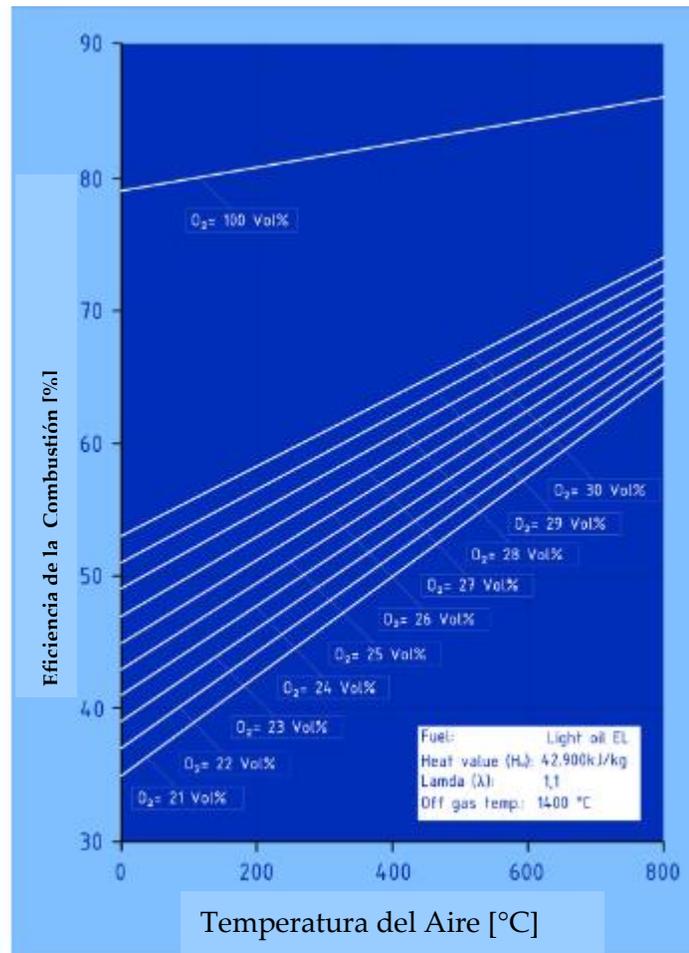
De la ecuación anterior se puede visualizar que mientras más alta sea la temperatura de los gases de combustión de un horno menor será la eficiencia térmica del sistema. Es por esto que los procesos que se efectúan a alta temperatura (como es el caso de la fusión de vidrio, o hierro, y en determinado momento algunos metales no ferrosos, como plomo o aluminio) las eficiencias térmicas son muy bajas (típico menos de 30%). Es decir de cada 100 unidades de energía que entran al sistema, solo se aprovechan 30 o menos y el resto sale por la chimenea como gases de combustión calientes.

Cuando se emplea oxígeno en la combustión, la temperatura de flama es más alta, lo que favorece la eficiencia térmica. Los gases de combustión formados son menos, por lo que la cantidad de energía que arrastran consigo es menor, en consecuencia, comparados con la combustión convencional con aire.

2.8 Significado de aumentar la eficiencia de combustión

En el proceso de combustión típico, se hace reaccionar un hidrocarburo (por ejemplo, carbón) con aire a temperatura ambiente. El aire está compuesto de un 78% de nitrógeno, un gas inerte que no reacciona. Por ello, la mayor parte del calor se pierde en los gases de salida.

Figura 2.11 Influencia de la temperatura del aire de combustión y la concentración de oxígeno en la eficiencia de la combustión.



Fuente: Messer Gases for life. Aplicaciones de gases para la metalurgia

Precalear el aire también aumenta la eficiencia de combustión, pero no de una manera tan contundente. Además requiere sistemas de recuperación de humos costosos que necesitan mantenimiento. El oxígeno, sin embargo, no requiere ningún precalentamiento y garantiza un mayor rendimiento.

2.8.1 Flexibilidad

Otra de las ventajas de emplear oxígeno en la combustión es la flexibilidad que ofrece el sistema. La combustión con oxígeno produce flamas mucho más estables, por lo que el *turndown* (relación de capacidad alta/capacidad baja del sistema) se hace más amplio.

Por otro lado, la respuesta que ofrece un sistema de combustión asistido por oxígeno es más rápida, es decir, se alcanza las temperaturas de operación en un menor tiempo.

Cuando se emplea la combustión con oxígeno con el sistema AOF, se puede prescindir de la energía eléctrica, ya que la presión del tanque de suministro es suficiente para alimentar los quemadores (no se requiere de turboventilador).

2.8.2 Ambiental

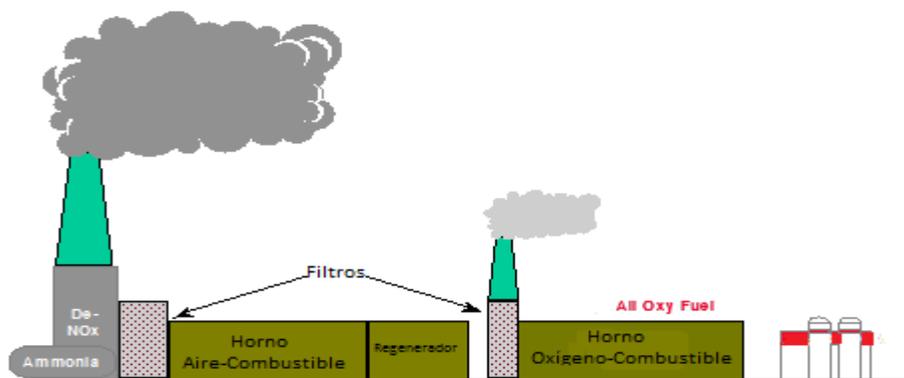
La combustión reforzada con oxígeno produce menores cantidades de gases de combustión, lo cual produce a su vez beneficios de índole ambiental, los cuales desafortunadamente no pueden ser evaluados económicamente de forma sencilla.

La combustión asistida con oxígeno es más eficiente ya que las reacciones suelen ser más rápidas y estequiometricamente más completas, lo que conlleva a que la formación de contaminantes típicos como el CO se vea drásticamente disminuida. Otros de los contaminantes que se reducen apreciablemente son los óxidos de nitrógeno, en el caso de la combustión AOF (All Oxy Fuel), dado que no se tiene disponibilidad de nitrógeno el cual a altas temperatura conduce a la formación del denominado NO_x térmico.

Al tener una menor cantidad de gases de combustión con la combustión asistida con oxígeno, el arrastre de material particulado también se ve reducido.

A continuación se muestra un comparativo de los procesos de combustión con aire y con oxígeno para gas natural.

Figura 2.12 Comparativo de Emisiones para combustión con Aire vs Oxígeno



Fuente: Air Products and Chemicals, Inc.

2.9 Tipos de quemadores

Los equipos de calentamiento industrial empleados en estufa, hornos, calentadores y procesos en general, básicamente están centralizados en el uso de quemadores, equipos de control de flujo y equipos de control eléctrico del proceso.

2.9.1 Quemadores

Son parte esencial del proceso de calentamiento su función principal es posicionar la flama estable en forma y cantidad energética de manera continua, sin la necesidad de un piloto.

Dentro de los tipos de quemadores podemos dividirlos en base al tipo de combustible a quemar:

- Sólidos
- Líquidos
- Gaseosos
- Duales

2.9.1.1 Quemadores de Combustibles sólidos.

Estos combustibles incluyen. Carbón, madera mezclas pesadas y desechos sólidos para incineración y estos requieren de tiempo adicional para quemar en su totalidad todos los componentes líquidos y gaseosos que son resultado del proceso de calentamiento y/o incineración. El método de operaciones es simple y requiere estar en contacto con el oxígeno y de fraccionar el combustible en pequeñas partes, hay que tener cuidado ya que

al tener pequeñas porciones de combustible, puede tender a incrementar la contaminación de arrastre de partículas hacia la chimenea.

2.9.1.2 Quemadores de combustibles líquidos.

Aceites y otros combustibles líquidos deben ser evaporados antes de ser quemados. Algunos quemadores de capacidades pequeñas alcanzan esta característica al ser calentados. Estos son llamados quemadores vaporizadores. Algunos ejemplos típicos de estos son: las antorchas, estufas de gasolina, quemadores de queroseno, y las primeras estufas a base de aceite. La mayoría de los quemadores industriales emplean dos pasos para alcanzar condiciones de quemado de estos combustibles. La primera es atomizando los combustibles en millones de pequeñas gotas que van de (10 a 1,000 micrones de diámetro) para después de mezclar con oxígeno pasar a su quemado, estos quemadores tienen la habilidad de vaporizar combustibles líquidos a muy altos rangos de capacidad.

Los requisitos para una buena vaporización después de una atomización son:

- Contar con una gran cantidad de aire que garantice la buena mezcla con las partículas de combustibles líquido, o la cantidad de oxígeno correcta para el mismo fin.
- La corriente de aire u oxígeno deberá ser suministrada en flujo turbulento y alta velocidad para producir una gran fricción entre este y las partículas del combustible.
- El calor proporcionado por la flama enfrente de la mezcla debe garantizar el sostenimiento de la misma por la transferencia de calor hacia la mezcla en forma de spray.

Esta última característica debe ser función del diseño del cañón del quemador o block de combustión que garantice la recirculación de gases hacia la base de la flama.

2.9.1.3 Quemadores de Combustibles Gaseosos.

Los quemadores industriales a gas pueden ser clasificados en Pre-mezcla, mezcla en la boquilla o mezcla retardada en la boquilla, de acuerdo al principio en el que el combustible y el comburente se combinan para hacer la combustión.

2.9.1.4 Quemadores de Premezcla.

En sistemas de premezcla, el aire y el gas se mezclan en algún punto aguas arriba de los puertos del gas por un mezclador inspirador, un mezclador aspirador o un mezclador

mecánico. La boquilla actúa como un sostenedor o retenedor de flama, manteniendo la flama en la posición deseada. No son adecuados para la combustión con oxígeno.

2.9.1.5 Manifold de quemadores o puertos pequeños.

Una gran variedad de quemadores pueden ser empleados en conjunto con los mezcladores. Uno de los más comunes consiste en un manifold con una serie de pequeños orificios. La mayoría de los quemadores domésticos son de este tipo. También se les conoce como quemadores atmosféricos, debido a la baja presión de operación y al alto porcentaje de aire secundario empleado. Este tipo de quemadores es generalmente silencioso. Si la flama de algún puerto se apaga, el resto funciona como piloto y ayuda a re-encender, siempre y cuando los puertos estén cercanos. La versatilidad es el calentar en áreas muy amplias, para bajas temperaturas, tales como: calentamiento de aire, procesos de barnizado, estufas, secadores, procesos de curado, etc.

2.9.1.6 Quemadores a presión.

Permite un alto rango de calor suministrado en un pequeño espacio. Este tipo incluye múltiples diseños para aplicaciones específicas, que se caracteriza por tener un puerto de mezcla o boquilla de mezclado, que produce una flama corta en forma, pero intensa en capacidad térmica. Son instalados en forma individual con un solo mezclador, pero puede haber instalaciones con un mezclador y diferentes boquillas, salvo un buen dimensionamiento de los manifolds.

Los quemadores pueden ser del tipo abierto o cerrado, en el caso de los abiertos, comúnmente van acompañados de una boquilla de retención de flama, en caso contrario con un block de combustión.

Los de tipo cerrado con block de combustión son empleados en una variedad de aplicaciones industriales, incluyendo hornos de baja temperatura, secadores, hornos de tratamiento térmico forja y fundición.

2.9.1.7 Tipos de Pre-Mezcladores.

Están los inspiradores o mezclador Venturi que utiliza la energía del gas para inducir el aire primario necesario en proporción al flujo de gas. Este es el único tipo de mezclador el cual no necesita uso de ventilador.

Este tipo de mezcladores en uso industrial sólo son aplicables donde la condición es la existencia de gas a alta presión, al menos 5 PSI en la línea de gas. En el caso de Gas Natural al menos 10 PSI de presión. Los inspiradores raramente se emplean con propano o gas butano en la industria, debido a que requiere 25 a 30 volúmenes de aire por volumen de gas, requiriendo dispositivos internos sobredimensionados.

Para obtener la cantidad de aire necesario para la combustión en inspiradores de alta presión de mezcla, la boca del inspirador deberá ser maquinada cuidadosamente y alineada con respecto al orificio de gas. El tamaño de la varilla dependerá de la capacidad deseada, la relación estequiométrica, la gravedad y la presión del gas.

Para los quemadores del tipo aspirador, que son mezcladores tipo jet, un mezclador de tipo atmosférico para bajas presiones de aire (3 a 24 PSI) y “cero en gas” gas a presión atmosférica. El aire es empujado a través del Venturi de tal manera que el Venturi induce el gas en la corriente de aire en proporción correcta. No son adecuados para combustión con oxígeno.

2.9.1.8 Quemadores a Gas de Mezcla en la boquilla.

Como el nombre lo indica, la mezcla de oxígeno y gas se hace hasta la salida de la boquilla, dentro del quemador en sí, no existe contacto entre los dos gases, por tal motivo el objetivo de la boquilla es realizar este trabajo, al cual fue diseñada. Las principales ventajas de los mezcladores de gas en boquilla versus quemadores de premezcla son:

- La flama no presenta retroceso “Flashback”, debido a que el aire y el gas no van mezclados. Esta ventaja no solo da estabilidad, sino reduce el peligro de explosión para quemadores de grandes capacidades.
- Un amplio rango de relaciones comburente/combustible son posibles. Los quemadores de premezcla deben de operar dentro de los límites de flamabilidad del combustible. Sólo el área inicial de mezcla en el caso de los quemadores de mezcla en la boquilla, necesita estar dentro de estos límites.
- Grande flexibilidad en los diseños de quemadores y flamas es posible con los quemadores de mezcla en la boquilla, los cuales permite la combinación de equipos duales (emplear dos combustibles) y desarrollar una variedad de tipos de flama.

2.9.1.9 Quemadores Convencionales.

Los quemadores industriales son denominados de acuerdo a la mayor parte de suministro de energía, como puede ser:

- Por convección
- Por radiación
- Por Conducción

Si bien, todos los quemadores proporcionan los tres, algunos diseños concentran su atención mayormente en alguno de ellos.

Así mismo tenemos la clasificación por el tipo y forma de su flama:

- Larga y radiante
- Alta velocidad (alta convección)
- Copa radiante
- Flama Plana
- Quemadores de Flama Ajustable
- Para ducto y/o incineración de humos
- De flama retardada o Tubo Radiante

2.9.1.10 Quemadores Duales.

Son aquellos quemadores que pueden tener la combinación de dos o más combustibles, sin necesidad de cambio del quemador en sí. Entre estos pueden ser:

- Quemador a Gas con quemador a líquido
- Quemador a Aire y Oxígeno
- Quemador combinado a Gas con combustible sólido y líquido (Ej. Quemadores para la Industria Cementera)

Los quemadores de combustible combinado son aplicados a nivel industrial principalmente en calderas, que pueden quemar carbón pulverizado, gas-oil, fuel-oil y gas. La principal razón para que se den estas combinaciones de combustible son las ventajas de las diferencias de precio durante los cambios estacionales anuales, como variaciones invierno-

verano en los precios del gas natural o del fuel-oil. El diseño puede incluir también la posibilidad de quemar dos combustibles simultáneamente. Los hogares están diseñados normalmente para quemar gas junto a combustibles líquidos o carbón pulverizado, o para quemar gases solamente. Los diseñadores de la combinación quemador-hogar tratan de conseguir flamas, o longitudes de flama, que no toquen los tubos, paredes o suelos de tubo y donde el calor radiante sea el método fundamental de transmisión térmica en el hogar.

2.9.1.11 Tableros Típicos.

En el campo del control de la combustión incluye una gran variedad de temas, más de los que se puedan tocar dentro del presente documento. Los más importantes son principalmente las válvulas y reguladores empleados en los sistemas de combustible y comburente, la relación estequiométrica, control de presión del (los) fluido(s), control de presión del horno, y los controles de seguridad los cuales se tocarán a detalle.

Los controles pueden ser manuales, semiautomáticos y automáticos. Los controles automáticos en función de la temperatura, presión y/o flujo de los fluidos son comúnmente empleados.

Capítulo 3

Generalidades sobre Hornos de Fusión de Vidrio y Procesos de Producción

<< Todo hombre puede ver las tácticas que uso donde conquisto, pero lo que nadie puede ver es la estrategia que envuelve a la victoria >>

Sun Tzu

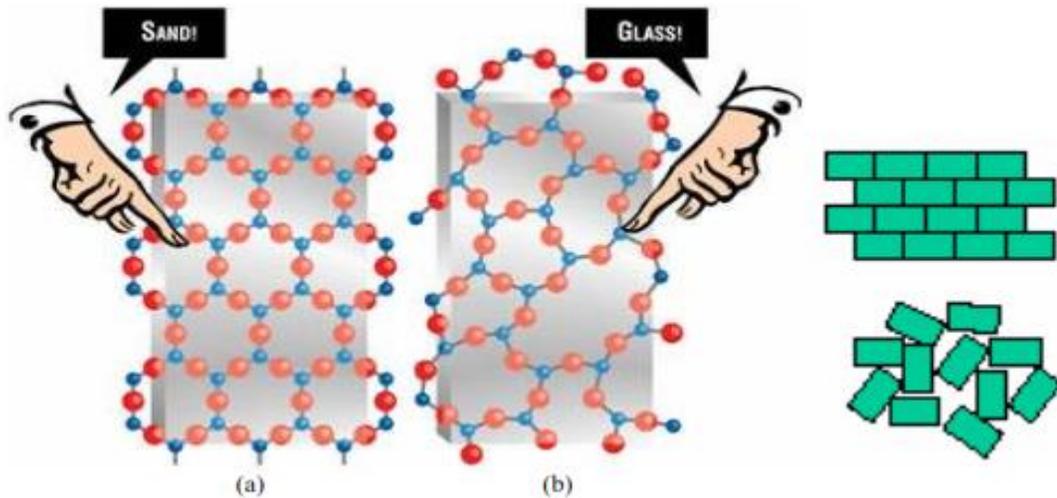
3.1. Introducción

La A.S.T.M considera que un vidrio es un producto inorgánico enfriado hasta un estado rígido sin experimentar cristalización.

El vidrio es un producto artificial que se obtiene a partir de unas materias primas que aportan ciertos óxidos, como pueden ser SiO_2 , CaO , Na_2O , etc., en una producción determinada. Si se consideran únicamente sus principales propiedades técnicas como puede definirse como un producto inorgánico amorfo, constituido predominantemente por sílice (Un vidrio típico de cal y sosa está formado por aproximadamente 70% en peso de SiO_2 , el resto es principalmente Na_2O y CaO), duro, frágil y transparente, de elevada resistencia química y deformable a alta temperatura. El paso de las materias primas al vidrio se hace fundamentalmente a través de reacciones químicas, obteniéndose la masa vítrea a alta temperatura.

Se ha definido al vidrio como una sustancia inorgánica en condición análoga a la de su estado líquido, que, como consecuencia de un cambio reversible en su viscosidad durante el enfriamiento, ha alcanzado un grado de viscosidad tan elevado como para poder considerarse rígida a efectos prácticos.

Figura 3.1 Representación gráfica de las diferencias entre un cristal (a) y un vidrio (b).



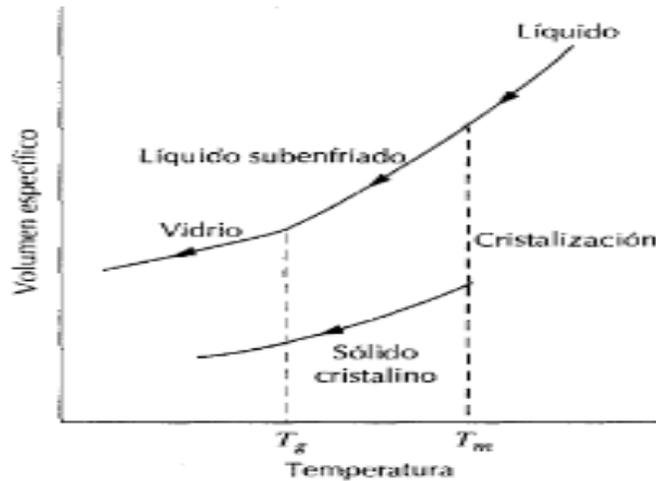
Fuente: www6.unovi.es consultado Febrero 2017

La Figura 3.1 (a) es una representación bidimensional de un sólido cristalino, (b) representa el mismo sólido pero con estructura amorfa. Las moléculas del vidrio no están colocadas en un orden repetitivo de largo alcance como ocurre en un sólido cristalino, sino que cambian su orientación de una manera aleatoria en todo el sólido, el SiO_2 , presenta esta propiedad de acuerdo a su enfriado, cuando es cristalino forma el cuarzo y cuando es amorfo forma el vidrio.

Los materiales semicristalinos que presentan una parte amorfa y otra cristalina son los materiales plásticos.

Una particularidad que tienen los vidrios es su comportamiento ante la solidificación, la cual es diferente a la de un material cristalino, como puede verse en la Figura 3.2 Comparación del comportamiento del volumen específico con la temperatura de materiales cristalinos y no cristalinos. Los materiales cristalinos solidifican a la temperatura de fusión T_m La temperatura de transición vítrea T_g es una característica del estado cristalino. Figura 3.2, en la que se representa el volumen específico (inverso de la densidad) frente a la temperatura para ambos tipos de materiales. Por esto, los vidrios carecen de un verdadero punto de fusión o temperatura de líquidos, que sólo presentan los sólidos cristalinos y que es la temperatura a la cual la fase cristalina coexiste en equilibrio con la fase fundida, como se ve en la figura 3.2.

Figura 3.2 Comparación del comportamiento del volumen específico con la temperatura de materiales cristalinos y no cristalinos. Los materiales cristalinos solidifican a la temperatura de fusión T_m La temperatura de transición vítrea T_g es una característica del estado cristalino.



Fuente: www.upv.es consultado Febrero 2017

Los cuerpos vítreos pasan de un modo reversible de su forma fundida en estado líquido al estado rígido o congelado sin la aparición de ninguna nueva fase en el sistema. El paso de una forma a otra transcurre, por lo tanto, sin variar el número de grados de libertad del sistema, a diferencia de la transición líquido-sólido caracterizado por la aparición de una nueva fase y la disminución consiguiente en uno de sus grados de libertad.

3.2. Industria del vidrio

La industria del vidrio es un sector sumamente diverso, tanto por los productos como por las técnicas de producción que se emplean. Los productos diversos van desde copas, vasos de vidrio artísticamente hechos a mano, envases, hasta vidrio flotado en grandes cantidades para los sectores de construcción y automotriz por nombrar algunos.

Las técnicas de fabricación varían desde los pequeños hornos eléctricos que se utilizan en el subsector de fibra cerámica hasta los hornos regenerativos de fusión que se utilizan en el subsector de vidrio plano.

Este sector produce principalmente artículos básicos, en términos globales, depende en gran medida de los sectores de la construcción, automotriz, de bebidas y alimentación. Sin embargo, algunos de los subsectores de menor volumen producen artículos técnicos o de consumo de gran valor.

Una vez formado el vidrio, se le somete a una serie de operaciones, obteniéndose un artículo determinado a la temperatura ambiente. Como producto acabado, puede considerarse como un líquido subenfriado, ya que, aun siendo enfriado por debajo de su punto teórico de solidificación, conserva las propiedades y estructura interna de un líquido.

La cantidad de energía empleada en la obtención de vidrio varía ampliamente dependiendo de factores, como son materias primas utilizadas, el tipo de vidrio, la clase de producto, los equipos empleados, el modo de operación de éstos (funcionamiento continuo o discontinuo), etc. En cualquier caso, el consumo energético es importante; ello es debido, a los siguientes factores:

- Temperatura de fusión-afinado elevada (1500°C – 1600°C).
- Bajos rendimientos de los hornos de fusión convencionales.
 - En Hornos con Recuperadores de calor el rendimiento máximo es del 40 al 50%.
 - Para Hornos Convencionales de un 25 al 40%.
 - En Hornos de Crisol el rendimiento máximo es hasta del 5%.
 - En Hornos Eléctricos la eficiencia energética se sitúa entre un 60 y un 85%, pero que por motivos de costo, su utilización es limitada.
- Enfriamiento controlado. No sólo no se aprovecha el calor del Vidrio fundido, sino que además debe aportarse energía para controlar dicho enfriamiento.
- Otros factores específicos de cada proceso en particular

Las pérdidas de calor inherentes a los procesos de fabricación actualmente utilizados, hacen que todavía se esté muy lejos del consumo teórico, y esto abre un área de oportunidad a las posibilidades de investigación de nuevas tecnologías.

3.2.1. Producción de vidrio

3.2.1.1. Tipos de vidrios.

Dentro de los procesos de fabricación de vidrio, se puede establecer cierta clasificación:

- a) Fabricación de vidrio hueco (para envases)
- b) Fabricación de vidrio prensado (Vidrio de mesa, aisladores, etc.)
- c) Fabricación de Vidrio Plano:
 - Sistema Estirado Vertical (Pittsburg y Foucault).
 - Sistema Estirado Horizontal (Libbey-Owens)
 - Sistema de Flotación
 - Sistema de Laminación

Otros procesos: Fibra de vidrio, vidrio óptico, tubo de vidrio, vidrio artístico, etc.

Los procesos y técnicas de fabricación que suelen emplearse en el sector del vidrio la mayoría pueden dividirse en cinco fases básicas: manipulación de los materiales, fundición, conformación, procesos finales y embalaje.

Dada su diversidad, la industria del vidrio utiliza una amplia gama de materias primas. Las técnicas de manipulación de materiales son comunes a muchas industrias. El mayor problema es el control del polvo generado por la manipulación de materiales finos. Las principales materias primas utilizadas para la fundición son materiales para el soplado de vidrio (por ejemplo, ceniza de sosa, caliza o feldespatos) y agentes colorantes o decolorantes (por ejemplo, cromita férrica u óxido de hierro).

Por su volumen de fabricación los vidrios pueden ser clasificados en:

- Comerciales
- Especiales

Los vidrios comerciales son producidos en gran escala, y se usan en la mayoría de las aplicaciones, mientras que los especiales son menos comunes ver la tabla 3.1

TIPO DE VIDRIO	NOMBRE	CARACTERÍSTICAS
Comercial	Soda-Cal	Este tipo de vidrio es el más utilizado, pues sus propiedades, lo hacen adecuado para su uso con luz visible. Los recipientes hechos de vidrios de soda - cal son virtualmente inertes, no contaminado la materia que contienen ni su sabor. Son poco resistentes al choque térmico.
	Plomo	Utiliza óxido de plomo en lugar de óxidos de calcio, y óxido de potasio en lugar del óxido de sodio, y se conoce comúnmente como cristal al plomo. Los vidrios al plomo tienen un alto índice de refracción y una superficie relativamente blanda, lo cual permite una fácil decoración por esmerilado, corte o tallado.
	Borosilicato	Están compuestos principalmente de sílice (70-80%) y óxido bórico (7-13%) con pequeñas cantidades de álcalis (óxidos de sodio y potasio) y óxido de aluminio. Su principal característica es una buena resistencia a los choques térmicos.
Especiales	Silice Vitreo	Son vidrios hechos casi exclusivamente de sílice. Son necesarias temperaturas de fusión sobre 1.500°C.
	Vidrios de Aluminosilicato	Contienen cerca de un 20% de óxido de aluminio(Al_2O_3), además de óxido de calcio, óxido de magnesio y óxido de boro en cantidades relativamente pequeñas.
	Vidrios de Sílice Álcali-Bario	Contiene una cantidad mínima de óxidos de plomo, bario o estroncio.
	Vidrio de Borato	Contienen pequeñas cantidades o nada de sílice. Son usados para soldar vidrios, metales o cerámicas, a relativamente, bajas temperaturas.
	Vidrio de Fosfato	Consisten principalmente en mezclas de pentóxido de vanadio (V_2O_5) y pentóxido de fósforo (P).

Tabla 3.1 Tipos de Vidrio y sus características¹

¹ Fuente: British Glass Manufacturers Confederation (BGMC), 1999.

Para la producción de vidrio sódico cálcico cuya composición se muestra en la Tabla 3.2 Composición química de Vidrios importantes varia ligeramente dependiendo de las materias primas disponibles y el color (blanco, ámbar, o verde).

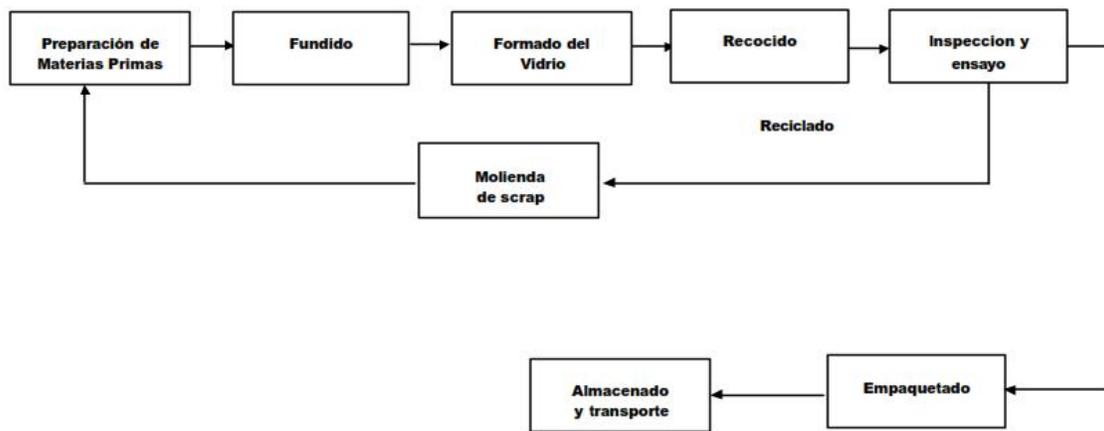
Component	Flat glass (Float)	Container glass	Tableware (Bohemian crystal)	Lead crystal	Opal glass (lighting)	Laboratory glass	Optical glass	Glass fibres Centrifugal spinning process	Flame attenuation process	Textile fibres
SiO ₂	72.8	73.3	74	60	67.5	80.4	61-70	62.0	45.6	53.2
Al ₂ O ₃	0.7	1.5	0.18	0.08	5.0	2.27	0.3-3	3.4	13.5	14.2
Fe ₂ O ₃ + TiO ₂	0.09	0.06	0.02	0.02	0.15	0.03	-	0.5	15.5	0.34
CaO	8.6	9.8	5.3	-	9.4	-	<3	8.0	10.4	22.6
PbO	-	-	2.8	24.0	-	-	-	-	-	-
MgO	3.61	0.34	-	-	-	-	-	3.7	10.3	0.42
Na ₂ O	13.7	14.2	5.0	1.0	13.6	3.8	<5	14.0	3.5	0.26
K ₂ O	0.2	0.6	12.7	14.9	1.8	0.6	12-18	1.8	1.1	0.21
SO ₃	0.3	0.2	-	-	0.2	-	-	0.2	0.1	-
F	-	-	-	-	4.0	-	-	-	-	-
B ₂ O ₃	-	-	-	-	-	12.9	6-20	5.0	-	8.55
BaO	-	-	-	-	-	-	<10	1.4	-	SrO + ZrO + P ₂ O ₅ = 0.22

Tabla 3.2 Composición química de Vidrios importantes

Fuente: Melting Furnace Design in the Glass Industry.1976

3.3. Operaciones de la elaboración del vidrio

La elaboración del vidrio es un proceso largo y complejo que comienza con el formado de la mezcla y termina con la salida del producto frío a la desembocadura del túnel o del arca de recocido. El proceso puede dividirse en seis etapas más o menos diferenciadas.

Figura 3.3 Etapas básicas del proceso de producción de vidrio²

3.3.1. Dosificación y Mezcla

Las materias primas, con unas características de granulometría, humedad y propiedades químicas determinadas, se dosifican y mezclan con objeto de conseguir el tipo de vidrio deseado.

En esta operación básica se utiliza, fundamentalmente, energía eléctrica para accionamiento mecánico. En ciertos casos, se utiliza además un combustible con objeto de secar la arena.

Una vez que las materias primas están pesadas, mezcladas y con la cantidad de agua necesaria para obtener una humedad correcta, (4-4.5%), son llevadas al horno mediante una cinta transportadora e introducidas en el mismo mediante una máquina llamada enformadora (Figura 3.4 Enformadora.).

² Fuente: EPA 1995

Figura 3.4 Enformadora.

3.4.2 Fusión, Afinado, Homogenización y Acondicionamiento.

La formación del vidrio comprende una serie de transformaciones físicas y reacciones químicas a alta temperatura, en virtud de las cuales la mezcla vitrificable se convierte en una masa vítrea. Durante este proceso los componentes de la mezcla experimentan múltiples modificaciones, tanto físicas como químicas.

Entre los fenómenos físicos se pueden citar los siguientes:

- La fusión de cada constituyente y la de los productos de reacción.
- La modificación de su estado cristalino (transformaciones cristalinas)
- Una volatilización parcial
- Evaporación de agua de humedad

Entre los fenómenos químicos se tienen:

- Evaporación de agua de humedad
- Deshidratación de ciertos constituyentes (sales hidratadas)
- Disociación de carbonatos, sulfatos y en fabricaciones de color de nitratos.

- Una asociación de óxidos liberados (reacciones entre las distintas especies químicas).
- Desprendimiento de gases

La simultaneidad con que se producen algunas de estas transformaciones fisicoquímicas, por una parte, y el elevado número de componentes que intervienen en los sistemas de la mayoría de los vidrios, por otra, hacen muy complejo el estudio de los equilibrios de todas estas reacciones.

La fundición (la mezcla de materias primas a alta temperatura para obtener vidrio fundido) es la parte más importante del proceso productivo. Se trata de una compleja combinación de reacciones químicas y procesos físicos, y puede dividirse en varias fases: fusión; afino y homogenización; y acondicionamiento.

A medida que la arena y la ceniza de soda son recibidas, se muelen y almacenan en depósitos en altura, en espera del momento en que serán transferidas a través de un sistema de alimentación por gravedad a los pesadores y mezcladores. Las materias primas son dosificadas y combinadas con vidrio reciclado para formar una mezcla homogénea, la cual es trasladada por medio de cintas transportadoras a un sistema de almacenamiento de cargas (batch) donde es contenida antes de ser depositada en el alimentador del horno de fundición.

Al entrar la carga al horno a través de los alimentadores, ésta flota en la superficie de la masa de vidrio fundido. Una vez que se funde, pasa al frente del baño y eventualmente fluye a través de la garganta de carga al refinador, donde es acondicionada térmicamente para descargar al proceso de formado.

3.3.2. Conformado

El comportamiento viscoso plástico de los vidrios a temperatura elevada facilita su moldeado en un amplio intervalo térmico, utilizando para ello diversos procedimientos en

función del tipo de vidrio fabricado: colado, soplado, prensado, estirado, flotado, laminado, centrifugado y fibrado.

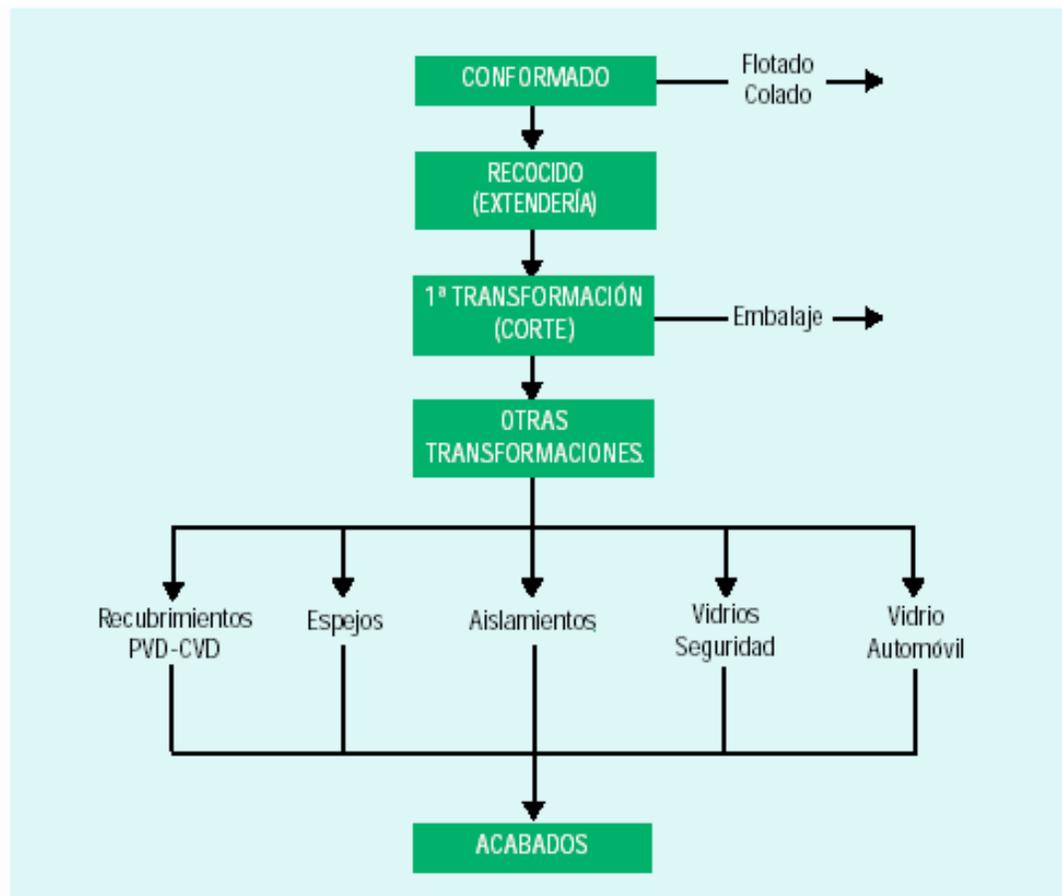
En cada caso, el vidrio se adiciona térmicamente a la zona de trabajo para estabilizar su viscosidad. De este parámetro depende la utilización de uno u otro procedimiento de conformado así como la cadencia y el rendimiento de fabricación en los sistemas automáticos.

Después del conformado, se somete al vidrio a un proceso de enfriamiento y recocido, etapa crítica ya que se requiere que el vidrio pase de un estado plástico a un estado rígido con la suficiente lentitud para que su estructura se relaje de forma uniforme y adquiera en todos sus puntos el mismo volumen específico.

Esta operación es característica de cada proceso. De manera somera se describe a continuación los sistemas de fabricación más empleados.

- Fabricación de vidrio hueco y vidrio prensado industrial. Las gotas de vidrio caen en las máquinas de conformado, donde se consigue la forma final en una o dos etapas: Prensado en caso de vidrio prensado; un primer prensado o soplado y un soplado final para vidrio hueco. En esta operación se consume energía eléctrica, aire comprimido y aire o agua para refrigeración. En ciertos casos, se utiliza además un combustible limpio.
- Fabricación de vidrio plano según el sistema estirado. Existen dos sistemas: Estirado vertical y estirado horizontal. En ambos, el vidrio fundido se hace pasar por unos rodillos con objeto de formar la lámina con un espesor determinado. En esta fase del proceso se consume fundamentalmente energía eléctrica.

Figura 3.5 Fabricación de Vidrio Plano



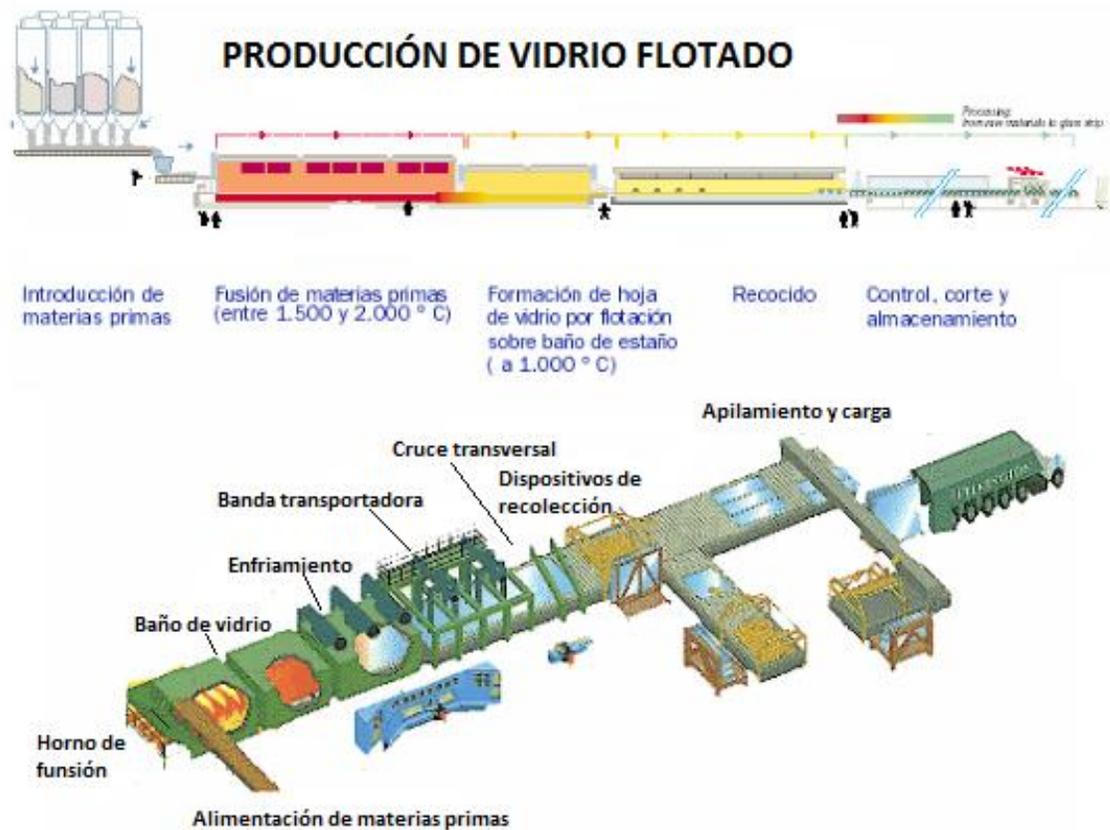
Fuente: www6.uniovi.es Febrero 2017

- Fabricación de Vidrio plano según el sistema de flotación. El cae sobre un baño de estaño fundido, donde se producen los fenómenos de flotación y formación de la lámina en una atmósfera cuidadosamente controlada a temperaturas alrededor de los 1000°C. La lámina es sometida a enfriamiento mientras avanza en a lo largo del estaño hasta que alcance los 600°C aproximadamente. La lámina pasa a través de un horno túnel de recocido, mientras es transportada rumbo a su almacenaje, para posteriormente llevar a cabo su corte. Para la conducción del proceso, desde el punto de vista térmico, dispone el baño una instalación de resistencias eléctricas y dispositivos de refrigeración móviles.

La importancia de esta aportación es la posibilidad de obtener directamente una lámina de vidrio pulido por ambas caras, sin necesidad de ser sometida a ninguna

operación posterior de desbaste y pulido. El vidrio adquiere por su cara superior un pulido al fuego y por la inferior, el pulido especular que le comunica la superficie libre del baño de estaño fundido sobre el que se desliza.

Figura 3.6 Procedimiento de Fabricación de Vidrio Plano Flotado



Fuente: Vidrios Lirquén S.A. 2017

- Fabricación de vidrio plano según el sistema de laminación. Se incluye todo aquél que haya sido conformado laminarmente. Las láminas no tienen que ser rigurosamente planas, sino que pueden estar curvadas o presentar un relieve impreso en su superficie. El vidrio se extrae del horno de fusión por el procedimiento de colada continua, siendo sometido a un proceso de laminación, cuya misión consiste en formar la lámina, darle el espesor deseado y grabar en la hoja un determinado dibujo o insertar una malla. De acuerdo con su procedimiento de fabricación el vidrio plano puede clasificarse de la siguiente manera como se muestra en la Tabla 3.3 Procedimientos de fabricación de Vidrio Plano:

Procedimiento	Tipo de Vidrio	Sistema
Soplado a boca	Coronas,manchones	Lubber, Sievert
Soplado-Estirado Mecánico	Manchones	Lubber, Sievert
Estirado mecánico	Lámina continua	Colburn- Libbey,Owens,Fourcalt,Pitsburgh
Laminado discontinuo	Lámina discontinua	Bicheroux
Laminado continuo	Lámina continua, impresa, armada o pulida	Boudin,Ford, (D.P.C),(twin), (Duplex),(Jstant)
Flotado	Lámina continua Pulida	Pikington

Tabla 3.3 Procedimientos de fabricación de Vidrio Plano³

3.3.3. Procesos Secundarios y de Acabado

Una vez realizadas las operaciones de formado, los objetos de vidrio obtenidos, pueden pasar a través de una serie de procesos secundarios y de acabados, entre los cuales se cuenta.

- Requemado.

Ciertos productos se someten a esta operación, destinada a eliminar rebordes cortantes de vidrio, utilizándose para ello un combustible gaseoso. El consumo energético es elevado, ya que normalmente esta operación se efectúa en atmósfera abierta.

- Recocido.

El proceso de recocido es utilizado para liberar las tensiones internas del material que causa una extrema fragilidad del producto, que se producen debido al rápido e irregular enfriamiento de la pieza de vidrio durante la operación de formado.

³ Fuente: www6.uniovi.es

Para ello la pieza es vuelta a calentar y luego enfriada lentamente.

La operación se realiza para ello en un horno túnel de recocido, que consiste básicamente en una serie de quemadores dispuestos en un horno largo, a través del cual son llevadas las piezas de vidrio.

- Templado.

Es un tratamiento térmico que permite fortalecer la pieza de vidrio

- Pintado.

Además de su función decorativa, el pintado es utilizado para darle al vidrio nuevas propiedades físicas, químicas y ópticas.

- Decorado

La operación de decorado puede incluir un trabajo mecánico sobre la pieza de vidrio, lo que se hace sacando o añadiendo material de su superficie. También se puede deformar la pieza tras un calentamiento previo.

La mayor parte de las operaciones descritas son comunes para los diferentes tipos de vidrio. No obstante, hay productos que no necesitan pasar por alguna de las fases mencionadas, y que son sometidos a operaciones diferentes.

3.4. Hornos de fusión

Los hornos industriales son equipos utilizados en la industria para calentar o fundir materiales y piezas que se colocan en su interior para ser llevados a una temperatura por encima de la temperatura ambiente.

La manera correcta de la elección de un horno para alguna aplicación determinada se debe a varios factores que se agrupan en los siguientes criterios:

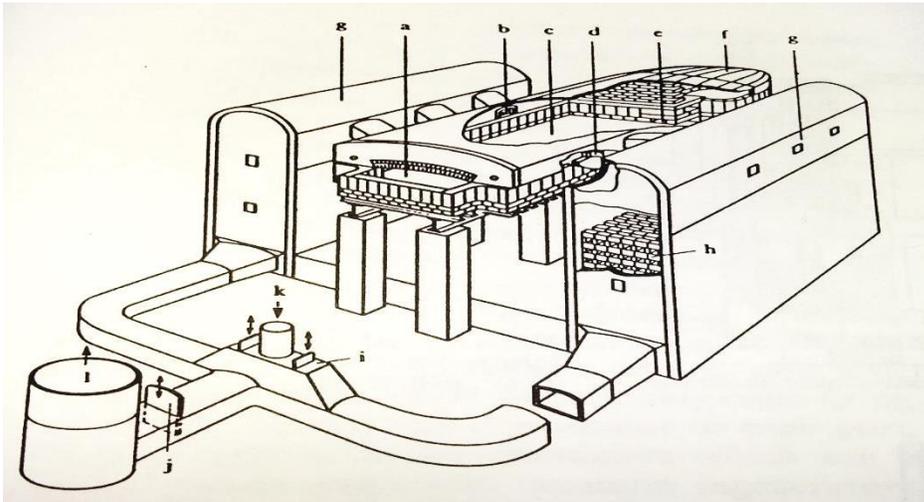
- Requerimiento de acuerdo al proceso
- Posibilidades tecnológicas
- Exigencias técnicas (carga, tratamiento y producción)

El objeto de la utilización de los hornos puede ser tan variado como de procesos se trate, por ejemplo:

- Pre calentamiento de reactantes
- Llegar a una temperatura necesaria para llevar a cabo ciertas reacciones químicas necesarias para obtener un determinado producto.
- Cambios de estado
- Tratamiento térmico
- Recubrimiento

3.4.1. Elementos generales que componen un horno para fundir vidrio

Figura 3.7 Horno tipo Side Port⁴



En relación al total de la producción industrial de vidrio, la producción de envases de vidrio forma la mayor parte de esta producción. En general, la solución más económica ha sido utilizar un tanque con regenerador calentado con una garganta y con quemadores que disparan a través del extremo de fusión dando una flama larga ver Figura 3.7.

El índice de fusión del depósito de envases vidrio ha aumentado la velocidad de producción de las máquinas de conformación. Se requieren tiradas de 100-300 toneladas/día y se cumple un índice de fusión entre 1 y 3 t/m²d. Los cambios en los programas de producción son a menudo necesarios para que el tanque sea flexible en lo que respecta al índice de

⁴ Fuente: Wolfgang Trier. Glass Furnaces. Design Construction and Operation. 1986

fusión; así las variaciones de 50 a 100% en la demanda de vidrio dentro de una semana sean ajustadas sin dificultad.

La relación temperatura-viscosidad es importante para el proceso de conformado, el cual es monitoreado a través de ciertos puntos de referencia de temperatura-viscosidad específicos. En general, los requisitos de calidad para el recipiente de vidrio no son demasiado estrictos; el aspecto más importante es el costo de producción. Dado que la energía representa la mayor parte del costo total, se hace hincapié en el funcionamiento de hornos con bajo consumo de 400-5400 kJ/kg de vidrio. Esto se logra mediante una combinación de alta velocidad de fusión específica, separación de los extremos de fusión y de trabajo final a través de una o más gargantas hundidas, aislamiento térmico extenso del horno y alta temperatura de precalentamiento del aire. Los tanques de contenedores ahora alcanzan una duración de campaña de 6 a 8 años y la tasa de fusión total la campaña es de 5000-8000 toneladas de vidrio/m² de área de fusión.

Los requisitos para los refractarios de los tanques dependen en gran medida de las condiciones de funcionamiento, pero en términos del tonelaje total de vidrio fundido durante la campaña se habrían utilizado las siguientes cantidades de refractarios: (AZS) 0.5-1.0 kg de refractario/t de vidrio, sílice 0.5-1.5 kg, magnesita y similares para el embalaje del regenerador 1-3 kg, y arcilla de 0.5-1.5 kg. La construcción de acero del horno soporta aproximadamente, 0.6 kg de acero/ tonelada de vidrio.

3.4.2. Zona de fusión

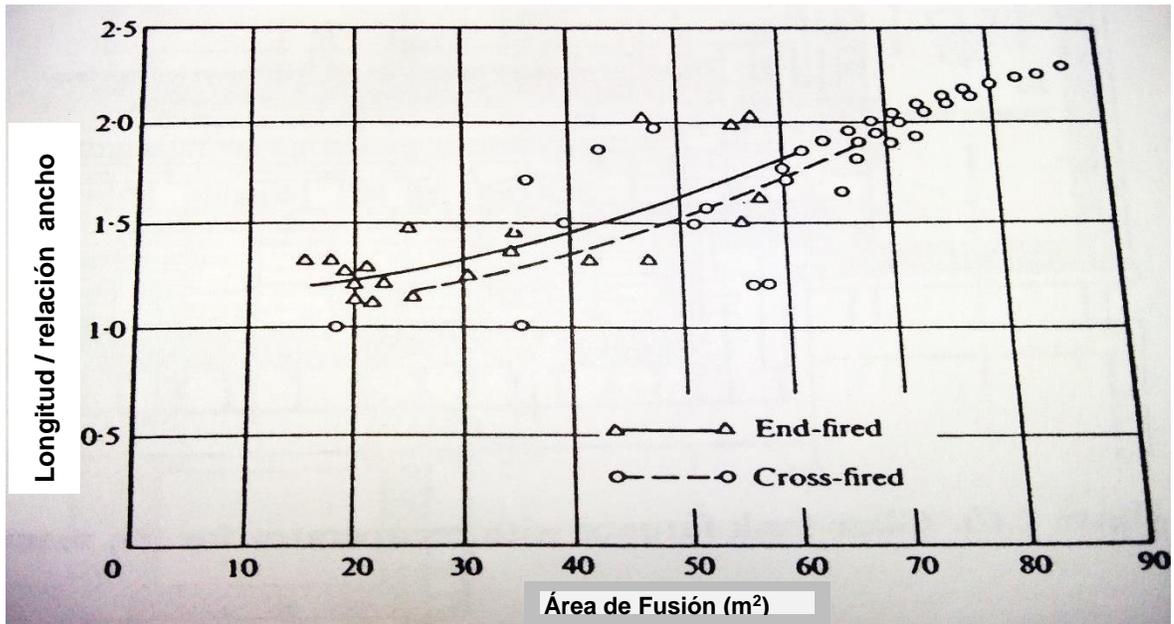
Las zonas de fusión y refinación se refieren generalmente como área de fusión y en cualquier tanque particular esto dependerá de la velocidad de fusión requerida así como la velocidad de fusión específica: Las velocidades de fusión específicas de corriente están entre 1 y 3 toneladas/m²día. Los valores reales dependen de la intensidad de calentamiento y por tanto de la temperatura de funcionamiento del horno que está a su vez, relacionada con el tipo de vidrio que se funde y sus requerimientos de calidad así como el control de la alimentación por lotes y de las corrientes térmicas en el cristal.

Dichos contenedores tienen áreas de fusión en el rango de 50-100 m², los tanques para vidrio plano tienen áreas de 150-300 m² pero, debido al número de vidrios especiales, la gama de estos tanques es particularmente grande, siendo de 5 a 80 m² de la alimentación por lotes .

Usando diseños actuales del puerto y quemador estándar, el método de calentamiento debe ser tal que asegure la combustión completa de la flama. El valor más bajo para el ancho de los hornos de flama cruzada es de 4.5 m mientras que, excepto para algunas aplicaciones especiales, el valor más alto es de aproximadamente 12 m, se rige por la carga estructural de la bóveda y los problemas de control del largo de las flamas.

El rango usual de las relaciones de longitud a ancho para las áreas de fusión de la flama en forma de U y los tanques cruzados puede determinarse a partir de la Figura 3.8.

Figura 3.8 Relación entre el área de fusión y la relación entre la longitud y la anchura (flama en forma de U) para flamas transversales y en puerto trasero.



Fuente: Wolfgang Trier. Glass Furnaces. Design Construction and Operation. 1986

que muestra que en los tanques pequeños, usualmente los disparos con flamas tipo herradura, tienen una proporción de aproximadamente 1-3 en (m) mientras que los tanques más grandes, flamas cruzadas en la mayoría de los casos, alcanzan porciones de más de 2. Los tanques de vidrio flotante alcanzan valores por encima de 3 m, porque esta

es la única manera por la cual se puede obtener un área de fusión suficiente dentro de los límites de anchura permitidos.

La flama cruzada constante disparada desde ambos lados se basa normalmente en quemadores que dan llamas cortas y la relación longitud-anchura es como es el caso de los hornos "Unit melter".

Los tanques con gargantas pueden ser más cortos que los tanques sin gargantas ya que la zona de refinado no tiene que extenderse a la zona de acondicionamiento para conseguir la reducción de temperatura necesaria para el trabajo. Los tanques de vidrio plano se construyen sin gargantas y en estos casos las zonas de fusión y refinación están separadas de la zona de acondicionamiento por una cintura, ya que cada una cumple un requisito técnico distinto.

3.4.3. Profundidad

La profundidad de las secciones de fusión y refinado tiene una fuerte influencia sobre la temperatura del fondo del tanque y las corrientes en el vidrio. Un segundo factor es la relación entre el volumen del vidrio en el tanque y el índice de fusión. Las pequeñas variaciones en el funcionamiento del horno o en la composición del lote tienen efectos adversos en los hornos pequeños con altos índices de fusión que en los grandes hornos. Sin embargo, un pequeño volumen de vidrio es una ventaja para el horno frecuentemente sometido a cambios de color. Los detalles descritos muestran que no hay una profundidad de vidrio óptima. Los factores de control son muchos y cada caso necesita ser examinado por sus propios méritos, pero se pueden dar directrices generales.

Dado que el color influye en la transmisión por infrarrojos, los depósitos para vidrios de colores son menos profundos que los de vidrio transparente. Las diferencias no son grandes ya que los tanques poco profundos que funden los cristales oscuros corren el riesgo de funcionar con corrientes de convección insuficientes, lo que conduce a una reducción de la velocidad de fusión de la parte inferior del lote.

Un aumento en la velocidad de fusión específica y el aumento asociado en la temperatura de la superestructura han conducido a un aumento del espesor del fondo del tanque para

controlar la velocidad de corrosión del suelo; esta tendencia se avanzó aún más aislando el fondo para reducir los costos de energía.

Las corrientes de convección afectan la eficiencia del combustible de diferentes maneras. Un aumento en las corrientes de convección conduce a un aumento en la tasa de fusión específica; Esto puede conducir a una reducción o incluso a un aumento en el consumo específico de combustible, dependiendo de las circunstancias de cada caso, y no es posible predecir, ni siquiera provisionalmente, lo que sucederá.

Las bajas temperaturas del fondo del tanque y las bajas velocidades de fusión pueden provocar que se formen capas de vidrio estancadas, lo que puede provocar desvitrificación.

3.4.4. Doghouse

Una extensión del tanque llamada doghouse se utiliza para recibir la hornada dependiendo del método de alimentación por lotes, puede ser pequeña o un poco más ancha.

En hornos de flama cruzada el doghouse está situado en los laterales. Un espacio grande y ancho permite que el lote sea alimentado como una capa delgada que es, desde el punto de vista térmico, la más favorable. Para hornos muy anchos, por ejemplo para hornos de vidrio flotado, se utilizan dos doghouse anchos para limitar el ancho de los arcos.

En hornos encendidos que funcionan con flamas en forma de “U”, el doghouse está situado al lado, ya que rara vez hay espacio entre los quemadores. Un doghouse puede ser insuficiente en hornos de alto rendimiento.

En comparación con los hornos de flama cruzada, el doghouse del tanque es relativamente estrecho porque un doghouse amplio puede dar una separación insuficiente de la sección de refinación del tanque.

Los bloques refractarios entre el doghouse y el tanque propiamente dicho están sujetos a mayores exigencias térmicas que los otros bloques, ya que la pérdida de calor hacia el exterior está muy restringida, y el uso de los bloques hexagonales aumenta la vida de los refractarios en esta posición. El uso de refractarios altamente resistentes a la corrosión ha producido la necesidad de bloques hexagonales y se utilizan ahora bloques de esquina cuadrados normales.

3.4.5. Superestructura

La función de la superestructura es sellar la cámara de combustión hacia arriba y hacia los lados, para permitir que el aire de combustión sea introducido para la combustión, para facilitar la eliminación de gases residuales y para lograr un buen contacto térmico entre las flamas y el vidrio.

3.4.6. Cámara de Combustión

La carga de la cámara de combustión para los hornos de combustión, expresada como la razón de energía suministrada por unidad de volumen de la cámara de combustión y el tiempo de la unidad, es 60-210 kW / m³. La energía introducida se considera en términos de las entalpías del combustible y del aire de combustión. La carga de los disparos cruzado es generalmente mayor que la de las flamas en forma de U.

La altura media de las cámaras de combustión aumenta con el área de fusión y se encuentra, a pesar de la amplia variación, entre 1 y 3 m.

La separación del combustible a lo largo de la longitud del tanque a través de múltiples puertos y la mejora relacionada en el control de las posiciones de las flamas conduce claramente a cámaras de combustión más pequeñas, pero hay una variación considerable en la práctica. La introducción de todo el combustible en un solo lugar (flama en forma de U) crea el problema de que, a medida que aumenta el área de fusión, debe haber un aumento correspondiente en la altura de la cámara de combustión.

3.4.7. Paredes Laterales

Las paredes laterales se construyen en la parte superior de los tanques, sólo en tanques muy pequeños o por razones especiales. El método normal es erigir paredes laterales en soportes de ángulo separados unidos a buckstays, lo que evita que las paredes laterales se hundan si los bloques de soporte se desgastan rápidamente y también permite añadir refractarios adicionales en el exterior de los bloques de tanque sin restricción.

Las paredes laterales, generalmente de 375 mm de espesor, están aisladas en el exterior para reducir la pérdida de calor y el esfuerzo térmico: la pérdida de calor de una pared aislada con una temperatura de cara caliente de 1550 ° C oscila entre 2.2 a 3.5 kW / m².

3.4.8. Bóveda

La función de la bóveda es cubrir los extremos de fusión y de trabajo y las cámaras de regeneración. Son una estructura apoyada y las bóvedas suspendidas se utilizan solamente en casos excepcionales cerca del doghouse. La altura de la bóveda determina el tamaño de la cámara de combustión. El tamaño del radio y el palmo de una bóveda son a menudo los mismos, lo que da un ángulo cerrado en el centro de 60° y el cuervo a menudo tienen un aumento del 13%, las cámaras de regeneración bóvedas a menudo tienen un aumento de 12-16%.

Las bóvedas autosoportables deben diseñarse y construirse de forma que se creen únicamente fuerzas de compresión y se evite una presión excesiva en los bordes. No se debe sobrepasar la resistencia específica máxima permitida de los bloques refractarios utilizados, no sólo cuando la bóveda está fría, sino también durante el calentamiento y cuando la bóveda está caliente. Los cálculos se rigen por la teoría de las estructuras.

3.4.9. Garganta

En los depósitos para vidrio de envase o vidrios especiales, el extremo de fusión está conectado al extremo de trabajo por una garganta cuya función principal es acomodar la diferencia de temperatura relativamente grande entre estas secciones en un cortocircuito en una corta distancia y, al mismo tiempo, formar una separación física entre ellos. A medida que se calienta desde arriba, el cuerpo del vidrio presenta un gradiente de temperatura que depende principalmente del color del vidrio. La temperatura del vidrio que fluye hacia el extremo de trabajo depende de la profundidad y posición de la garganta.

Por razones energéticas y para mantener el flujo en la garganta al mínimo para una tasa de fusión dada, el diseño de la garganta tiene como objetivo minimizar la corriente de retorno de vidrio desde el extremo de trabajo hasta el extremo de fusión.

Para los cristales oscuros, y su disminución de la temperatura asociados grandes con la profundidad del vidrio, estos requisitos son satisfechos por una garganta recta a la misma profundidad que el extremo de fusión. Después de pasar a través de la garganta normalmente hay un paso porque el extremo de trabajo es normalmente más corto que el extremo de fusión.

La profundidad obtenida con una garganta recta no es suficiente para las gafas transparentes y es normal usar una garganta hundida. La Figura 3.10 muestra ambos tipos de construcción de garganta. Las secciones transversales de la garganta en la dirección del flujo generalmente tienen una relación de altura a anchura de 1: 2 y están entre 0-1 y 0-3 m², siendo los valores más pequeños para vidrios claros y los más grandes para los cristales coloreados. Ignorando posibles corrientes de retorno, esto conduce a caudales medios de 5-20 m / h. En casi todos los casos sólo hay una garganta; la literatura descubre tanques con dos o más gargantas pero han permanecido excepcionales ya que la construcción es muy costosa y las ventajas que ofrecen, que en todo caso están discusión, no justifican la inversión.

La garganta es una de las partes más críticas del tanque; Su funcionamiento correcto gobierna decisivamente el funcionamiento eficiente de la planta, así como la calidad del vidrio y la duración de la campaña del horno. La regla es seleccionar los mejores materiales posibles y ejercer gran cuidado durante el montaje. Dado que las juntas horizontales siempre constituyen fuentes de problemas, es usual usar bloques de cara que llegan hasta la garganta del borde superior. Para gargantas muy profundas, los bloques de tapa se encuentran debajo de los bloques de revestimiento y suelen colocarse en pares. Figura 3.9. La superficie del bloque adyacente debe ser molida con cuidado para lograr el máximo cierre de la junta. Normalmente se utilizan bloques fundidos de fusión sin huecos. Si las dimensiones de bloque disponibles lo permiten, los bloques de revestimiento deben llegar hasta el borde superior de la garganta para evitar los problemas inherentes a las juntas horizontales.

Dado que el vidrio fundido ataca fuertemente los bloques colocados horizontalmente mediante la perforación se ha sugerido que el techo de la garganta podría tener una pendiente ascendente en la dirección del flujo de vidrio para que las burbujas de gas puedan ser arrastradas; Sin embargo, esto sólo se logra si la pendiente es superior a 15 ° y las superficies de los bloques son lisas. El ajuste de la garganta hacia el extremo de trabajo lo elimina de las zonas de alta radiación en la fusión y prolonga la vida útil de esta parte crítica del horno. El diseño de la garganta rebajada, que se ha demostrado para hornos de tanques más pequeños, se puede ver en la figura 3.13

Figura 3.9 Ejemplo de construcción de gargantas⁵

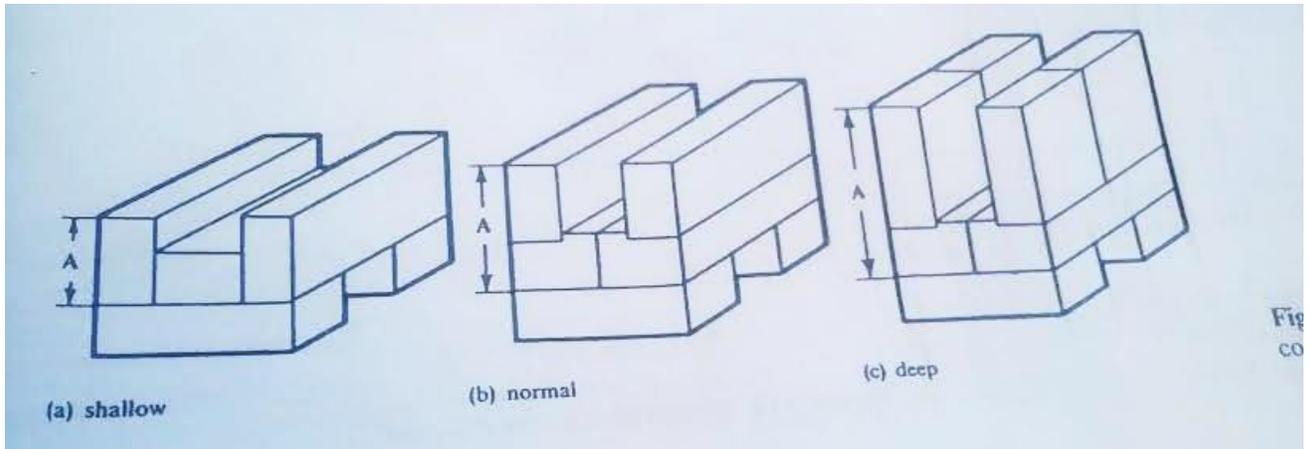
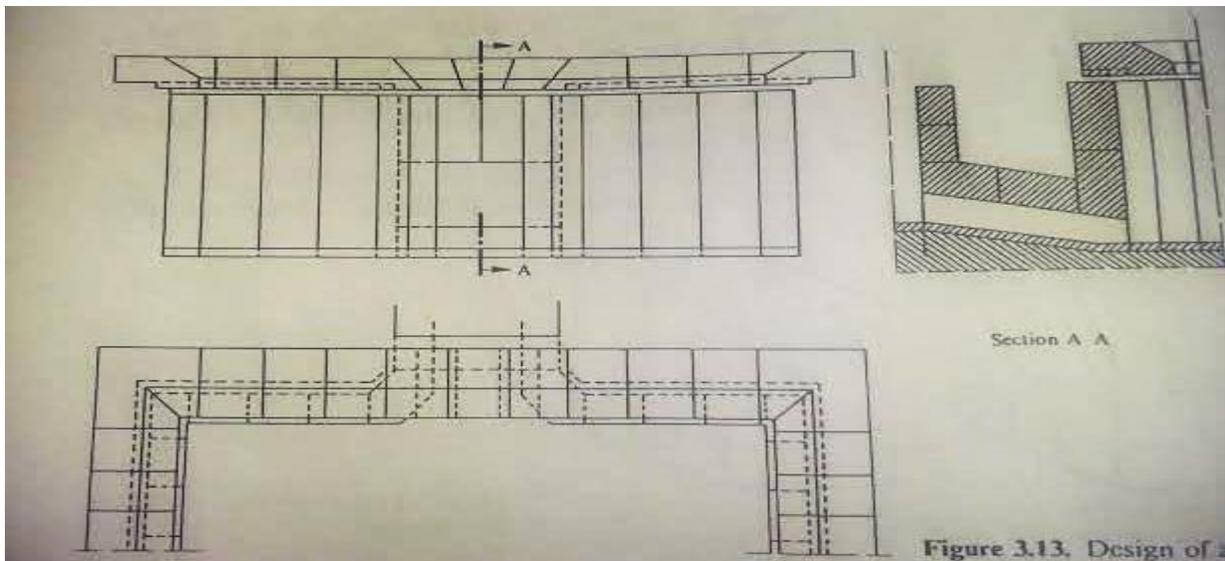


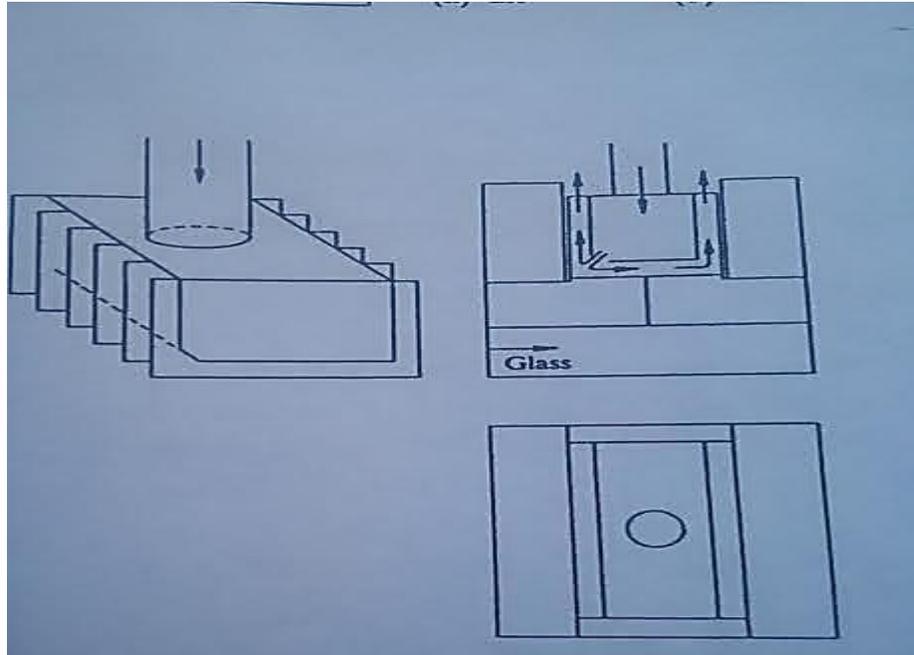
Figura 3.10 Diseño del empotrado de la garganta⁶



La pared extrema de la superestructura debe asegurarse en el área de la garganta mediante un arco pequeño adecuado.

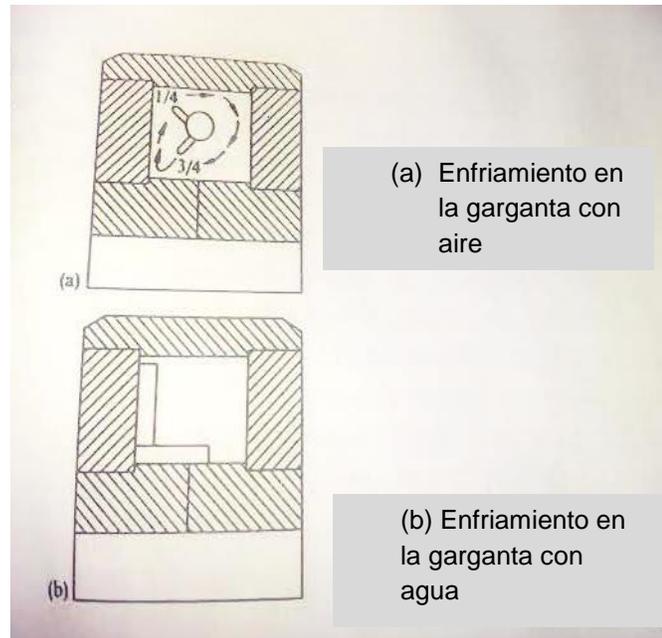
⁵ Fuente: Wolfgang Trier. Glass Furnaces. Design Construction and Operation. 1986

⁶ Fuente: Wolfgang Trier. Glass Furnaces. Design Construction and Operation. 1986

Figura 3.11 Enfriamiento mejorado por aire⁸

Las gargantas deben ser enfriadas intensamente para mantener la corrosión dentro de límites aceptables; Esto se hace generalmente mediante aire se debe poner especial atención al flujo de aire adentro y hacia fuera. La disposición mostrada en la Figura 3.11 es muy eficaz pero tiene el inconveniente de que ya no se pueden observar las superficies del bloque.

⁸ Fuente: Wolfgang Trier. Glass Furnaces. Design Construction and Operation. 1986

Figura 3.12 Enfriamiento en la garganta⁹

Desde este punto de vista, la disposición de toberas de enfriamiento mostrada en la Figura 3.12 es mejor. La refrigeración por agua se utiliza raramente, ya que el buen contacto térmico entre las cajas de enfriamiento y los bloqueos de la garganta son difíciles de lograr. El enfriamiento de la garganta generalmente opera a corrientes de aire de $3-5 \text{ m}^3 / \text{s}$ a una presión de 6-10 mbar.

3.5. Tipos de hornos utilizados en la industria vidriera

3.5.1. Hornos de Fusión

Atendiendo a la forma, modo de operación del horno y tipo de energía utilizada, puede establecerse la siguiente clasificación:

- a. Hornos de Crisol
- b. Hornos de Cuba convencionales.
- c. Hornos Unit Melter.
- d. Hornos de fusión combinada.

⁹ Fuente: Wolfgang Trier. Glass Furnaces. Design Construction and Operation. 1986

3.5.2. Horno Tipo Crisol

Un horno de crisoles consta de una sección inferior para precalentar el aire de combustión y una sección superior que contiene los crisoles y actúa como cámara de fusión.

Son de forma circular (la flama suele ser vertical y no tienen sistemas de recuperación) o rectangular de diferentes capacidades (la flama es horizontal y suelen tener cámaras regenerativas).

El ciclo típico comienza con la carga a mano de las piezas y un calentamiento hasta que vitrifica parcialmente la carga; entonces se añade una segunda y a veces una tercera carga. Cuando está completamente fundida se produce el afinado, después del cual disminuye el flujo de combustible (o bien se corta), permitiendo que el vidrio se enfríe a la temperatura de trabajo.

En estos hornos puede utilizarse cualquier combustible.

Son frecuentes en pequeñas producciones por día (<20 ton/día) o para ciertos tipos de vidrios, tienen un consumo específico de energía muy elevado. Ello es debido a los siguientes factores:

- Operación discontinua
- La fusión requiere en la práctica tiempos muy largos, dado que se produce gradualmente desde el exterior de las paredes de la vasija hacia el interior de la carga.
- Ausencia frecuente de sistemas de recuperación del calor sensible de los humos.

Los hornos de crisol son utilizados donde los artículos de vidrio son formados manualmente o por soplado a boca.

Un crisol tiene una vida útil de cerca de 30 ciclos pudiendo reducir entre 18 y 21 toneladas de vidrio.

3.5.3. Hornos de Cuba Convencionales

Estos hornos, normalmente son de forma rectangular, estando la carga fundida en su interior. Pueden ser intermitentes o continuos.

- **Intermitentes.** La operación de los hornos intermitentes es similar al tipo de los de crisol, siendo idénticos sus periodos de funcionamiento. Su capacidad varía de 1 a 10 ton. Aunque el consumo de combustible es similar o ligeramente inferior, la menor fragilidad del recipiente puede considerarse como una ventaja.
- **Continuos.** Estos hornos son similares a los anteriores. Están Formados por una cuba donde se contiene el vidrio fundido y una cámara de combustión por encima del baño, donde se produce la flama que calienta la carga. Pueden distinguirse dos partes: zona de fusión y zona de trabajo; ambas están comunicadas normalmente mediante una garganta.

Según el procedimiento utilizado para precalentar el aire secundario de combustión, puede establecerse la siguiente clasificación de hornos de cuba convencionales:

3.5.4. Hornos con Recuperadores

Los recuperadores son intercambiadores de calor en los cuales los gases de combustión y el aire secundario de combustión circulan en paralelo o a contracorriente, en circuitos de tubos cerámicos o metálicos.

La temperatura del aire secundario de combustión a la salida de los intercambiadores, oscila entre 650 y 850°C. Por su parte, la de los gases calientes al abandonar el equipo de recuperación de calor se sitúa entre 700 y 950°C.

La capacidad de fusión específica (por unidad de superficie) de los hornos recuperativos es un 30% inferior a la de un horno regenerativo. Los quemadores están situados a ambos lados del horno, transversales al flujo de vidrio y queman continuamente desde ambos lados, permitiendo un mejor control y temperaturas más estables.

Este tipo de horno se utiliza principalmente en la producción de vidrio hueco y filamento continuo. Es más adecuado para las instalaciones de pequeña capacidad, aunque no es raro hallar hornos de mayor capacidad (hasta 200 toneladas diarias), y para la producción de vidrios de calidad elevada.

3.5.5. Hornos con Regeneradores

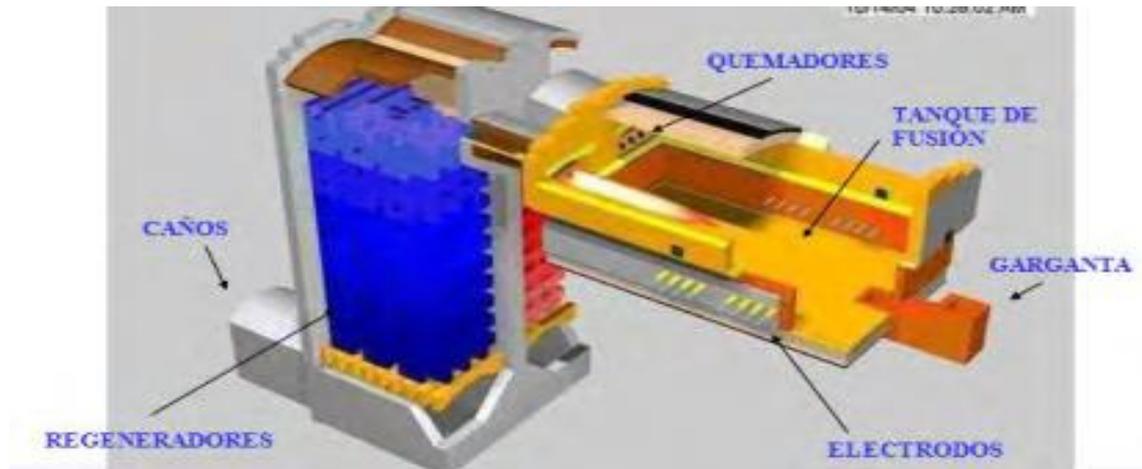
Existen dos tipos de hornos con regeneradores, según la forma de la flama:

- **Hornos con Sistema Regenerativo Tipo End Port..** Estos son más pequeños poseen únicamente dos pórticos ubicados en la pared posterior. La boca alimentación está en posición lateral. En cada pórtico hay un quemador cuya flama hace un recorrido de “U” o bucle de ida y vuelta, saliendo por el otro pórtico hacia la cámara de regeneración respectiva.

Cuentan con 8 quemadores ubicados en la parte de atrás del fundidor bajo la salida de aire precalentado proveniente del regenerador, donde la flama es paralela al flujo de vidrio.

Operan con gas natural y además están provistos de boosting eléctrico lo que permite incrementar la capacidad de fundición y controlar la temperatura del fondo del horno.

Figura 3.13 Diagrama de Horno tipo End-Port¹⁰



Se emplea en los procesos de fabricación de vidrio hueco, vidrio prensado, y vidrios colados, para superficies de fusión a 20 a 80 m².

Hornos con Cámara de Regeneración Tipo Side Port.

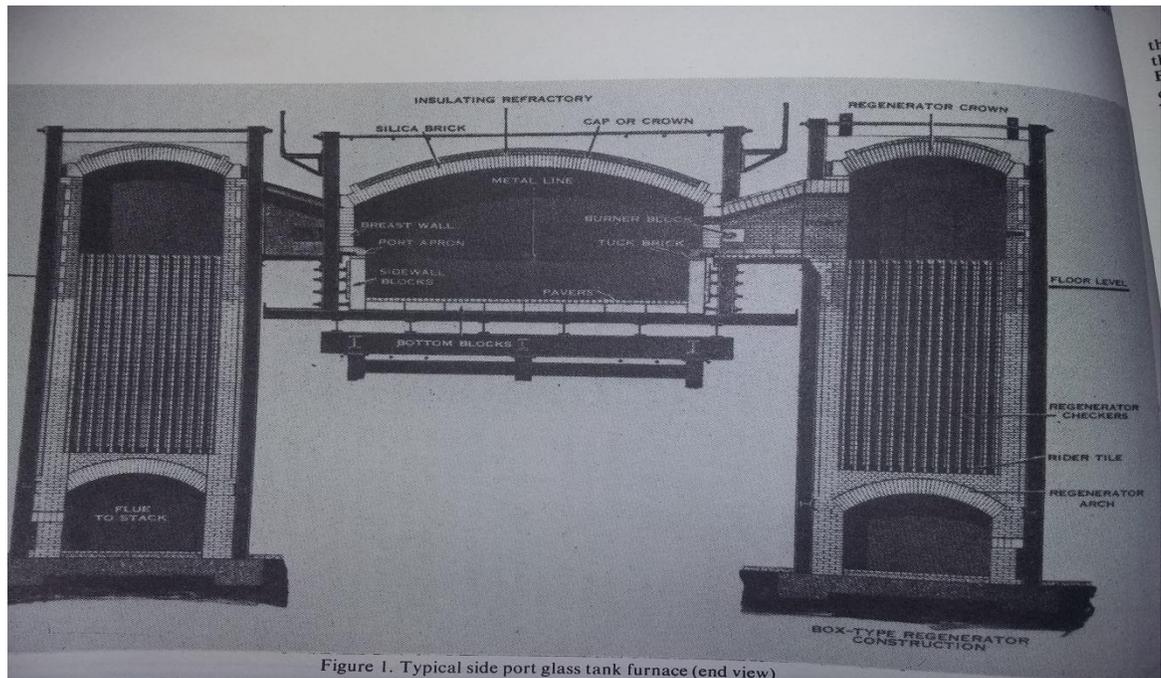
¹⁰ Richard Fernando Mendoza Gómez. Tesis. Determinación de la eficiencia del aislante del regenerador del horno “D” de la planta O-I Los Guayos. 2010

Un horno tipo tanque del tipo Side Port se muestra en la Figura 3.14 en elevación transversal; y en la Figura 3.15 en elevación longitudinal transversal.

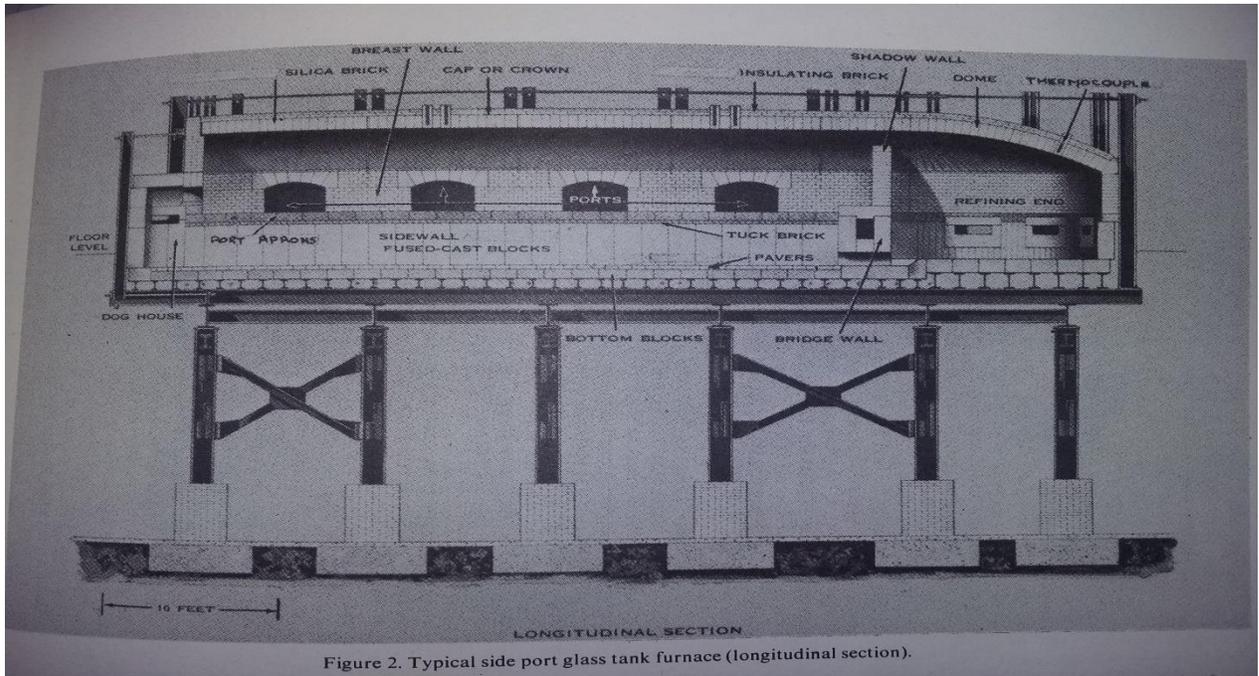
En los modelos más antiguos, la bóveda de la cámara del regenerador se sitúa por debajo del nivel de puerto de piso, y la toma del puerto conecta cada puerto con la bóveda del regenerador

La ventaja de este tipo de hornos es que permite colocar más checkers en la cámara del regenerador y tiene una construcción más sencilla de la bóveda. En otras palabras, permite una mayor eficiencia y una mayor temperatura de flama.

Figura 3.14 Tanque de horno típico puertos laterales (vista desde un extremo) ¹¹



¹¹ Alex G. Pincus. Ceramics Department, Rutgers University. Melting Furnace Design in the Glass Industry.

Figura 3.15 Tanque de horno típico puertos laterales (sección longitudinal).¹²

Los quemadores, entre 4 y 6 por cada lado, son regulables de forma independiente y están dispuestos lateralmente. El sentido de las flamas es perpendicular al de la circulación del vidrio (quemadores transversales).

El sistema de recuperación de calor está formado por dos apilamientos de piezas refractarias (regeneradores) que se calientan alternativamente con los gases de combustión provenientes del horno. Mientras que una cámara está siendo calentada por los gases, la otra precalienta el aire de combustión.

Después de un periodo predeterminado (20-30 minutos) se invierte el ciclo de calentamiento y el aire de combustión se pasa a través de la cámara previamente calentada por los gases residuales. Presentes en producciones de 350 t/día.

La temperatura más alta en el fusor oscila entre 1568°C y 1605°C. Por lo general, el límite de seguridad se determina por el vidrio en particular y el punto de reblandecimiento de la bóveda de sílice que se ablanda y gotea a partir de 1620°C. La razón para usar siempre sílice en el techo sobre el vidrio, en lugar de un material más resistente que el sílice, además de ser resistente a la temperatura, es aquel en el que los productos de corrosión

¹² Alex G. Pincus. Ceramics Department, Rutgers University. Melting Furnace Design in the Glass Industry.

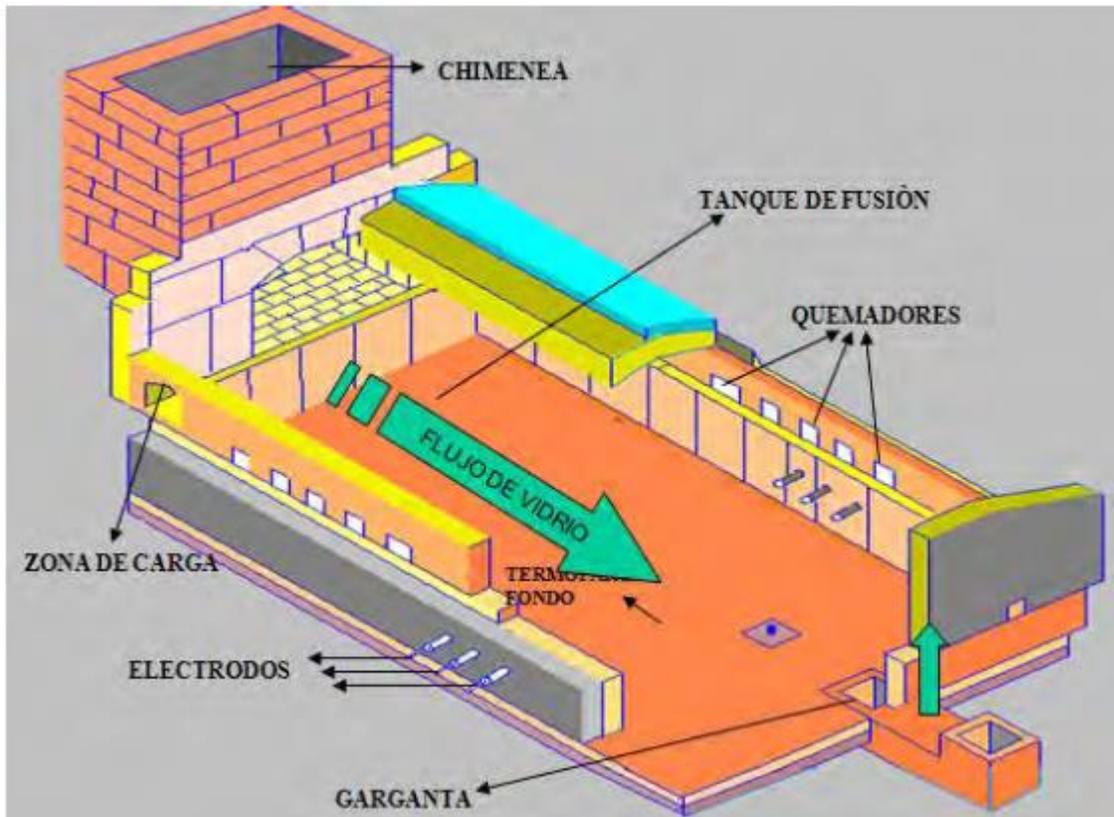
son compatibles con el vidrio, mientras que los otros materiales son más propensos producir piedras insolubles y otras inclusiones.

La viabilidad económica de estos hornos tiene un límite máximo de capacidad, que depende del costo de la electricidad en comparación con los combustibles fósiles.

Este tipo de horno se utiliza principalmente en la producción de Lananas minerales (lanas de vidrio), vidrio doméstico (muy común sobre todo en el caso del vidrio al plomo y del vidrio opal), y vidrio para propósitos ópticos

3.5.6. Hornos de Fusión tipo UNIT-MELTER

En este tipo de hornos los quemadores se ubican en los laterales del horno, de manera perpendicular al flujo del vidrio y la flama es continua, son hornos de excelente control en el gradiente de temperatura, pero su eficiencia de combustión es baja al no poseer cámaras regeneradoras de calor, operan con gas natural y cuentan con boosting eléctrico el cual permite que se incremente la capacidad de fundición y control de temperatura del horno.

Figura 3.16 Diagrama de Horno tipo Unit-Melter¹³

3.5.7. Hornos de Fusión Combinada

La fusión combinada por medio de combustibles fósiles y electricidad puede adoptar dos formas: fusión principal con combustible fósil y sobrealimentación eléctrica; o fusión principalmente eléctrica apoyada en un combustible fósil. La sobrealimentación eléctrica es una forma de aumentar el calor en el horno haciendo pasar una corriente eléctrica por los electrodos situados en el fondo del tanque. Una técnica menos común es utilizar gas o petróleo como combustible de apoyo en un horno calentado principalmente con electricidad.

¹³ Fuente: Tesis. Determinación de la eficiencia del regenerador aislante del Horno "D" de la planta O-I Los Guayos. 2010. Richard Fernando Mendoza Gómez

3.5.8. Hornos de Recocido y temple

Estos se construyen íntegramente de metal con aislamientos, dividiéndose su longitud en tres secciones principales:

- Un número de zonas destinadas a calentar el producto de modo uniforme por encima de la temperatura superior de recocido (560°C aproximadamente), y mantenerlos un cierto tiempo a esa temperatura con objeto de eliminar las tensiones internas.
- Zonas de enfriamiento lento, destinadas a evitar la creación de nuevas tensiones.
- Zonas de enfriamiento rápido, a partir de una temperatura algo inferior a la temperatura inferior de recocido, para que la carga pueda ser llevada a la zona de descarga.

La combustión se realiza, bien con gas directamente, bien instalando tubos radiantes. En ciertos hornos se utiliza energía eléctrica, con fines térmicos, en lugar de combustibles.

3.5.9. Hornos de Oxidación

La oxidación implica la sustitución del aire de combustión por oxígeno (con una pureza superior al 90%). Al eliminar la mayor parte del nitrógeno de la atmósfera de combustión se reduce el volumen de los gases de escape en dos terceras partes. Por lo tanto, es posible ahorrar energía porque no es necesario calentar el nitrógeno atmosférico a la temperatura de flama.

También se evita en gran medida la formación de NO_x térmicos. En general, los hornos de oxidación tienen el mismo diseño que los hornos recuperativos, con varios quemadores laterales y una sola chimenea de escape de gases. Sin embargo, los hornos son diseñados para este tipo de combustión no utilizan sistemas de recuperación de calor para precalentar el oxígeno suministrado a los quemadores.

Capítulo 2 Combustión con Oxígeno

2.1	Introducción.....	73
2.2	Técnicas de combustión mejorada.....	74
2.3	Teoría de la Oxidación.....	74
2.4	Formas de aplicación de oxígeno en sistemas de combustión.....	75
2.4.1	Enriquecimiento Simple ⁽¹⁾	76
2.4.2	Enriquecimiento con lanza ^{(2) (3) (4)}	77
2.4.3	Oxy-boosting ⁽⁴⁾	78
2.4.4	All Oxy Fuel (AOF) ^{(2) (3) (4)}	81
2.5	Aplicación en la Industria del Vidrio ⁽⁴⁾	82
	Oxígeno para la producción del Vidrio.....	82
	Pulido del Vidrio.....	83
	Oxidación “Flameless”.....	84
2.6	Ventajas de la combustión con oxígeno.....	85
	Procesos de Alta Temperatura.....	85
2.7	Eficiencia Térmica.....	86
2.8	Significado de aumentar la eficiencia de combustión.....	87
2.8.1	Flexibilidad.....	89
2.8.2	Ambiental.....	89
2.9	Tipos de quemadores.....	90
2.9.1	Quemadores.....	90
2.9.1.1	Quemadores de Combustibles sólidos.....	90
2.9.1.2	Quemadores de combustibles líquidos.....	91
2.9.1.3	Quemadores de Combustibles Gaseosos.....	91
2.9.1.4	Quemadores de Premezcla.....	91
2.9.1.5	Manifold de quemadores o puertos pequeños.....	92
2.9.1.6	Quemadores a presión.....	92
2.9.1.7	Tipos de Pre-Mezcladores.....	92
2.9.1.8	Quemadores a Gas de Mezcla en la boquilla.....	93
2.9.1.9	Quemadores Convencionales.....	94
2.9.1.10	Quemadores Duales.....	94
2.9.1.11	Tableros Típicos.....	95

Índice de figuras

Figura 2.1 Aplicación con quemadores Oxygas	75
Figura 2.2 Enriquecimiento Simple.....	76
Figura 2.3 Equipo de lanza de oxígeno	77
Figura 2.4 Enriquecimiento con lanza	78
Figura 2.5 Aplicación de Boosting en un horno tipo End Port.....	80
Figura 2.6 Aplicación de Boosting en un horno tipo Unit Melter	80
Figura 2.7 Aplicación de AOF en un horno tipo Unit Melter	82
Figura 2.8 Pulido mediante un quemador de oxígeno	83
Figura 2.9 Cristales y vidrios de plomo y cuarzo pulidos con flama de oxígeno.....	84
Figura 2.10 Distribución de la temperatura en la cámara de combustión durante la combustión oxi-gas en modo flameless. La temperatura del horno es de 1200°C.	85
Figura 2.11 Influencia de la temperatura del aire de combustión y la concentración de oxígeno en la eficiencia de la combustión.....	88
Figura 2.12 Comparativo de Emisiones para combustión con Aire vs Oxígeno	90

Capítulo 4

Eficiencia Energética en Hornos de Fusión de Vidrio

<<Si pude mirar lejos, fue porque me subí en hombros de gigantes >>

Isaac Newton

4.1 Introducción

La cantidad de energía empleada para la producción de vidrio depende de varios factores, entre ellos se encuentran las materias primas utilizadas, el tipo de vidrio, la clase de producto, los equipos empleados, y la forma de operación ya sea continuo o discontinuo. Cualquiera que sea el caso, el consumo de energía es importante; debido a factores como:

- Temperatura de fusión-afinado elevada (1500°C-1600°C).
- En la actualidad, se consiguen valores máximos del rendimiento global del horno con recuperación de calor, similares al 50% para ciertos hornos regeneradores y flamas
- Valores normales se sitúan entre un 25 y un 40%.
- En hornos pequeños tipo crisol, este valor es inferior al 5%.
- Los hornos de tipo eléctrico son quienes aportan mayor eficiencia del 60-85%, pero que por motivos de costo de la energía eléctrica su utilización es muy limitada.
- Enfriamiento mal controlado.

Definitivamente, las pérdidas de calor inherentes a los procesos hoy en día utilizados, hacen que todavía se esté muy alejado aún del consumo teórico, por lo que se abre un área de oportunidad y por ende posibilidades de implementar nuevas tecnologías.

4.2 Eficiencia térmica en hornos¹

De acuerdo a la norma API STD 560: La eficiencia térmica (ET) corresponde al cociente entre el calor total entregado derivado de la combustión del combustible (PCI) incluyendo el calor sensible del combustible, el aire y el medio de atomización, expresado en porcentaje.

En el método directo, la eficiencia se expresa normalmente en forma de porcentaje:

La eficiencia se calcula mediante la siguiente Ecuación:

$$\eta = \frac{\text{Calor entregado al vidrio}}{\text{Calor suministrado por el combustible}} \times 100 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Método indirecto

En el método indirecto o de pérdidas, la eficiencia se calcula restándole a 100 el valor de las pérdidas de calor también se expresa como un porcentaje:

$$\text{Eficiencia} = (100 - \text{pérdidas})\% \quad (\text{Ec. 4.2})$$

4.2.1 Factores que determinan el consumo energético de los hornos de fusión de tipo continuo

4.2.1.1 Extracción Nominal

La extracción nominal se establece en base al tipo de color del vidrio que se quiere fabricar y a las necesidades del mercado, que está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Extracción nominal} = \frac{\text{Capacidad de producción} \left(\frac{\text{ton}}{\text{día}}\right)}{\text{Superficie de fusión} (m^2)} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

¹ Ahorro de energía en la industria del vidrio. Universidad Autónoma de Occidente. Consultado abril 2016

4.2.1.2 Factor de carga

El factor de carga es el cociente entre la extracción real del vidrio fundido y la nominal.

$$\text{Factor carga} = \frac{\text{Extracción nominal}}{\text{Extracción real}} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Los hornos se dimensionan para una determinada extracción nominal, el consumo específico aumenta.

4.2.1.3 Envejecimiento

En función del envejecimiento del horno el grosor de sus paredes va disminuyendo, con lo que las pérdidas a través de las mismas van aumentando. Además, llega un momento en el que se hace necesaria la refrigeración de la cuba, incrementándose, por tanto, las pérdidas caloríficas. Asimismo, la eficiencia de las cámaras de regeneración y de los recuperadores desciende con el tiempo, siendo este efecto más acusado en las primeras. En todo caso, el efecto del envejecimiento depende del aislamiento, y de si se mantiene con el tiempo o hay que quitarlo para no acelerar el desgaste.

4.2.1.4 Temperatura del aire secundario de combustión

Un aumento en la temperatura del aire de combustión supone una reducción de consumo energético, ya que le propio aire aporta calor al horno. Además, de este modo se incrementa la temperatura de flama, con lo cual se favorece la transferencia de calor al vidrio.

4.2.1.5 Relación aire/combustible

La proporción aire combustible tiene una notable influencia sobre el consumo de energía, ya que el aire en exceso supone una pérdida adicional de combustible. Ello es debido, por una parte, a que se incrementan las pérdidas de calor en gases de combustión, y por otra, a la reducción de la temperatura de flama.

4.2.1.6 Aislamiento

El aislamiento del horno permite reducir las pérdidas de calor, lo que literalmente se traduce a una reducción del consumo específico.

4.2.1.7 Porcentaje de cullet en la carga.

En medida en que dicho porcentaje aumente, el consumo específico disminuye. Las principales causas de esta reducción son:

- Calor de reacción y calor latente de fusión nulos.
- Temperatura de fusión del casco de vidrio menor.
- Volumen menor de gases de combustión, dado que las pérdidas al fuego se reducen.
- El cullet de vidrio acelera la relación entre los vitrificantes y los fundentes.

4.2.1.8 Otras mejoras.

El consumo energético en estos equipos es elevado, por tanto, con el objeto de reducir las necesidades de energía, citando así algunas de las mejoras:

- Enriquecimiento en oxígeno. La utilización de oxígeno para reemplazar parte del aire de combustión supone un ahorro energético; ello es debido a los siguientes factores:
 - Mayor temperatura de flama, lo que supone un aumento de la transferencia de calor al producto.
 - Menor Volumen de gases de combustión por unidad de combustible, lo que implica una reducción de calor perdido

4.3 Uso de oxígeno para mejorar la eficiencia energética

Las tecnologías de oxi-combustión, demuestran tener un bajo consumo de energía (MW/Ton de vidrio fabricado), siendo este efecto una de las principales razones para su uso.

La industria del vidrio está bajo restricciones de costos y crecientes presiones ambientales para reducir emisiones. Diversas mejoras tecnológicas se han implementado para dar solución a estos problemas.

Algunas de las técnicas empleadas son basadas principalmente en reducir emisiones de ciertos gases, por ejemplo, tratar gases que contengan amoniaco,

para obtener nitrógeno y agua, así como para reducir costos de producción mediante el ahorro de combustible.

A continuación, se muestran las siguientes:

- Modificación de la combustión
 - Oxi-combustión
 - Quemadores de bajo NOx
- Modificaciones al proceso
 - Calentamiento de reciclado
 - Hornos eléctricos

El aire enriquecido con oxígeno es una de las técnicas más prometedoras para incrementar la transferencia de calor en procesos de combustión. La utilización de aire enriquecido con oxígeno manifiesta como principales ventajas los ahorros de combustible hasta del 60%, las reducciones en las que las emisiones hasta un 90% y por ende incrementan la eficiencia energética.

4.4 Influencia del oxígeno sobre el incremento en la temperatura de flama

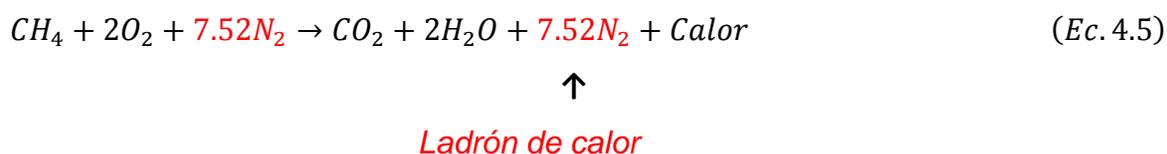
Si todo el calor generado por la combustión se ocupara en el calentamiento de la mezcla y de los productos de combustión, estos últimos se calentarían hasta llegar a una temperatura máxima, conocida como *la temperatura teórica de la flama (o temperatura de flama adiabática)*. La temperatura de flama es mayor cuando las pérdidas a los alrededores son mínimas. La adición de aire en exceso o combustible en exceso únicamente provee más material que absorbe el calor de combustión provocando que la temperatura de flama no pueda elevarse como una mezcla perfecta aire-combustible.

El calor generado por una reacción de combustión se distribuye de tres maneras:

- a) Calentamiento de los productos de la combustión y la mezcla inicial de aire-combustible.
- b) Calentamiento del medio por radiación.
- c) Calor que se pierde por disipación a los alrededores.

Existen varios factores que pueden hacer que se logre una mayor temperatura de flama como puede ser el precalentamiento del aire de combustión, y la utilización de oxígeno de elevada pureza en vez de aire. El suministro de oxígeno para la combustión usualmente proviene del aire y este contiene una gran cantidad de nitrógeno, por tanto el volumen requerido de aire es mucho mayor que el volumen de oxígeno. Este último no forma parte de la reacción de combustión, mas sin embargo acompaña la reacción durante todo el recorrido absorbiendo parte del calor de la reacción.

Combustión Aire-gas natural



Combustión Oxígeno-gas natural



La función del nitrógeno dentro de la reacción de combustión actúa como ladrón de calor ya que este se lleva gran parte de la energía producida. Al eliminar el nitrógeno aumenta radicalmente el aporte de calor destinado a fundir el material y con ello aumenta la eficiencia de la combustión.

Bajo condiciones estándar de temperatura 60 °F la utilización del oxígeno puro en operaciones de combustión da como resultado una temperatura de flama de 2827°C, mientras que para combustión con aire en las mismas condiciones la temperatura teórica de flama es de 1961°C, las cuales se muestran en el gráfico de la Figura 4.1 Comparación de algunas Temperaturas de Flama.

Cuando se emplea oxígeno en la combustión, la temperatura de flama es más alta, lo que favorece la eficiencia térmica. Los gases de combustión formados son menos, por lo que la cantidad de energía que arrastran consigo es menor en consecuencia, comparados con la combustión convencional con aire.

La eficiencia en un sistema de aire-gas es de un 35%, en cambio, para un sistema oxi-gas la eficiencia aumenta hasta un 80%.

Figura 4.1 Comparación de algunas Temperaturas de Flama

Observed flame temperature		Theoretical flame temperature		Fuel	Air (or O ₂) temp., F/C	Equivalence ratio
F	C	F	C			
		5630	3110	Acetylene in O ₂	(60/16)	—
		5385	2974	Hydrogen in O ₂	(60/16)	—
		5120	2827	Natural gas in O ₂	(60/16)	—
4207	2319	4770	2632	Acetylene	60/16	1.00
3812	2100	4475 ¹	2468	Carbon monoxide	60/16	1.00
4190	2310			Gasoline		
		4100	2260	Natural gas	1400/760	1.00
		4070	2243	Natural gas	1400/760	1.11 (rich)
3713	2045	4010 ¹	2210	Hydrogen	60/16	1.00
		4000	2204	Natural gas	1100/593	1.00
		3920	2160	Natural gas	900/482	1.00
		3800	2093	Natural gas	600/316	1.00
3155 ²	1735 ²	3610	1988	Coke oven gas	60/16	1.00
3416	1880	3560	1961	Natural gas	60/16	1.00
		3460	1904	Methane ³	60/16	1.00
		3400	1871	Methanol	60/16	1.00
				Natural gas	60/16	1.18 (rich)
		3300	1816	Natural gas	60/16	0.86 (lean)
		3010	1654	Producer gas	60/16	1.00
		3000	1649	Natural gas	60/16	1.49 (rich)
		2895	1591	Natural gas	60/16	0.70 (lean)
		2650	1454	Blast furnace gas	60/16	1.00

¹ Not corrected for dissociation.

² In an actual production furnace firing refractories.

³ Methane, ethane, propane, butane have theoretical flame temperatures in the 3484 F to 3583 F (1918 C to 1973 C) range; observed flame temperatures in 3416 F to 3497 F (1880 C to 1925 C) range.

Fuente: North American Combustion Handbook. 3ª. Ed., North American Mfg. Co., E U. A., 1986.

4.5 Balances de materia y energía.

Se parte del balance de energía mediante el cual se establece la cantidad de calor que entra al interior del horno es igual a la cantidad de calor que sale más la que se acumula. Siguiendo este principio se seleccionan los elementos que ganan o pierden calor.

Son muchas las situaciones cuando se investiga el consumo de energía en hornos de fusión de vidrio y esto puede proporcionar valiosa información que contribuye a mejorar el diseño y el método de funcionamiento o bien para hacer comparaciones sobre rendimientos en los que se modifican diversos factores.

4.5.1 Balance de materia en un sistema cerrado y abierto

Un sistema se define como una cantidad de materia o región en el espacio elegida para el análisis. La masa o la región fuera del sistema se conoce como alrededores. La superficie real o imaginaria que separa al sistema de sus alrededores se llama frontera. En términos matemáticos, la frontera tiene espesor 0 y, por lo tanto, no puede contener ninguna masa ni ocupar un volumen en el espacio.

Un sistema cerrado es un sistema físico que no interactúa con otros agentes físicos situados fuera de él y por tanto no está conectado casualmente ni relacionado con nada externo a él.

$$\text{Acumulación} = \text{entrada} - \text{salida}$$

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{i=1}^n n \text{ entrada} - \sum_{i=1}^n n \text{ salida}$$

Un sistema abierto es un sistema físico (o químico) que interactúa con otros agentes químicos, por lo tanto, está conectado correccionalmente con factores externos a él

Por definición, hay masa que atraviesa las fronteras de un sistema de proceso abierto a medida que éste ocurre. Para introducir masa al sistema es necesario

realizar un trabajo sobre el mismo y cuando emerge masa del sistema se lleva a cabo trabajo sobre los alrededores.

$$\begin{aligned} & \text{Entrada} = \text{Salida} \\ \frac{dm}{dt} &= \sum_{i=1}^n \dot{m} \text{ entrada} - \sum_{i=1}^n \dot{m} \text{ salida} \end{aligned}$$

4.5.1.1 Subdivisión de balances

El desarrollo de los balances requiere que los límites sean claros y establecidos entre el sistema que se debe estudiar y sus alrededores, a veces se refiere al esquema gráfico del sistema. Cuando esto se ha elaborado, entonces deben tenerse en cuenta que, para el equilibrio, toda la energía que fluye en cualquier dirección a través de ese límite debe ser medida y sólo así se puede medir con bastante precisión en los puntos específicos del balance.

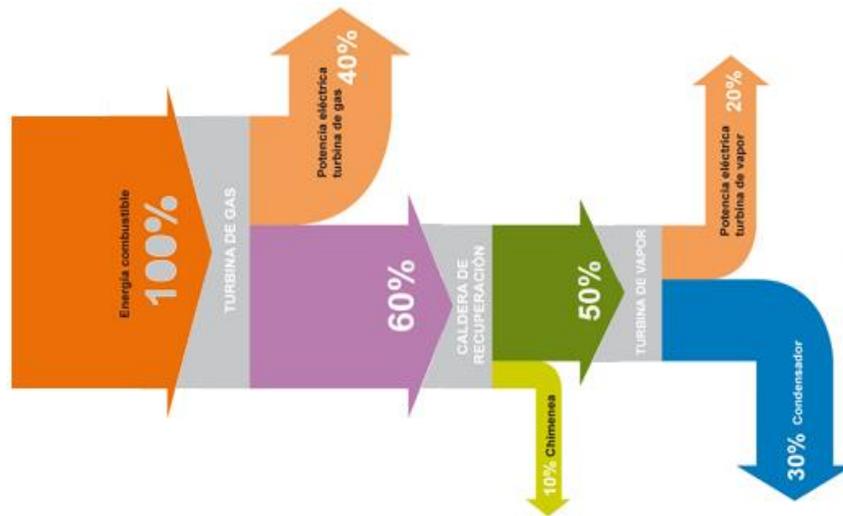
Además, los flujos de energía deben tener un valor paralelo en la práctica; Por ejemplo, si las pérdidas de calor de la superestructura de ambos extremos del área de fusión y de trabajo, puesto que las pérdidas desde el extremo de trabajo, como las que se diferencian de las del extremo de fusión, no son técnicamente pérdidas en absoluto, especialmente para hornos de tracción elevada, un equilibrio construido sobre esta base será poco realista en relación con las condiciones reales.

Hornos abiertos tales como los que se usan en la fabricación de vidrio plano, se presentan problemas secundarios en la separación de las zonas de fusión y de condensación en lo que respecta a los balances de calor. Sin embargo, dos hornos de compartimiento con gargantas dan problemas similares, ya que es difícil definir la temperatura del vidrio y el efecto del flujo de vidrio de retorno a través de la garganta si esto tiene lugar.

4.5.1.2 Diagrama de Sankey

Los diagramas de Sankey se suelen utilizar para visualizar las transferencias de energía, material o costo entre procesos, a través de flechas que muestran la pérdida o dispersión por transferencia. También se utilizan para visualizar las cuentas de energía o de flujo de materiales a nivel regional o nacional. Este tipo de diagramas pone un énfasis visual de las transferencias importantes o flujos dentro de un sistema, y son de gran ayuda en la localización de las contribuciones dominantes para un flujo total. A menudo, los diagramas de Sankey muestran cantidades conservadas dentro de los límites de un sistema definido, típicamente energía o masa.

Figura 4.2 Ejemplo de aplicación de diagrama de Sankey²

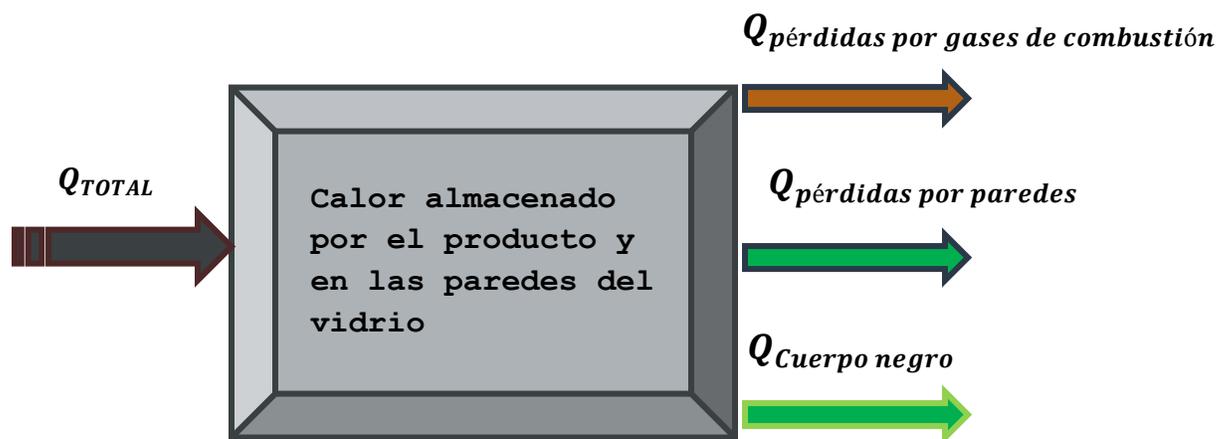


4.6 Caso de estudio. Horno tipo Unit Melter para producción artesanal de vidrio soplado.

El estudio se enfocará en el cálculo del balance de materia y energía para determinar la eficiencia de la combustión utilizando un sistema de combustión

² Tomada de Ingenio Virtual
<http://www.ingeniovirtual.com>
 Consultado 15 junio 2017

convencional con aire y un sistema de combustión AOF, mediante el cálculo de las temperaturas de flama para ambos sistemas, aplicados a un proceso en particular que es la fusión de vidrio en un horno tipo Unit Melter. El cálculo de requerimiento de energía se basa en el balance de materia y energía considerando que la energía alimentada por los gases de combustión es igual a la energía que se absorbe tanto en el producto como en las paredes del horno más la que se pierde por conducción, radiación y los gases de combustión que salen por la chimenea del horno.



Entonces la ecuación general del balance quedará de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{vidrio} + \dot{Q}_{pérdidas\ por\ paredes} + \dot{Q}_{pérdidas\ por\ cuerpo\ negro}$$

4.6.1 Características de los hornos tipo Unit Melter³.

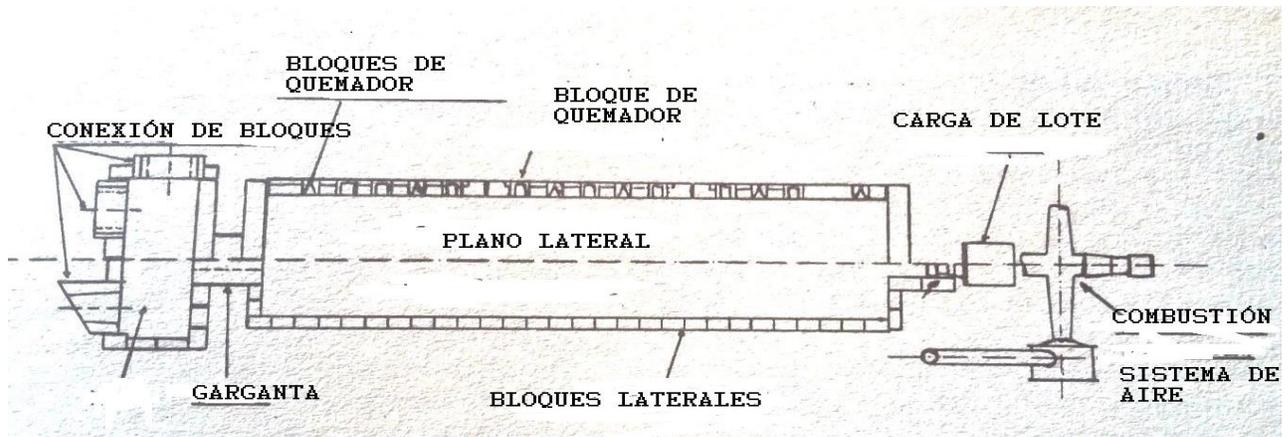
El término de Unit Melter se da generalmente a cualquier horno de fusión de vidrio alimentado por combustible que no tiene dispositivo de recuperación de calor. Generalmente se hace referencia a hornos aire/combustible cuando se usa este término. Sin embargo, la mayoría de los hornos completos oxígeno/combustible no tienen sistema de recuperación de calor y por lo tanto son técnicamente unidades de fundición.

³Alex G. Pincus. Melting Furnace Design In The Glass Industry. 1976.

Típicamente son de tamaño relativamente pequeño y cuentan con de 2 a 16 quemadores. La producción de estos hornos varía puede ser tan grande como 36 toneladas de vidrio por día o tan pequeño como 230 kg por día.

Debido a la muy baja eficiencia energética el uso de Hornos tipo Unit Melter aire / combustible son muy susceptibles a las técnicas de combustión mejoradas con oxígeno, incluyendo oxígeno suplementario-combustible, enriquecimiento de oxígeno premezclado y combustión completa oxígeno-combustible. Cuando se aplica la premezcla, la inyección de oxígeno al aire típicamente se produce aguas abajo del recuperador para evitar problemas asociados con fugas de aire en el recuperador.

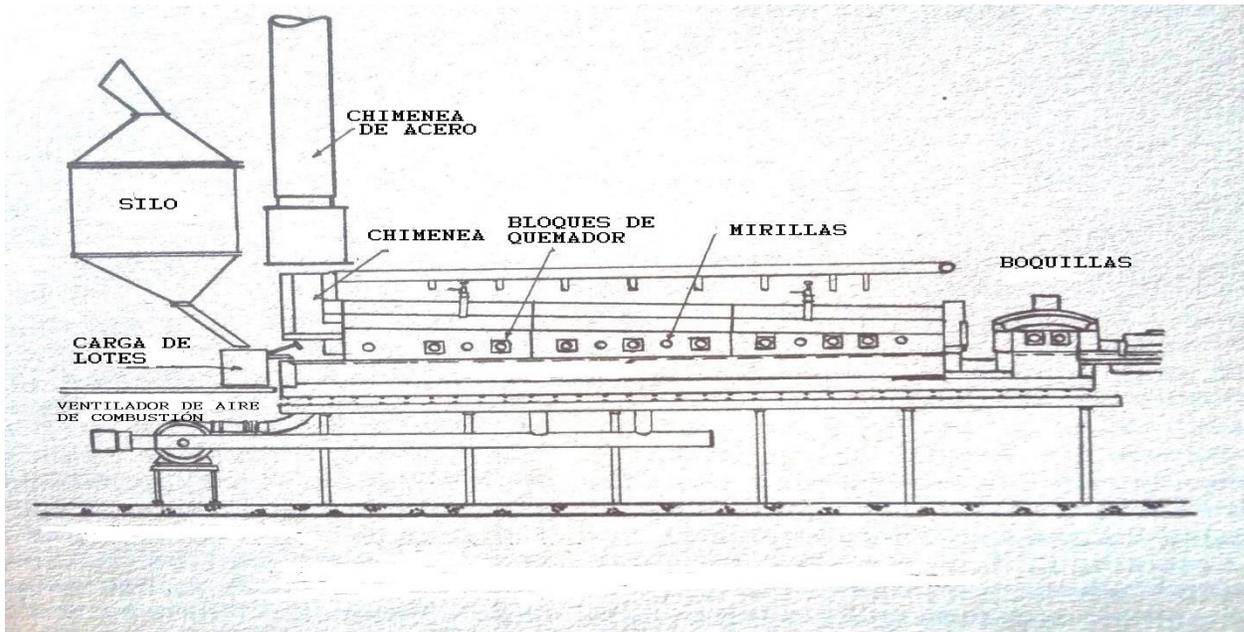
Figura 4.3 Horno tipo Unit Melter vista plana.



Fuente: Melting Furnace Design in the Glass Industry. 1976

Este tipo de hornos son buenos candidatos para la aplicación de la técnica 100% oxígeno-combustible. Las eficiencias reconvertidas de los intercambiadores de calor son mucho más bajas que con los hornos regenerativos, y por lo tanto el ahorro de combustible puede ayudar a conducir la conversión.

Figura 4.4 Unit Melter Elevación Longitudinal



Fuente: Melting Furnace Design in the Glass Industry.1976

En hornos tipo Unit Melter los quemadores se encuentran a los lados del horno, perpendiculares al flujo del vidrio y la flama es continua, son hornos de excelente control en el gradiente de temperatura, pero su eficiencia es baja menor al 30%.

A este tipo de hornos se les ha acoplado un recuperador metálico o cerámico, de quemadores transversales, con aire secundario independiente y baja relación ancho/longitud.

En este tipo de hornos, el aprovechamiento del calor de los gases se realiza mediante un recuperador metálico formado por un haz de tubos de acero especial en el interior de los cuales el aire secundario circula en corrientes paralelas o contracorriente con los gases que van por la parte exterior del haz de tubos. Se realiza de este modo un intercambio directo y continuo de calor entre los gases y el aire, precalentándose éste.

Estos hornos son siempre de quemadores transversales y debido a la poca anchura del horno hay que emplear unos mecheros que produzcan una flama corta y blanda para evita el desgaste del refractario.

Las normas dimensionales para este tipo de horno son las siguientes:

Anchura del molde = 2/3 anchura del horno; relación entre la longitud balsa de fusión y anchura de ésta $m=3-4$, y profundidad de balsa 1 m.

El horno Unit Melter adaptado a recuperación presenta ciertas ventajas, como son:

- Menor espacio necesario, ya que no hay cámara; menores gastos de inversión, pues al no haber cámaras, el horno es más sencillo;
- Menores gastos de mantenimiento;
- Vidrio de muy buena calidad;
- Mayor aprovechamiento de los combustibles (gases de combustión a contracorriente);
- Mayor constancia de los reglajes de fusión, especialmente la presión del horno por no haber inversiones,
- Menor consumo de combustible por kilo de vidrio para tonelajes pequeños y medianos.

Al adaptar al Unit Melter un recuperador metálico es un aparato muy delicado y requiere una vigilancia muy cuidadosa y un control riguroso de las temperaturas de los gases a la entrada y del aire secundario a la salida. Se requiere contar con aceros de muy buena calidad y dotar al recuperador de sistemas automáticos de alarma en caso de un aumento de temperatura, y sistemas de dilución de gases con aire ventilado.

4.7 Cálculo del calor total requerido para el proceso de fusión

Para estimar el calor total requerido que hay que suministrar al horno para el proceso de toma en cuenta el calor necesario para fundir las materias primas, y las pérdidas de calor que se producen, lo que se reduce a la siguiente ecuación:

$$Q_{TR} = Q_v + Q_{PP} + Q_{CN} \quad (Ec. 4.7)$$

4.7.1 Cálculo de calor requerido para la descomposición de las materias primas

Los requerimientos energéticos para el proceso de fusión están determinados en gran medida por el tipo de vidrio, cantidades y cualidades de las materias primas. El color del vidrio elaborado influye sobre el consumo de combustible en la medida en que el intercambio de calor fama-baño de vidrio es menor en el caso de un vidrio de color, lo que aumenta el consumo energético.

Sardeshpande e Ibarra 2007, presentan un valor de 2671 kJ/kg para vidrios sódico-cálcicos, considerando que el vidrio no presentara cullet (desperdicio de vidrio), mientras que para un lote que tuviera un 50% de cullet el requerimiento energético sería de 2275 kJ/kg ya que se reduce el calor de la reacción del vidrio, ya que el cullet no necesita de este puesto que ya es un material vítreo, las diferencias claras en los requerimientos energéticos en lo que respecta a las materias primas esta principalmente en las materias primas empleadas.

La determinación de las entalpías de del vidrio fundido y la carga de gases es posible en teoría, pero imposible en la práctica: cuando se hacen comparaciones entre eficiencias este punto en particular no debe ser olvidado.

Los requerimientos teóricos de energía de diferentes tipos de vidrio dependen de la formulación del lote, cambiando proporciones de vidrio reciclado permitidos.

	Vidrios (Contenedores de vidrio)	Sódico-cálcicos (kJ/kg)	Vidrio de Laboratorio (cerca del 8% de B ₂ O ₃) (kcal/kg)	Cristal de plomo (cerca del 19% PbO) (kJ/kg)		
	(kcal/kg)	(kJ/kg)	(kcal/kg)	(kJ/kg)	(kcal/kg)	(kJ/kg)
Calor de Reacción	116	487	98	412	96	403
Entalpía ΔH (20-1500°C)	449	1886	405	1701	403	1693
Gases de salida ΔH (20-1500°C)	71	289	33	138	39	164
Requerimiento teórico total de calor	636	2671	536	2251	538	2260

Tabla 4.1 Requerimientos teóricos de energía para diferentes tipos de vidrio

Fuente: Melting Furnace Design in the Glass Industry.1976

Para fines prácticos Se tomará como base de cálculo la producción de una tonelada de vidrio del tipo sódico cálcico, las proporciones de las materias primas se muestran a continuación en la Tabla 4.2.

No.	Materias Primas	Cantidad (kg)	Masa molar (g/mol)
1	Óxido de Silicio	732.9881	60.08
2	<i>Carbonato de sodio</i>	<i>240.1921</i>	<i>105.9885</i>
3	Dolmita	123.1222	184.34
4	Calcita molida	81.2532	100.0869
5	Alúmina	9.2229	101.963
6	Nitrato de Sodio	4.9802	84.96
7	Sulfato de Sodio	4.9396	142.04
8	Óxido de arsénico	0.6999	197.844
9	Selenio	0.0114	78.96
10	Óxido de cobalto	0.0025	74.9326

Tabla 4.2.

No.	Materias Primas	Cantidad (kg)	Masa molar (g/mol)
1	Óxido de Silicio	732.9881	60.08
2	<i>Carbonato de sodio</i>	<i>240.1921</i>	<i>105.9885</i>
3	Dolmita	123.1222	184.34
4	Calcita molida	81.2532	100.0869
5	Alúmina	9.2229	101.963
6	Nitrato de Sodio	4.9802	84.96
7	Sulfato de Sodio	4.9396	142.04
8	Óxido de arsénico	0.6999	197.844
9	Selenio	0.0114	78.96
10	Óxido de cobalto	0.0025	74.9326

Tabla 4.2 Composición de las materias primas para fabricación de vidrio sódico cálcico para 1 tonelada de vidrio.

MATERIA PRIMA	Cp (cal/molK)	Intervalo de Temperatura (K)
SiO ₂	10.87+0.008712T-241200T ²	273-848
	10.95+0.00550T	848-1873
	3.65+0.0240T	273-523
	17.09+0.000454T-897200/T ²	523-1973
CARBONATO DE SODIO	28.9	288-371
CALCITA MOLIDA	19.68+0.01189T-307600/T ²	273-1033
DOLOMITA	40.1	299-372
ALÚMINA	22.08+0.008971T-522500/T ²	273-1973
NITRATO DE SODIO	4.56+0.0580T	273-583
SULFATO DE SODIO	32.8	289-371
ÓXIDO DE ARSENICO	8.37+0.086T	273-548
SELENIO	4.53+0.00550T	273-490
ÓXIDO DE COBALTO	5.12+0.00333T	273-1763
Óxidos		
SiO ₂	17.09+0.00454-897200/T ²	523-1973
ALÚMINA	22.08+0.00897-522500/T ²	273-1973
Fe ₂ O ₃	24.72+0.01604-43400/T ²	273-1097
CaO	10.00+0.00484T-10800/T ²	273-1173
MgO	10.86+0.001197T-208700/T ²	273-2073
Se	4.53+000550T	273-490
CoO	5.12+0.00333T	273-1763
TiO ₂	11.81+0.00754-41900/T ²	273-713
As ₂ O ₃	8.37+0.086T	273-548
Material	Cp(J/kgK)	Intervalo de temperatura °C
Óxido de Sodio	1230	0-25
Material	Cp(J/g°C)	Intervalo de temperatura °C
Vidrio sódico cálcico	0.84	
Gases de combustión y descomposición de materias primas		
MATERIA PRIMA	Cp (cal/molK)	Intervalo de Temperatura (K)
Metano (CH ₄)	5.34+0.0115T	273-1200
Oxígeno (g)	8.27+0.000258T-187700/T ²	300-5000
CO ₂ (g)	10.34+0.00274T-195500/T ²	273-1200
N ₂ (g)	6.50+000100T	300-3000
H ₂ O(g)	8.22+0.00015T+0.00000134T ²	300-3000
SO ₃ (g)	5.7409	NA

Tabla 4.3 Ecuaciones para el cálculo de calor específico y capacidades caloríficas de diversos componentes del vidrio sódico cálcico.

Fuente: Manual del Ingeniero Químico. 1992

No.	Compuesto	Temperatura de descomposición teórica (K)	Temperatura de descomposición Real (K)
2	Carbonato de sodio	823.15	1092
3	Dolomita	973.15	767.65
4	Calcita molida	673.15	882.15
6	Nitrato de sodio	813.15	1092
7	Sulfato de sodio	1373.15	1373.15

Tabla 4.4 Temperaturas de descomposición de algunos compuestos.

Fuente: Manual del Ingeniero Químico. 1992

Existen variaciones entre las temperaturas de descomposición, ya que la descomposición teórica ya que considera a los compuestos como compuestos puros, mientras que los datos de descomposición real manejan cierto grado de impurezas.

Los datos de referencia para el cálculo se tomarán de las tablas mientras que las condiciones de temperatura se fijaran de 0°C a 25°C (273.15 K y 298.15 K).

$$Q_V = mC_{P_{MP}}\Delta T \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Donde, Q_V es la cantidad de calor requerida para la fusión del vidrio, m masa total de la mezcla en kg, $C_{P_{MP}}$ calor específico de cada una de las materias primas, debido a que el calor específico de cada especie varía con la temperatura, se calcula estableciendo intervalos de temperatura entre la temperatura de entrada y la de salida en °C.

Las materias primas se calientan a presión constante, por lo que se debe utilizar para los cálculos de calentamiento de los calores específicos a presión constante. Las capacidades caloríficas de las sustancias suelen representarse por ecuaciones cuadráticas sobre un intervalo de temperaturas; así:

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad (\text{Ec. 4.9})$$

La cantidad de energía transferida por calor entre una muestra de masa de un material por un cambio de temperatura de T_1 a T_2 a presión constante.

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT. \quad (Ec. 4.10)$$

Descomposición de las materias primas

En la tabla 4.5 se describen las reacciones de descomposición que sufren algunas de las materias primas que forman el vidrio en sus correspondientes intervalos de descomposición.

No.	Componente	Reacciones de descomposición	Intervalo de descomposición T(K)
2	Carbonato de sodio	$Na_2CO_3 \rightarrow Na_2O + CO_2$	288-371
3	Dolomita	$CaMg(CO_3)_2 \rightarrow CaO + MgO$	299-372
4	Calcita molida	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	273-1033
6	Nitrato de Sodio	$2NaNO_3 \rightarrow Na_2O + N_2 + 5/2 O_2$	273-583
7	Sulfato de Sodio	$Na_2SO_4 \rightarrow Na_2$	289-371

Tabla 4.5 Reacciones de descomposición de las Materias primas.

Proceso de Cálculo

De acuerdo con los datos de las tablas 4.2-4.5, se desarrollan los cálculos para encontrar el calor requerido para la fusión de 1 tonelada de vidrio del tipo sódico cálcico.

Los cálculos se desglosan respecto a los intervalos de temperatura en los que se descomponen cada uno de los componentes del vidrio.

4.7.1.1 Cálculo de la cantidad de calor requerido para la fusión por materia prima para producción de una tonelada de vidrio. Intervalo de temperatura de 273.15 -298.15 K

➤ Carbonato de sodio (componente No.2)

$$m = \left[\frac{\text{masa de } Na_2CO_3 \text{ (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de } Na_2CO_3 \left(\frac{g}{mol} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{240.1921 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{105.9885 \left(\frac{g}{mol} \right)} \right] = 2266.2465 \text{ mol de } Na_2CO_3$$

$$Q_{Na_2CO_3} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Na_2CO_3} = (2266.2465 \text{ mol}) * \left(28.9 \frac{cal}{mol^\circ K} \right) * (298.15 - 273.15)^\circ K$$

$$Q_{Na_2CO_3} = 1\,638,085.6360 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 6.854 \frac{kJ}{kg}$$

➤ Dolomita (componente No. 3)

$$m = \left[\frac{\text{masa de } CaMg(CO_3)_2 \text{ (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de } CaMg(CO_3)_2 \left(\frac{g}{mol} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{123.1222 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{184.34 \left(\frac{g}{mol} \right)} \right] = 667.9082 \text{ mol de } CaMg(CO_3)_2$$

$$Q_{CaMg(CO_3)_2} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{CaMg(CO_3)_2} = (667.9082 \text{ mol}) * \left(40.1 \frac{cal}{mol^\circ K} \right) * (298.15 - 273.15)$$

$$Q_{CaMg(CO_3)_2} = 669,577.9836 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 2.802 \frac{J}{ton \text{ vidrio}}$$

➤ *Calcita molida (componente No. 4)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de Calcita (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de Calcita } (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{81.2532 * 1000 \frac{g}{kg}}{100.0869 (\frac{g}{mol})} \right] = 811.8265 \text{ mol de Calcita}$$

$$Q_{\text{Calcita}} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{\text{Calcita}} = (811.8265 \text{ mol}) * \left(\int_{273.15}^{298.15} 19.68 + 0.01189T - \frac{307600}{T^2} \left(\frac{cal}{mol \cdot K} \right) dT \right)$$

$$Q_{\text{Calcita}} = 391693.1204 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} * \frac{4.1868 J}{1 cal} = 1.640 \frac{kJ}{kg}$$

➤ *Alúmina (componente No. 5)*

$$m = \left[\frac{\text{Cantidad de Alúmina (kg)} * 1000}{P.M \text{ de Alúmina } (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{9.2229 * 1000}{101.963 (\frac{g}{mol})} \right] = 90.4534 \text{ mol de Alúmina}$$

$$Q_{\text{Alúmina}} = m \sum C_{pMP} \Delta T = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{\text{Alúmina}} = (90.4534 \text{ mol}) * \left(\int_{273.15}^{298.15} 22.08 + 0.008971T - \frac{522500}{T^2} \left(\frac{cal}{mol \cdot K} \right) dT \right)$$

$$Q_{\text{Alúmina}} = 35,432.1649 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} * \frac{4.1868 J}{1 cal} = 0.148 \frac{kJ}{kg}$$

➤ *Nitrato de sodio (componente No. 6)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de NaNO}_3 \text{ (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de NaNO}_3 (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{4.9802 * 1000}{84.96 \left(\frac{g}{mol} \right)} \right] = 58.6182 \text{ mol de } NaNO_3$$

$$Q_{NaNO_3} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{NaNO_3} = (58.5942 \text{ mol}) * \left(\int_{273.15}^{298.15} 4.56 + 0.0580T \left(\frac{cal}{mol^\circ K} \right) dT \right)$$

$$Q_{NaNO_3} = 30,961.6795 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} * \frac{4.1868 J}{1 cal} = 0.130 \frac{kJ}{kg}$$

➤ *Sulfato de sodio (componente No.7)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de } Na_2SO_4 \text{ (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de } CaMg Na_2SO_4 \left(\frac{g}{mol} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{4.9396 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{141.98 \left(\frac{g}{mol} \right)} \right] = 34.7908 \text{ mol de } CaMg (CO_3)_2$$

$$Q_{Na_2SO_4} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Na_2SO_4} = (34.7908 \text{ mol}) * \left(32.8 \frac{cal}{mol^\circ K} \right) * (298.15 - 273.15)$$

$$Q_{Na_2SO_4} = 28,528.4688 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} * \frac{4.1868 J}{1 cal} = 0.119 \frac{kJ}{kg}$$

➤ *Óxido de arsénico (componente No.8)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de } As_2O_5 \text{ (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de } As_2O_5 \left(\frac{g}{mol} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.6999 * 1000}{197.844 \left(\frac{g}{mol} \right)} \right] = 3.5376 \text{ mol de } As_2O_5$$

$$Q_{As_2O_5} = m \sum C_{PMP} \Delta T = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{As_2O_5} = (3.5376 \text{ mol}) * \left(\int_{273.15}^{298.15} 8.37 + 0.086T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{As_2O_5} = 2,912.8804 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 0.012 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Selenio (componente No. 9)

$$m = \left[\frac{\text{masa de Se (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de Se } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.0114 * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{78.96 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 0.11444 \text{ mol de Se}$$

$$Q_{Se} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Se} = (0.11444 \text{ mol}) * \left(\int_{273.15}^{298.15} 4.53 + 0.00550T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{Se} = 22.02014 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 0.000092 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.7.1.2 Cálculo del calor requerido por materias primas durante las etapas de descomposición Dolomita. 298.15-797.65 K

Dado que las condiciones de temperatura varían dependiendo de las temperaturas de las temperaturas a las que se descomponen las materias primas, lo que da lugar al cálculo de energía requerida por etapas de cálculo.

Intervalo de descomposición (298.15-797.65 K), descomposición de la dolomita

○ Óxido de Silicio (componente No.1)

$$m = \left[\frac{\text{masa de SiO}_2 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de SiO}_2 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{732.9881 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{60.086 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 12,198.9831 \text{ mol de SiO}_2$$

$$Q_{\text{SiO}_2} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{\text{SiO}_2} = (12,198.9831 \text{ mol}) * \left(\int_{298.15}^{797.65} 10.87 + 0.008712T - \frac{241200}{T^2} \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{\text{SiO}_2} = 118,226,396.1 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 494.659 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Carbonato de sodio (componente No.2)

$$m = \left[\frac{\text{masa de Na}_2\text{CO}_3 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de Na}_2\text{CO}_3 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{240.1921 * 1000}{105.94 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 2267.2465 \text{ mol de Na}_2\text{CO}_3$$

$$Q_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = (2267.2465 \text{ mol}) * \left(28.9 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) * (797.65 - 298.15)^\circ\text{K}$$

$$Q_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 32,728,951 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} = 136.938 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Dolomita (componente No.3)

$$m = \left[\frac{\text{masa de CaMg (CO}_3)_2 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de CaMg (CO}_3)_2 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{123.1222 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{184.34 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 667.9082 \text{ mol de CaMg (CO}_3)_2$$

$$Q_{CaMg(CO_3)_2} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{CaMg(CO_3)_2} = (667.9082 \text{ mol}) * \left(40.1 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}}\right) * (298.15)$$

$$Q_{CaMg(CO_3)_2} = (667.9082 \text{ mol}) * \left(40.1 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}}\right) * (797.65 - 298.15)$$

$$Q_{CaMg(CO_3)_2} = 13378168.11 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 56.974 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

La reacción para la cual se descompone la dolomita en el intervalo de temperaturas de 298.15-797.65 K. es la siguiente:



Se establece una relación molar y estiman las cantidades en kg.

$$CaO = \frac{667.9082 \text{ moles} * 56.07 \text{ g/mol}}{1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 37.449 \text{ kg componente No.11}$$

$$MgO = \frac{667.9082 \text{ moles} * 40.29 \text{ g/mol}}{1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 26.910 \text{ kg componente No.12}$$

$$2CO_2 = \frac{667.9082 \text{ moles} * 43.99 \text{ g/mol}}{1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} * 2 = 58.763 \text{ kg componente No.13}$$

Los óxidos se siguen descomponiendo en las siguientes etapas mientras que el CO₂ sale junto con los gases de combustión.

- *Calcita molida (componente No.4)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de Calcita (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de Calcita } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{81.2532 * 1000 \text{ kg}}{100.06 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} \right] = 812.0447 \text{ mol de Calcita}$$

$$Q_{Calcita} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{Calcita} = (812.0447 \text{ mol}) * \left(\int_{298.15}^{797.65} 19.68 + 0.01189T - \frac{307600}{T^2} \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}}\right) dT \right)$$

$$Q_{Calcita} = 10,100,298.62 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 42.260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- *Alúmina (componente No.5)*

$$m = \left[\frac{\text{Cantidad de Alúmina (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de Alúmina } (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{9.2229 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{101.963 (\frac{g}{mol})} \right] = 90.4534 \text{ mol de Alúmina}$$

$$Q_{Alúmina} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Alúmina} = (90.4534 \text{ mol}) * \left(\int_{298.15}^{797.65} 22.08 + 0.008971T - \frac{522500}{T^2} \left(\frac{cal}{mol^\circ K} \right) \right) dT$$

$$Q_{Alúmina} = 1120417.631 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} * \frac{4.1868 J}{1 cal} = 4.688 \frac{kJ}{kg}$$

- *Nitrato de Sodio (componente No.6)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de NaNO}_3 \text{ (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de NaNO}_3 (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{4.9802 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{84.9947 (\frac{g}{mol})} \right] = 58.6182 \text{ mol de NaNO}_3$$

$$Q_{NaNO_3} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{NaNO_3} = (58.6182 \text{ mol}) * \left(\int_{298.15}^{797.65} 4.56 + 0.0580T \left(\frac{cal}{mol^\circ K} \right) \right) dT$$

$$Q_{NaNO_3} = 1,063,974.412 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} * \frac{4.1868 J}{1 cal} = 4,452 \frac{kJ}{kg}$$

- *Sulfato de sodio (componente No.7)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de Na}_2\text{SO}_4 \text{ (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de CaMg Na}_2\text{SO}_4 (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{4.9396 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{141.98 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 34.7908 \text{ mol de CaMg (CO}_3)_2$$

$$Q_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = (34.7908 \text{ mol}) * \left(32.8 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) * (797.65 - 298.15)$$

$$Q_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 569,998.8066 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 2.385 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Óxido de arsénico (componente No.8)

$$m = \left[\frac{\text{masa de As}_2\text{O}_5 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P. M \text{ de As}_2\text{O}_5 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.6999 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{197.844 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 3.5376 \text{ mol de As}_2\text{O}_5$$

$$Q_{\text{As}_2\text{O}_5} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{\text{As}_2\text{O}_5} = (3.5376 \text{ mol}) * \left(\int_{298.15}^{797.65} 8.37 + 0.086T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{\text{As}_2\text{O}_5} = 98,052.500 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 0.410 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Selenio (componente No.9)

$$m = \left[\frac{\text{masa de Se (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P. M \text{ de Se} \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.0114 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{78.96 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 0.1444 \text{ mol de Se}$$

$$Q_{\text{Se}} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{Se} = (0.1444 \text{ mol}) * \left(\int_{298.15}^{797.65} 8.37 + 0.086 T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{Se} = 544.0054 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 0.002 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.7.1.3 Cálculo del calor requerido por materias primas durante las etapas de descomposición (Nitrato de sodio y calcita molida). Intervalo de temperatura [797.65-882.15 K]

➤ Óxido de Silicio (componente No.1)

$$m = \left[\frac{\text{masa de SiO}_2 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de SiO}_2 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{732.9881 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{60.08 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 12,198.9831 \text{ mol de SiO}_2$$

$$Q_{SiO_2} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{SiO_2} = (12,198.931 \text{ mol}) * \left(\int_{797.65}^{882.15} 10.95 + 0.00550T - \frac{241200}{T^2} \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{SiO_2} = 16,409,208.18 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 67.150 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Carbonato de sodio (componente No.2)

$$m = \left[\frac{\text{masa de Na}_2\text{CO}_3 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de Na}_2\text{CO}_3 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{240.1921 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{105.94 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 2267.2465 \text{ mol de Na}_2\text{CO}_3$$

$$Q_{Na_2CO_3} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{Na_2CO_3} = (2267.2465 \text{ mol}) * \left(28.9 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}}\right) * (882.15 - 797.65)^\circ\text{K}$$

$$Q_{Na_2CO_3} = 5,536,729.449 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 23.166 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Productos de la descomposición de la dolomita:

➤ Óxido de calcio (componente No.11)

$$m = \left[\frac{\text{masa de CaO (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de CaO } (\frac{\text{g}}{\text{mol}})} \right]$$

$$m = \left[\frac{37.4496 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{56.07 (\frac{\text{g}}{\text{mol}})} \right] = 667.9082 \text{ mol de CaO}$$

$$Q_{CaO} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{CaO} = (667.9082 \text{ mol}) * \left(\int_{797.65}^{882.15} 10.00 + 0.00484T - 108000/T^2 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{CaO} = 785,147.9649 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 3.286 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Óxido de magnesio (componente No.12)

$$m = \left[\frac{\text{masa de MgO (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de MgO } (\frac{\text{g}}{\text{mol}})} \right]$$

$$m = \left[\frac{26.9100 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{40.29 (\frac{\text{g}}{\text{mol}})} \right] = 667.9082 \text{ mol de MgO}$$

$$Q_{MgO} = m * C_{PMP} * \Delta T$$

$$Q_{MgO} = (667.9082 \text{ mol}) * \left(\int_{797.65}^{882.15} 10.86 + 0.00119T - 208700/T^2 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{MgO} = 652,920.6518 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} = 2.731 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Calcita molida (componente No.4)

$$m = \left[\frac{\text{masa de Calcita (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de Calcita } (\frac{g}{mol})} \right]$$

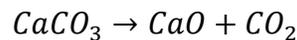
$$m = \left[\frac{81.2532 * 1000 \frac{g}{kg}}{100.06 (\frac{g}{mol})} \right] = 812.0447 \text{ mol de Calcita}$$

$$Q_{\text{Calcita}} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{\text{Calcita}} = (812.0447 \text{ mol}) * \left(\int_{797.65}^{882.15} 19.68 + 0.01189T - \frac{307600}{T^2} (\frac{cal}{mol^\circ K}) \right) dT$$

$$Q_{\text{Calcita}} = 2005647.0260 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} * \frac{4.1868 J}{1 cal} = 8.3912 \frac{kJ}{kg}$$

La reacción de descomposición de la calcita para un intervalo de temperatura de 797.65-882.15K es la siguiente:



Se establecen relaciones molares conociendo los pesos moleculares y se estiman las cantidades en kg.

$$CaO = \frac{812.0447 \text{ moles} * 56.07 g/mol}{1000 \frac{g}{kg}} = 45.5313 \text{ kg componente No.11}$$

$$CO_2 = \frac{812.0447 \text{ moles} * 43.99 g/mol}{1000 \frac{g}{kg}} = 35.7218 \text{ kg componente No.13}$$

Los óxidos se siguen descomponiendo en las siguientes etapas mientras que el CO₂ sale junto con los gases de combustión.

➤ *Alúmina (componente No.5)*

$$m = \left[\frac{\text{Cantidad de Alúmina (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de Alúmina } (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{9.2229 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{101.963 (\frac{g}{mol})} \right] = 90.4534 \text{ mol de Alúmina}$$

$$Q_{Alúmina} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{Alúmina} = (90.4534 \text{ mol}) * \left(\int_{797.65}^{882.15} 22.08 + 0.008971T - \frac{522500}{T^2} \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{Alúmina} = 220,672.6913 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} = 0.923 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ *Nitrato de sodio (componente No.6)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de NaNO}_3 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de NaNO}_3 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

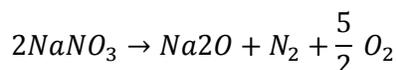
$$m = \left[\frac{4.9802 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{84.96 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 58.6182 \text{ mol de NaNO}_3$$

$$Q_{NaNO_3} = m C_{P_{MP}} \Delta T = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{NaNO_3} = (58.6182 \text{ mol}) * \left(\int_{797.65}^{882.15} 4.56 + 0.0580T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{NaNO_3} = 263,879.6661 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 1.104 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Dado que el Nitrato de sodio se descompone durante este intervalo de temperatura se presenta a continuación la reacción de descomposición:



Entonces mediante las relaciones molares y a que se conocen los pesos moleculares de los productos en los que se descompone e nitrato de sodio.

$$\text{Na}_2\text{O} = \frac{\frac{58.6182}{2} \text{ moles} * 61.95 \text{ g/mol}}{1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 1.8157 \text{ kg componente No.13}$$

$$\text{N}_2 = \frac{\frac{58.6182}{2} \text{ moles} * 28 \text{ g/mol}}{1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 0.8207 \text{ kg}$$

$$O_2 = \frac{\frac{58.6182}{2} \text{ moles} * 31.98 \text{ g/mol}}{1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 2.3433 \text{ kg}$$

Los óxidos se siguen descomponiendo en las siguientes etapas mientras que el N₂ y O₂ sale junto con los gases de combustión.

➤ *Sulfato de sodio (componente No.7)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de } Na_2SO_4 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de } CaMg Na_2SO_4 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{4.9396 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{141.98 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 34.7908 \text{ mol de } CaMg (CO_3)_2$$

$$Q_{Na_2SO_4} = m C_{PMP} \Delta T = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Na_2SO_4} = (34.7908 \text{ mol}) * \left(32.8 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ K} \right) * (882.15 - 797.65)$$

$$Q_{Na_2SO_4} = 96,426.2245 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} = 0.403 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ *Óxido de arsénico (componente No.8)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de } As_2O_5 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de } As_2O_5 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.6999 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{197.844 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 3.5376 \text{ mol de } As_2O_5$$

$$Q_{As_2O_5} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{As_2O_5} = (3.5376 \text{ mol}) * \left(\int_{797.65}^{882.15} 8.37 + 0.086T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ K} \right) dT \right)$$

$$Q_{As_2O_5} = 24,094.1940 \frac{cal}{Ton\ vidrio} * \frac{4.1868 J}{1 cal} = 0.101 \frac{kJ}{kg}$$

➤ Selenio (componente No.9)

$$m = \left[\frac{masa\ de\ Se\ (kg) * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M\ de\ Se\ (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.0114\ kg * 1000 \frac{g}{kg}}{78.96(\frac{g}{mol})} \right] = 0.1444\ mol\ de\ Se$$

$$Q_{Se} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{Se} = (0.11444\ mol) * \left(\int_{797.65}^{882.15} 4.53 + 0.00550T \left(\frac{cal}{mol^\circ K} \right) dT \right)$$

$$Q_{Se} = 111.6219 \frac{cal}{Ton\ vidrio} = 0.000467 \frac{kJ}{kg}$$

4.7.1.4 Cálculo del calor requerido por materias primas durante las etapas de descomposición (Sulfato de sodio). Intervalo de temperatura [882.15-1092]K

➤ Óxido de Silicio (componente No.1)

$$m = \left[\frac{masa\ de\ SiO_2\ (kg) * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M\ de\ SiO_2\ (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{732.9881 * 1000 \frac{g}{kg}}{60.086(\frac{g}{mol})} \right] = 12,198.9831\ mol\ de\ SiO_2$$

$$Q_{SiO_2} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{SiO_2} = (12,198.9831\ mol) * \left(\int_{882.1}^{1092} 10.95 + 0.00550T \left(\frac{cal}{mol^\circ K} \right) dT \right)$$

$$Q_{SiO_2} = 41,929,305.3 \frac{cal}{Ton\ vidrio} = 175.432 \frac{kJ}{kg}$$

➤ Carbonato de sodio (componente No.2)

$$m = \left[\frac{\text{masa de } Na_2CO_3 \text{ (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de } Na_2CO_3 \left(\frac{g}{mol}\right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{240.1921 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{105.94 \left(\frac{g}{mol}\right)} \right] = 2267.2465 \text{ mol de } Na_2CO_3$$

$$Q_{Na_2CO_3} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Na_2CO_3} = (2267.2465 \text{ mol}) * \left(28.9 \frac{cal}{mol^{\circ}K}\right) * (1092 - 882.15)^{\circ}K$$

$$Q_{Na_2CO_3} = 13,750,090.8300 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} = 57.530 \frac{kJ}{kg}$$

La reacción de descomposición del carbonato de sodio es la siguiente:



A partir de la reacción de descomposición se calculan las cantidades en kg de los productos:

$$Na_2O = \frac{2267.2465 \text{ moles} * 61.95 \text{ g/mol}}{1000 \frac{g}{kg}} = 140.456 \text{ kg componente No.13}$$

$$CO_2 = \frac{2267.2465 \text{ moles} * 43.99 \text{ g/mol}}{1000 \frac{g}{kg}} = 99.736 \text{ kg}$$

➤ Alúmina (componente No.5)

$$m = \left[\frac{\text{Cantidad de Alúmina (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de Alúmina} \left(\frac{g}{mol}\right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{9.2229 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{101.963 \left(\frac{g}{mol}\right)} \right] = 90.4534 \text{ mol de Alúmina}$$

$$Q_{Alúmina} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Alúmina} = (90.4534 \text{ mol}) * \left(\int_{882.15}^{1092} 22.08 + 0.008971T - \frac{522500}{T^2} \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{Alúmina} = 576,883.7454 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 2.414 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ *Sulfato de sodio (componente No. 7)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de } Na_2SO_4 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de } CaMg Na_2SO_4 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{4.9396 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{141.98 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 34.7908 \text{ mol de } CaMg (CO_3)_2$$

$$Q_{Na_2SO_4} = m C_{P_{MP}} \Delta T = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Na_2SO_4} = (34.7908 \text{ mol}) * \left(32.8 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) * (1092 - 882.15)$$

$$Q_{Na_2SO_4} = 239467.9671 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} = 1.002 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ *Óxido arsénico (componente No.8)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de } As_2O_5 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de } As_2O_5 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.6999 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{197.844 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 3.5376 \text{ mol de } As_2O_5$$

$$Q_{As_2O_5} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{As_2O_5} = (3.5376 \text{ mol}) * \left(\int_{882.15}^{1092} 8.37 + 0.086T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{As_2O_5} = 69,232.5417 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 0.290 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Selenio (componente No.9)

$$m = \left[\frac{\text{masa de Se (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de Se } (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.0114 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{78.96(\frac{g}{mol})} \right] = 0.114437 \text{ mol de Se}$$

$$Q_{Se} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Se} = (0.1444 \text{ mol}) * \left(\int_{882.15}^{1092} 4.53 + 0.00550T \left(\frac{cal}{mol^{\circ}K} \right) dT \right)$$

$$Q_{Se} = 301.7300 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 0.001 \frac{kJ}{kg}$$

➤ Óxido de calcio (componente No.11)

$$m = \left[\frac{\text{masa de CaO (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de CaO } (\frac{g}{mol})} \right]$$

la masa del óxido de calcio es la suma del producido por la descomposición de la calcita y la dolomita en sus respectivos intervalos de temperatura

$$m = \left[\frac{82.9810 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{56.07(\frac{g}{mol})} \right] = 1479.9530 \text{ mol de CaO}$$

$$Q_{CaO} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{CaO} = (1479.9530 \text{ mol}) * \left(\int_{882.15}^{1092} 10.00 + 0.00484T - 108000/T^2 \left(\frac{cal}{mol^{\circ}K} \right) dT \right)$$

$$Q_{CaO} = 4,554,583.9580 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} = 19.056 \frac{kJ}{kg}$$

➤ Óxido de magnesio (componente No.12)

$$m = \left[\frac{\text{masa de MgO (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de MgO } (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{26.9100 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{40.29 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} \right] = 667.9082 \text{ mol de } Na_2O$$

$$Q_{MgO} = m * C_{P_{MP}} * \Delta T$$

$$Q_{MgO} = (667.9082 \text{ mol}) * \left(\int_{882.15}^{1092} 10.86 + 0.00119T - 208700/T^2 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ K}\right) dT \right)$$

$$Q_{MgO} = 1,657,381.4690 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 6.934 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Óxido de Sodio (componente No.13)

$$m = \left[\frac{\text{masa de } Na_2O \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de } Na_2O \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{1.8157 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{61.95 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} \right] = 29.3091 \text{ mol de } Na_2O$$

$$Q_{Na_2O} = m * C_{P_{MP}} * \Delta T$$

$$Q_{Na_2O} = (1.8157 \text{ kg}) * \left(1230 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ K} \right) * (1092 - 882.15)$$

$$Q_{Na_2O} = 0.469 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.7.1.5 Cálculo del calor requerido por materias primas durante las etapas de descomposición (Sulfato de sodio). Intervalo de temperatura [1092-1373.15K]

➤ Óxido de silicio (componente No.1)

$$m = \left[\frac{\text{masa de } SiO_2 \text{ (kg)} * 1000}{P.M \text{ de } SiO_2 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{732.9881 * 1000}{60.086 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} \right] = 12,198.9831 \text{ mol de } SiO_2$$

$$Q_{SiO_2} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{SiO_2} = (12,198.9831 \text{ mol}) * \left(\int_{1092}^{1373.15} 10.95 + 0.00550T - \frac{241200}{T^2} \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{SiO_2} = 60,806,490.58 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 254.414 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ *Alúmina (componente No.5)*

$$m = \left[\frac{\text{Cantidad de Alúmina (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de Alúmina } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{9.2229 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{101.963 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 90.4534 \text{ mol de Alúmina}$$

$$Q_{Alúmina} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Alúmina} = (90.4534 \text{ mol}) * \left(\int_{1092}^{1373.15} 22.08 + 0.008971T - \frac{522500}{T^2} \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{Alúmina} = 833,824.2328 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 3.489 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ *Sulfato de sodio (componente No.7)*

$$m = \left[\frac{\text{masa de } Na_2SO_4 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de } CaMg Na_2SO_4 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{4.9396 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{141.98 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 34.7908 \text{ mol de } CaMg (CO_3)_2$$

$$Q_{Na_2SO_4} = m C_{P_{MP}} \Delta T = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Na_2SO_4} = (34.7908 \text{ mol}) * \left(32.8 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) * (1373.15 - 1092)$$

$$Q_{Na_2SO_4} = 320,831.1601 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 1.342 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

De acuerdo a la reacción de descomposición del sulfato de sodio en un intervalo de temperatura de 1092-1373.15 K, se calculan las cantidades de Na₂O y de SO₃.



$$Na_2O = \frac{34.7908 \text{ moles} * 61.95 \text{ g/mol}}{1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 2.1553 \text{ kg componente No.13}$$

$$SO_3 = \frac{34.7908 \text{ moles} * 80.34 \text{ g/mol}}{1000 \text{ g/kg}} = 2.7844 \text{ kg}$$

Los óxidos se siguen descomponiendo en las siguientes etapas mientras que el SO₃ sale junto con los gases desprendidos.

➤ Óxido de arsénico (componente No.8)

$$m = \left[\frac{\text{masa de } As_2O_5 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de } As_2O_5 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.6999 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{197.844 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 3.5376 \text{ mol de } As_2O_5$$

$$Q_{As_2O_5} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{As_2O_5} = (3.5376 \text{ mol}) * \left(\int_{1092}^{1373.15} 8.37 + 0.086T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{As_2O_5} = 113,754.5625 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 0.476 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Selenio (componente No.9)

$$m = \left[\frac{\text{masa de Se (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de Se} \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.0114 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{78.96 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 0.114437 \text{ mol de Se}$$

$$Q_{Se} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Se} = (0.1444 \text{ mol}) * \left(\int_{1092}^{1373.15} 4.53 + 0.00550T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{Se} = 459.0566 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} = 0.002 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Óxido de calcio CaO (componente No.11)

$$m = \left[\frac{\text{masa de CaO (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de CaO} \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{82.9810 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{56.07 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 1479.9536 \text{ mol de CaO}$$

$$Q_{CaO} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{CaO} = (1479.953 \text{ mol}) * \left(\int_{1092}^{1373.15} 10.00 + 0.00484T - 108000/T^2 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{CaO} = 6613164.4870 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} = 27.669 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Óxido de magnesio MgO (componente No.12)

$$m = \left[\frac{\text{masa de MgO (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de MgO} \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{26.9100 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{40.29 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 667.9082 \text{ mol de Na}_2\text{O}$$

$$Q_{MgO} = m * C_{PMP} * \Delta T$$

$$Q_{MgO} = (667.9082 \text{ mol}) * \left(\int_{1092}^{1373.15} 10.86 + 0.00119T - 208700/T^2 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{MgO} = 2,290,233.6390 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} = 9.582 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Óxido de sodio (componente No.13)

$$m = \left[\frac{\text{masa de Na}_2\text{O (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de Na}_2\text{O} \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{142.2716 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{61.95 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 2296.5556 \text{ mol de Na}_2\text{O}$$

$$Q_{Na_2O} = m * C_{PMP} * \Delta T$$

$$Q_{Na_2O} = (142.2716 \text{ kg}) * \left(1230 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right) * (1373.15 - 1092)$$

$$Q_{Na_2O} = 49.200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.7.1.6 Vidrio ya formado en estado líquido. En un intervalo de temperatura de 1373.15-1730.85K.

➤ Óxido de sílice (componente No.1)

$$m = \left[\frac{\text{masa de SiO}_2 \text{ (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de SiO}_2 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right]$$

$$m = \left[\frac{732.9881 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{60.086 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \right] = 12,198.9831 \text{ mol de SiO}_2$$

$$Q_{SiO_2} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

$$Q_{SiO_2} = (12,198.9831 \text{ mol}) * \left(\int_{1373.15}^{1730.85} 10.95 + 0.00550T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{SiO_2} = 85,028,647.07 \frac{cal}{Ton\ vidrio} = 355.760 \frac{kJ}{kg}$$

➤ *Alúmina (componente No.5)*

$$m = \left[\frac{Cantidad\ de\ Alúmina\ (kg) * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M\ de\ Alúmina\ (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{9.2229\ kg * 1000 \frac{g}{kg}}{101.963(\frac{g}{mol})} \right] = 90.4534\ mol\ de\ Alúmina$$

$$Q_{Alúmina} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Alúmina} = (90.4534\ mol) * \left(\int_{1373.15}^{1730.85} 22.08 + 0.008971T - \frac{522500}{T^2} (\frac{cal}{mol^{\circ}K}) \right) dT$$

$$Q_{Alúmina} = 1,157,720.1120 \frac{cal}{Ton\ vidrio} = 444.844 \frac{kJ}{kg}$$

➤ *Óxido arsénico (componente No.8)*

$$m = \left[\frac{masa\ de\ As_2O_5\ (kg) * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M\ de\ As_2O_5\ (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.6999\ kg * 1000 \frac{g}{kg}}{197.844 (\frac{g}{mol})} \right] = 3.5376\ mol\ de\ As_2O_5$$

$$Q_{As_2O_5} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{As_2O_5} = (3.5376\ mol) * \left(\int_{1373.15}^{1730.85} 8.37 + 0.086T (\frac{cal}{mol^{\circ}K}) \right) dT$$

$$Q_{As_2O_5} = 179,488.6107 \frac{cal}{Ton\ vidrio} = 0.751 \frac{kJ}{kg}$$

➤ Selenio (componente No.9)

$$m = \left[\frac{\text{masa de Se (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de Se } (\frac{\text{g}}{\text{mol}})} \right]$$

$$m = \left[\frac{0.0114 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{78.96 (\frac{\text{g}}{\text{mol}})} \right] = 0.1444 \text{ mol de Se}$$

$$Q_{Se} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{Se} = (0.1444 \text{ mol}) * \left(\int_{1373.15}^{1730.85} 4.53 + 0.00550T \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{Se} = 674.7755 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} = 0.003 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Óxido de Calcio (componente No.11)

$$m = \left[\frac{\text{masa de CaO (kg)} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{P.M \text{ de CaO } (\frac{\text{g}}{\text{mol}})} \right]$$

$$m = \left[\frac{82.9810 \text{ kg} * 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{56.07 (\frac{\text{g}}{\text{mol}})} \right] = 1479.9530 \text{ mol de CaO}$$

$$Q_{CaO} = m \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT.$$

$$Q_{CaO} = (1479.9530 \text{ mol}) * \left(\int_{1373.15}^{1730.85} 10.00 + 0.00484T - 108000/T^2 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) dT \right)$$

$$Q_{CaO} = 9,246,263.42 \frac{\text{cal}}{\text{Ton vidrio}} * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 38.686 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Óxido de magnesio (componente No.12)

$$m = \left[\frac{\text{masa de MgO (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de MgO } (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{26.9100 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{40.29 (\frac{g}{mol})} \right] = 667.9082 \text{ mol de MgO}$$

$$Q_{MgO} = m * C_{PMP} * \Delta T$$

$$Q_{MgO} = (667.9082 \text{ mol}) * \left(\int_{797.65}^{882.15} 10.86 + 0.00119T - 208700/T^2 \left(\frac{cal}{mol^{\circ}K} \right) dT \right)$$

$$Q_{MgO} = 3,017,427.1780 \frac{cal}{Ton \text{ vidrio}} = 12,624,915.3100 \frac{kJ}{kg}$$

➤ Óxido de sodio (componente No.13)

$$m = \left[\frac{\text{masa de Na}_2\text{O (kg)} * 1000 \frac{g}{kg}}{P.M \text{ de Na}_2\text{O } (\frac{g}{mol})} \right]$$

$$m = \left[\frac{144.4269 \text{ kg} * 1000 \frac{g}{kg}}{61.95 (\frac{g}{mol})} \right] = 2331.346 \text{ mol de Na}_2\text{O}$$

$$Q_{Na_2O} = m * C_{PMP} * \Delta T$$

$$Q_{Na_2O} = (144.4269 \text{ kg}) * \left(1230 \frac{J}{kg^{\circ}K} \right) * (1730.85 - 1373.15)$$

$$Q_{Na_2O} = 63.544 \frac{kJ}{kg}$$

Resumen del balance

No.	Materias Primas	T (K)	T (K)	T (K)	T (K)	T (K)	T (K)	Total kJ/kg
		273-298	298-797	797-882	882-1092	1092-1373	1373-1730	
1	Óxido de Silicio		494.659	67.150	175.432	254.414	355.760	1341.416
2	Carbonato de sodio	6.854	136.938	23.166	57.530			224.488
3	Dolomita	2.802	56.974					59.776
4	Calcita molida	1.640	42.260	8.392				52.291
5	Alúmina	0.148	4.688	0.923	2.414	3.489	44.844	56.506
6	Nitrato de Sodio	0.130	4.452	1.104				5.685
7	Sulfato de Sodio	0.119	2.385	0.403	1.002	1.342		5.252
8	Óxido de arsénico	0.012	0.410	0.101	0.290	0.476	0.751	2.040
9	Selenio	0.000092	0.002	0.00000047	0.001	0.002	0.003	0.009
11	CaO			3.285	19.056	27.669	38.686	88.697
12	MgO			2.732	6.934	9.582	12.625	26.874
13	Na2O				0.469	49.200	63.544	113.212
Total (kJ/kg)								1976.125

Tabla 4.6 Requerimientos de energía para la descomposición de materias primas

El calor que se requiere para la fusión de las materias primas para la posterior formación del vidrio, se estima de la siguiente manera:

$$Q_v = \Delta H_{\text{materias primas}} + \Delta H_{\text{fusión}}$$

$$Q_v = \text{Energía que requieren las materias primas para formar el vidrio, } \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta H_{\text{materias primas}} = \text{Energía requerida para la descomposición de materia prima, } \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta H_{\text{fusión}} = \text{Energía que se absorbe por el vidrio una vez ya formado, en } \frac{kJ}{kg}$$

Dado que el $\Delta H_{\text{fusión}}$, es la energía que consume el vidrio ya formado y cuya capacidad calorífica es de 0.84 J/g°C tomado del manual del Ingeniero Químico (1992),

No.	Materias Primas	Cantidad (kg)	Masa molar (g/mol)
1	Óxido de Silicio	732.9881	60.08
2	Carbonato de sodio	240.1921	105.9885
3	Dolmita	123.1222	184.34
4	Calcita molida	81.2532	100.0869
5	Alúmina	9.2229	101.963
6	Nitrato de Sodio	4.9802	84.96
7	Sulfato de Sodio	4.9396	142.04
8	Óxido de arsénico	0.6999	197.844
9	Selenio	0.0114	78.96
10	Óxido de cobalto	0.0025	74.9326

Tabla 4.7 Cantidades de materias primas para 1 tonelada de vidrio sódico cálcico

de la tabla anterior sabemos que la cantidad total de materias primas es de 1197.41 kg, y que el rango de temperatura en el cual entrega el vidrio fundido a la garganta es de (587.941°C-1202.108°C), se puede estimar de la siguiente manera:

$$Q_v = \left(1197.41 \text{ kg} * \frac{1000\text{g}}{1 \text{ kg}}\right) * \left(0.84 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right) * (1202.108^\circ\text{C} - 587.941^\circ\text{C})$$

$$Q_v = 617,744,154.3 \text{ J}$$

$$Q_v = 617,744,154.3 \frac{\text{J}}{\text{tonelada}} + 1,976,125,447.89 \frac{\text{J}}{\text{tonelada}}$$

$$Q_v = 2,593,869,602 \frac{\text{J}}{\text{tonelada}} * \frac{1 \text{ tonelada}}{1000 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} = 2,593.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

De acuerdo al valor reportado en la

Tabla 4.1 que propone un valor de 2671kJ/kg para la fusión de un vidrio sódico cálcico, el cual es muy parecido al valor calculado que es de 2593.86 kJ/kg, estas diferencias se dan principalmente por la calidad de las materias primas que se emplean ya que por ejemplo cuando se usa un porcentaje considerable de “cullet” el requerimiento de calor se reduce ya que el cullet ya es un material vítreo.

Por tanto, podremos usar el valor de 2593.86 kJ/kg, o el valor de referencia teórico tomado de la tabla 4.1 dada la aproximación de los cálculos.

Los requerimientos de calor para la fusión del vidrio estimados en esta sección se utilizarán en el capítulo siguiente para efectos del análisis económico.

4.8 Cálculo de pérdidas de calor.

El calor perdido, que se expresa referido a la unidad de masa se descompone de la siguiente manera:

- El calor sensible de los productos de combustión que salen a la atmósfera.
- El calor perdido en las paredes del horno, el cual disminuye con el tamaño del horno.
- El calor perdido por efecto de cuerpo negro.

Se consideran las pérdidas de calor también por descuidos y fugas del sistema, como un porcentaje total de energía, según datos de campo el rango de pérdida de energía es de 0 a 15%.

4.8.1 Pérdidas de calor por cuerpo negro.

Considerar la transferencia de calor por radiación por una superficie de área A , que se encuentra a una temperatura T . La radiación que emite la superficie, se produce a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie. La rapidez de la cual se libera energía térmica Q , su valor es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Esto se conoce como la ley de *Stefan Boltzman* la ecuación queda como:

$$Q_{PCN} = \varepsilon \sigma A T_{op}^4$$

$$Q_{PCN} = \text{Pérdidas por cuerpo negro en } \frac{BTU}{h}$$

$$A = \text{área de las boquillas } ft^2$$

$$T_{op} = 1450^\circ C = 1909.7^\circ R$$

$$\varepsilon = \text{Emisividad } 0 < \varepsilon < 1$$

$$\sigma = \text{Constante de Stefan Boltzman} = 0.1713 \times 10^{-8} \text{ BTU/hft}^2 R^4$$

Cuando el cuerpo está en equilibrio con los alrededores, irradia y absorbe la misma cantidad de energía, por lo tanto su temperatura permanece constante. Cuando el cuerpo está más caliente que el ambiente, irradia más energía de la que absorbe, y por lo tanto se enfría.

Un absorbedor perfecto se llama **cuerpo negro**, que se define como un objeto ideal que absorbe toda la radiación que llega a la superficie y su emisividad es igual a uno.

Para este caso de estudio se consideran las pérdidas por aberturas en las boquillas. El horno cuenta con 6 boquillas con las siguientes dimensiones.

Boquillas	Dimensiones (cm)	Área de boquillas (cm ²)	Localización
1	50x50	2500	Alimentación
2	40x30	1200	Descarga
3	40x30	1200	Descarga
4	40x30	1200	Descarga
5	40x30	1200	Descarga
6	40x30	1200	Descarga

Tabla 4.8 Boquillas del horno

Entonces el área total es igual a la sumatoria del área de cada una de las boquillas que da un total de 8500 cm².

$$8500\text{cm}^2 * \left(\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}\right)^2 = 0.85\text{m}^2$$

Eficiencia por configuración de abertura = 0.6

Temperatura de operación del horno: 1450°C

$$1450^\circ\text{C} = 2642^\circ\text{F}$$

$$2642^\circ\text{F} + 459.67 = 3101.67^\circ\text{R}$$

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación queda:

$$Q_{PCN} = \varepsilon\sigma AT_{op}^4 = \frac{BTU}{h} \text{ ó } kW$$

$$q_{PCN} = (1) * \left(0.1713 \times 10^{-8} \frac{BTU}{hft^2R^4}\right) * (3101.67^4 \text{ } ^\circ R)$$

$$q_{PCN} = 158,540.3161 \frac{BTU}{hft^2}$$

$$Q_{PCN} = 158,540.3161 \frac{BTU}{hft^2} * \left(0.85 m^2 \frac{1ft^2}{0.0929 m^2}\right) * 0.6 = 870,322.0198 \frac{BTU}{h}$$

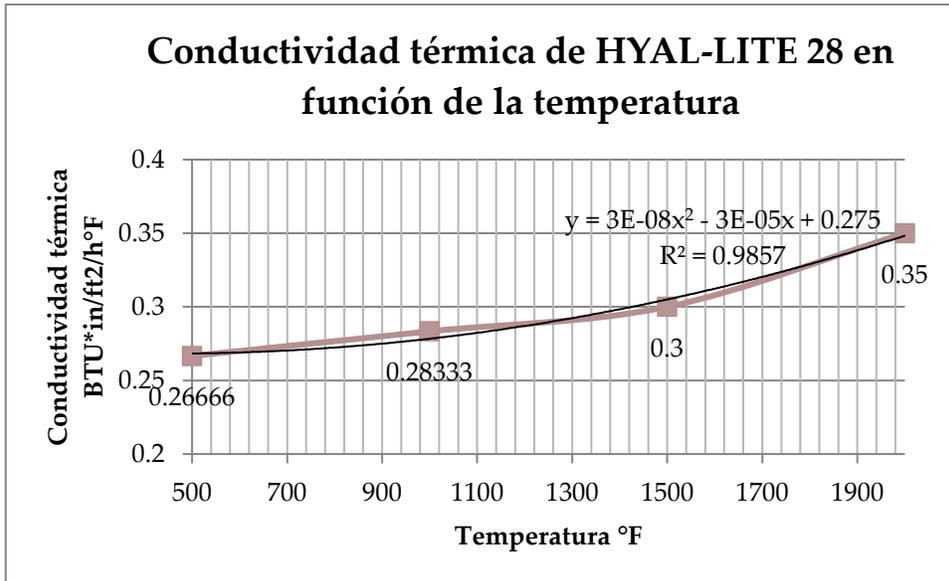
$$Q_{PCN} = 499,838 \frac{W}{m^2} * 0.85 m^2 * 0.6 = 254.912 kW$$

4.8.2 Pérdidas de calor por paredes

Se analizan las pérdidas de calor por las paredes, mediante el mecanismo de conducción al considerarse que es un problema de flujo multidimensional entre dos superficies las cuales se consideran a temperatura uniforme; si existieran otras superficies se consideran adiabáticas. Las paredes del horno están construidas en su totalidad por refractario de alta alúmina HYAL-LITE 28, este tipo de ladrillo refractario puede ser expuesto a altas temperaturas hasta los 2800°F, su composición y conductividades térmicas en función de la temperatura se muestran a continuación en la Tabla 4.9.

HYAL-LITE 28	
Componente	%
SiO	33.3
Al ₂ O ₃	60.5
Fe ₂ O ₃	0.8
MgO	0.2
TiO ₂	1
Alcalis	0.4
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	
T (°F)	K (BTU/Ft *h*°F)
500	0.26666
1000	0.28333
1500	0.3
2000	0.35

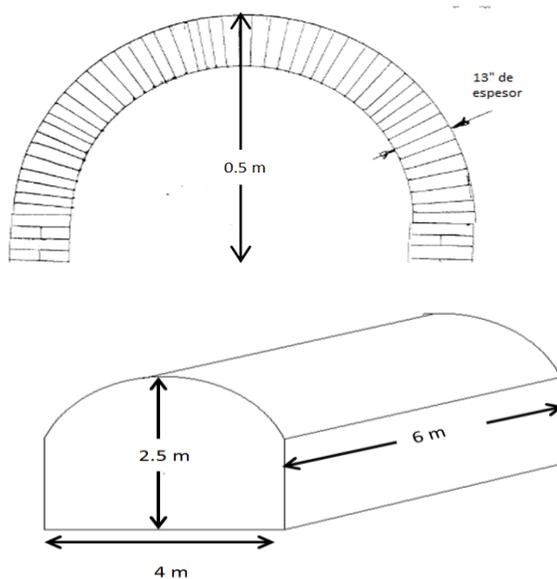
Tabla 4.9 Composición química del refractario HYLAL-LITE 28 y conductividades térmicas



Gráfica 4.1 Gráfica de conductividad térmica del HYAL-LITE 28

Fuente: Elaboración propia con datos de Global Hirt Suministros Y Servicios de la Industria S.A. de C.V. 2017

Las dimensiones del horno se muestran en la Figura 4.5



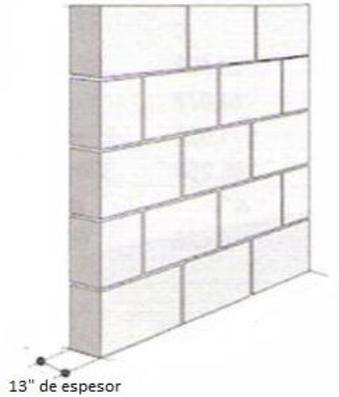


Figura 4.5 Dimensiones del Horno

Fuente: Elaboración Propia.

Para la fusión del vidrio se tiene un horno tipo Unit Melter para producción artesanal, de sección rectangular, cuyas paredes en su totalidad han sido aisladas con HYAL-LITE 28 con 13" de espesor, las condiciones ambientales bajo las cuales operara el horno son las siguientes:

$$T_{amb} = \text{Temperatura ambiente } 25^{\circ}\text{C} = 77^{\circ}\text{F}$$

$$V_{viento} = \text{Velocidad del viento } 0.25 \frac{ft}{s}$$

$$\varepsilon = \text{emisividad } 0.45$$

$$k = 3 \times 10^{-8}(T^2) - 3 \times 10^{-5}(T) + 0.275$$

El horno opera a una temperatura de 1450°C. Con los datos ya conocidos se calculan las temperaturas externas de las paredes del horno.

Text °F	h conv BTU/h ft ² °F	h rad BTU/h ft ² °F	q conv-rad BTU/h ft ²	T 1-2 °F	T1 prom °F	k 1 BTU/h ft °F	q cond BTU/h ft ²	Text °F	Diferencia
168.8	1.02524	0.61343	150.430	2084.07	2363.04	0.37163	848.407	410.062846	0.0000
410.06	1.41497	1.13231	848.407	168.80	1405.40	0.29209	601.783	339.909433	0.0000
339.91	1.33373	0.95521	601.783	410.06	1526.03	0.29908	635.552	350.197945	0.0000
350.20	1.34659	0.97975	635.552	339.91	1490.95	0.29696	628.221	347.985059	0.0000
347.99	1.34386	0.97443	628.221	350.20	1496.10	0.29727	629.477	348.364997	0.0000
348.36	1.34433	0.97534	629.477	347.99	1494.99	0.29720	629.233		

Tabla 4.10 Cálculo de temperatura externa de las paredes.

	Temperatura externa (°F)	Área de pared (m ²)
Pared Derecha	348.36	12 m ²
Pared izquierda	348.36	12 m ²
Pared trasera	348.36	12 m ²
Techo	261.13	12 m ²
TOTAL		48 m²

Tabla 4.11 Temperaturas de las paredes.

$$A = 48 \text{ m}^2 = 516.6677 \text{ ft}^2$$

$$\text{Flux de calor promedio} = 620 \frac{\text{BTU}}{\text{hft}^2}$$

$$Q_{PP} = 620 \frac{\text{BTU}}{\text{hft}^2} * 516.6677 \text{ ft}^2 = 320,333.974 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

$$Q_{PP} = 1,954.70 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} = 93.83 \text{ kW}$$

Pérdidas de calor	BTU/h	kW
Pérdidas por pared	320,333.97	93.83
Pérdidas por cuerpo negro	870,322.02	254.91
Total	1,190,656	348.74

Tabla 4.12 Pérdidas de calor

4.9 Análisis de la eficiencia de los sistemas de combustión

Los cálculos se realizaron con ayuda de Excel, para determinar la temperatura adiabática de flama para el sistema Gas Natural-Aire se realizaron 11 cálculos variando el *exceso de aire*, para determinar la influencia del exceso sobre la temperatura y analizar posteriormente los resultados y así para ver los efectos de este sobre el consumo de combustible y aumento o disminución de la temperatura adiabática de flama, así como la eficiencia de dicho sistema en función de las variables modificadas. De este modo los resultados obtenidos nos permitirán comparar los sistemas de combustión utilizando aire y oxígeno al 100%.

4.9.1 Sistema. Aire-Gas Natural

La temperatura de operación del horno es de 1450 °C (1723.15 K). Como dato de campo de tiene que la temperatura de los gases de chimenea para un horno tipo Unit Melter es de 1500°C (1773.15).

Las condiciones de entrada del combustible y el aire para los casos aquí estudiados son las se supondrán condiciones estándar 25°C y 1.01325 bar.

4.9.1.1 Cálculo de Temperatura adiabática de flama.

Para el cálculo de la temperatura adiabática de flama:

Componentes	Fracción mol	A	B*10 ³	C*10 ⁶	D/10 ⁵	Tmax (T en K)
CH4	0.8960	1.702	9.081	-2.164	0.000	1,500
C2H6	0.0600	1.131	19.225	-5.561	0.000	1,500
C3H8	0.0250	1.213	28.785	-8.824	0.000	1,500
C4H10	0.0130	1.935	36.915	-11.402	0.000	1,500
CO2	0.0040	5.457	1.045	0.000	-1.157	2,000
N2	0.0020	3.280	0.593	0.000	0.040	2,000
O2		3.639	0.506	0.000	-0.227	2,000
H2O		3.470	1.450	0.000	0.121	2,000

Tabla 4.13 Ecuaciones para cálculo de capacidades caloríficas.

Fuente: Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química Smith y Van Ness 1997.

El cálculo de la Temperatura adiabática se realiza en 3 etapas:

Las temperaturas se emplean en K.

Etapa 1.

Reactivos (T, P) estándar 25°C y 1.01325 bar.

$$\Delta H^{\circ}_1 = \sum_{\text{reactivos}} n \int_{T_1}^{298.15} C_p dt = \Delta H_{\text{aire}} + \Delta H_{GN}$$

Etapa 2.

Reactivos (T, P) estándar-----Productos(T,P) estándar

$$\Delta H_2^{\circ} = \sum \Delta H^{\circ}_{\text{productos}} - \sum \Delta H^{\circ}_{\text{reactivos}}$$

Etapa 3.

Productos(T,P) estándar-----Productos (T₂,P°)

$$\Delta H_3 = \sum_{\text{productos}} n \int_{298.15}^{T_{\text{adiabática}}} C_p dt = \Delta H^{\circ}_1 + \Delta H_2^{\circ}$$

Recordando que:

$$C_p = R[A + BT + CT^2 + DT^3] \quad \text{donde } R = 8.3114 \frac{J}{Kmol}$$

El programa en Excel se desarrolló de la siguiente manera, utilizando la función

Solve para el cálculo de la T adiabática:

	GAS NATURAL	Flujo molar	AIRE	Flujo molar	Gases de Combustión	
	Fracción mol		Fracción mol		Fracción mol	Flujo molar
		(mol/h)		(mol/h)		(mol/h)
CH4	0.8960	12,050.45				
C2H6	0.0600	806.95				
C3H8	0.0250	336.23				
C4H10	0.0130	174.84				
CO2	0.0040	53.80			0.096421	15,426.19
N2	0.0020	26.90	0.773463	112,567.33	0.703767	112,594.23
O2			0.204366	29,742.82	0.000000	0.00
H2O			0.022171	3,226.68	0.199812	31,967.54
TOTAL	1.0000	13,449.16	1.0000	145,536.84	1.000000	159,987.96

Para el cálculo de los Cp se utilizan las constantes de la Tabla 4.13 Ecuaciones para cálculo de capacidades caloríficas.

	Gas Natural	Aire Ambiente	Temperatura Adiabática (K)
	(mol/h)	(mol/h)	2273.60
CAPACIDAD CALORIFICA (J/mol K)			
CH4	35.061	35.061	92.803
C2H6	52.949	52.949	133.812
C3H8	74.916	74.916	174.969
C4H10	99.166	99.166	223.856
CO2	37.139	37.139	64.937
N2	29.114	29.114	38.486
O2	29.386	29.386	39.783
H2O	33.576	33.576	56.278
H (kJ/h)	-1,043,996.97	-780.269.74	-1,824,266.72

Utilizando la función objetivo en función de la celda que contiene el valor de la T adiabática:

$$Q_{\text{máx}} = \text{Entalpía del Gas Natural} + \text{Entalpía del aire} - \text{Entalpía con } T \text{ adiabática}$$

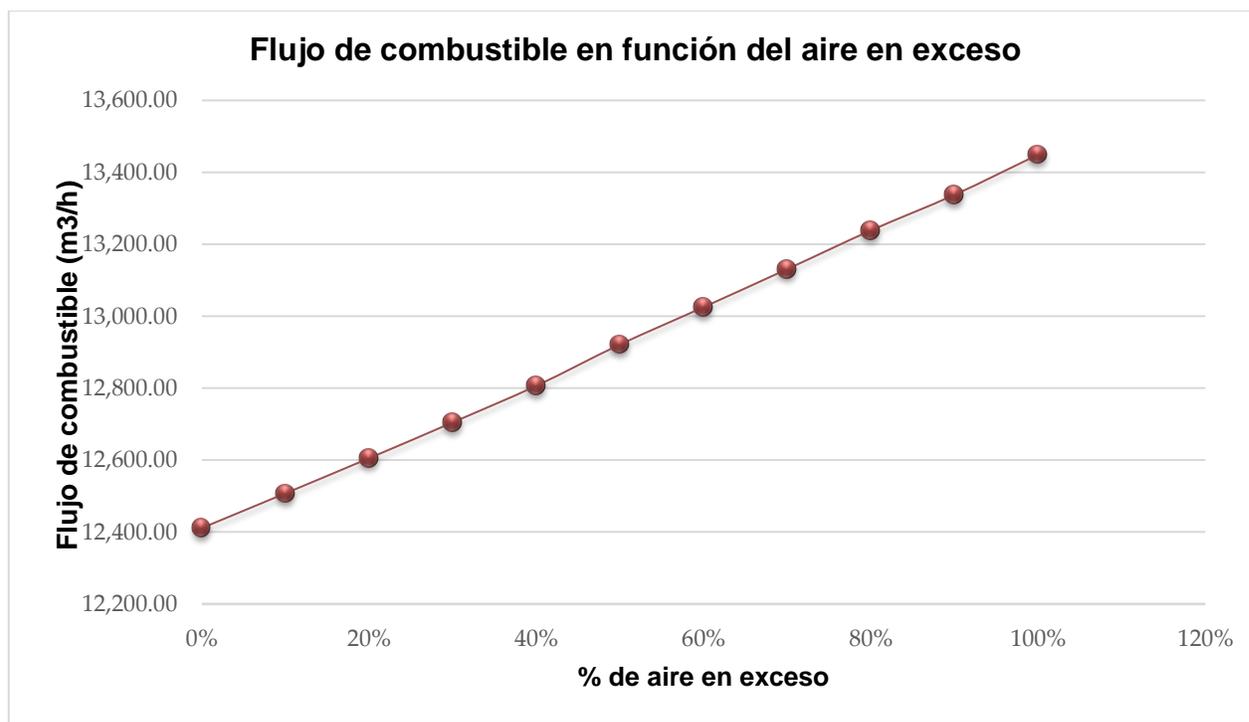
Cuando $Q_{\text{máx}} = 0$ se ha encontrado la temperatura adiabática.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

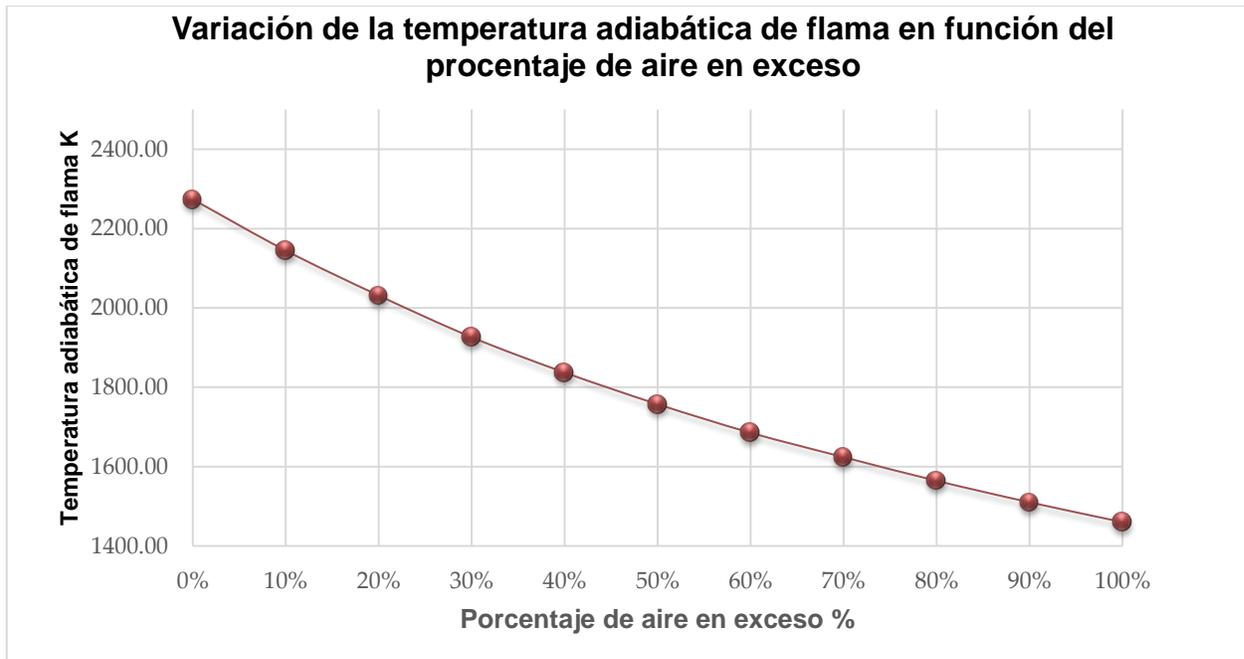
Se obtuvo una temperatura de flama adiabática de 2273.60 K \approx 2000.45 C, mientras que lo reportado por diversos autores es un rango de (1918 °C a 1973 °C) para una flama con aire estequiométrico, por tanto, los datos obtenidos son acertados. 0% de aire de exceso. Los datos obtenidos se resumen en donde se muestra la influencia del exceso de aire en un proceso de combustión.

Temperatura de flama K	Porcentaje de aire en exceso (%)	Flujo de combustible (m ³ /h)	Flujo de aire m ³ /h
2273.60	0%	12,411.21	145,536.84
2144.53	10%	12,507.77	158,761.89
2031.22	20%	12,605.24	171,769.23
1926.09	30%	12,704.90	184,564.19
1837.09	40%	12,806.69	197,151.19
1757.3	50%	12921.27	209,483.97
1685.37	60%	13025.3	221,669.52
1623.83	70%	13131.01	233,720.98
1564.24	80%	13238.46	245,528.22
1510.13	90%	13,337.54	257,088.47
1460.13	100%	13,449.16	268,530.20

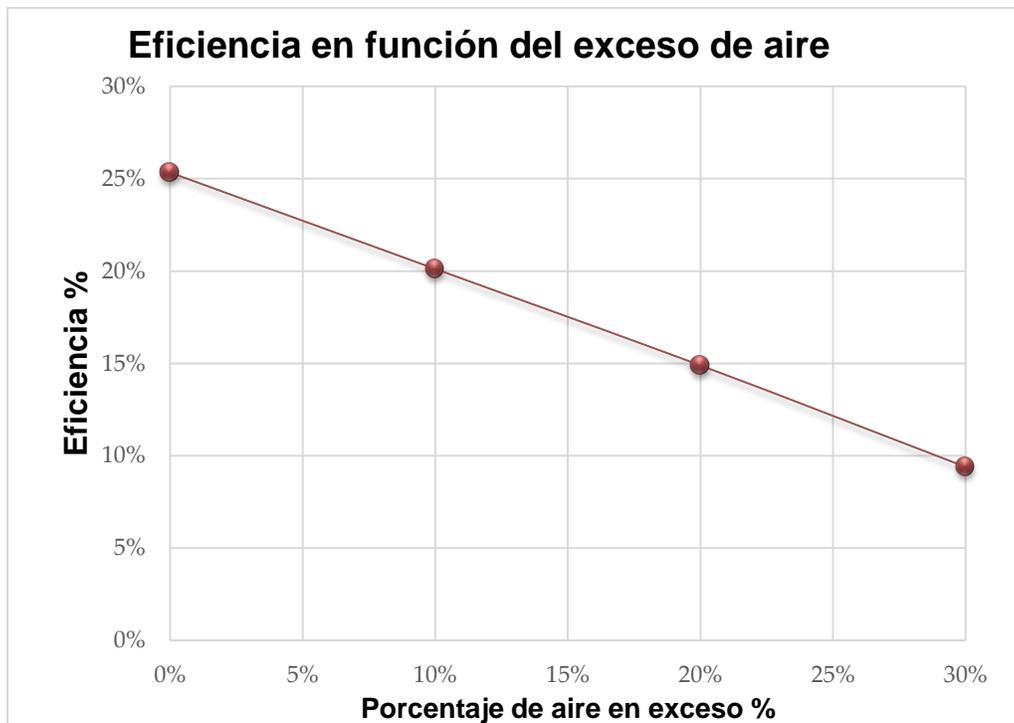
Tabla 4.14 Temperaturas adiabáticas en función del % de aire en exceso.



Gráfica 4.1 Flujo de combustible en función del aire en exceso



Gráfica 4.2 Variación de la temperatura adiabática de flama en función del porcentaje de aire en exceso



Gráfica 4.3 Eficiencia en función de exceso de aire

4.9.2 Sistema 100% Oxígeno-Gas Natural (AOF)

De acuerdo a los objetivos de este trabajo, se pretende mostrar las ventajas de la aplicación de oxígeno mediante la técnica All Oxy Fuel (AOF), que consiste en la sustitución completa de los quemadores de aire por quemadores oxígeno combustible.

Esta técnica elimina la necesidad de un precalentador de aire de combustión o dispositivo de recuperación de calor así como reduce el consumo de energía significativamente, logrando así una temperatura de flama más alta y un menor flujo de combustible.

Mediante los cálculos efectuados se obtiene que la temperatura de flama del sistema AOF es de 3076 K (2802 °C) comparado con lo reportado por la literatura de 2760 °C es el valor aceptable.

4.10 Comparación entre los Sistemas de Combustión convencional con aire y el sistema AOF.

De acuerdo a los datos obtenidos anteriormente se pueden comparar ambos sistemas para establecer los beneficios que se obtienen al usar un sistema de combustión 100% Oxígeno.

Basados en las temperaturas de flama adiabática se logran obtener las eficiencias de ambos sistemas mediante la siguiente ecuación, considerando la temperatura de los gases de 1500 °C (1773.15 K) por regla heurística.

$$\eta = \frac{T_{flama} - T_{gases}}{T_{flama} - T_{ambiente}}$$

- Eficiencia para un sistema de combustión convencional con aire-gas natural

$$\eta_{aire} = \frac{2273.60 - 1773.15}{2273.60 - 298.15} = 0.223 = \mathbf{25.3\%}$$

- Eficiencia para un sistema de combustión AOF-gas natural

$$\eta_{AOF} = \frac{3076 - 1773.15}{3076 - 298.15} = 0.427 = \mathbf{46.7\%}$$

De acuerdo con los cálculos desarrollados en las secciones 4.9.1.1 se puede apreciar que para el sistema aire-gas natural las temperaturas de flama adiabáticas obtenidas son menores que para el sistema AOF cuya temperatura de flama es más elevada, debido a que no arrastra componentes como el nitrógeno contenido en el aire y el calor producido es aprovechado para elevar la temperatura de flama, y por tanto generar una eficiencia mayor.

Podemos observar que la eficiencia de un sistema AOF es 52% mayor, que la eficiencia de un sistema AOF, aunque es evidente las ventajas que el sistema de combustión con oxígeno puro, en el capítulo 5 se mostrará un caso de estudio aplicado a un horno de tipo Unit Melter donde se verá de manera más completa el análisis económico del uso de oxígeno en hornos de fusión de vidrio.

Capítulo 5

Análisis económico del uso de Oxígeno en Hornos de Fusión de Vidrio

*<<Es preferible obtener una respuesta razonable aproximada pero rápida que le indique si el
diseño funciona o no, que invertir tiempo y obtener el mismo resultado solo que con más
decimales >>*

Robett L. Norton

5.1 Introducción

Todos los procesos de combustión requieren de la participación de un comburente para llevar a cabo dicho proceso, siendo principalmente el oxígeno obtenido a partir del aire.

Ya que en la realidad los procesos de combustión no se llevan a cabo de acuerdo a lo que marca la estequiometría, a modo de alcanzar estos resultados se tiene que recurrir a prácticas comunes como es utilizar el aire de exceso, que lejos de garantizar una combustión estequiométricamente correcta, agrega a la reacción mayores porcentajes de nitrógeno, lo que hace que el calor generado sea absorbido en gran proporción por este componente y eliminado a través de los gases de chimenea.

La sustracción de nitrógeno disminuye la energía de activación y permite una mayor cantidad de colisiones entre las moléculas oxidante y combustible en la unidad de tiempo, aumentando de esta manera la velocidad de reacción y disminuyendo la energía necesaria para que se activen las reacciones de cadena que inician la propagación y auto-sostenimiento de la combustión.

La ausencia de nitrógeno en una reacción de combustión produce diversas ventajas, como lo es el aumento en la temperatura de flama, mejora la transferencia de calor, reduce emisiones a la atmósfera y se aprovecha mejor la energía del combustible.

El uso de O_2 puro ofrece ventajas ya que proporciona alta eficiencia térmica al sistema de combustión cuando entra en sustitución de aire, esta ventaja no solo se traduce en términos de energía sino también en beneficios económicos, como son el incremento de la producción, y un ahorro considerable en consumo de combustible, dado que este último implica un alto costo de fusión, es necesario utilizar técnicas que contribuyan a hacer una combustión más eficiente.

Sin embargo, la implementación de la combustión oxicomcombustible en plantas existentes exige algunas adecuaciones como la instalación de dispositivos de producción de O₂ y equipos de distribución de gases, por ende esta tecnología es más susceptible de aplicarse a plantas nuevas.

Muchas empresas usan oxígeno industrial criogénico, lo cual aumenta el costo del proceso. Sin embargo, hay que destacar que en los últimos años se ha venido dando una migración hacia el desarrollo de sistemas integrados con generación de O₂ *in-situ* a través de membranas.

5.2 Implementación de la Oxicomcombustión

La utilización de procesos de combustión con aire enriquecido con oxígeno en los procesos industriales de alta temperatura se ha extendido a sectores como la producción de acero, vidrio y cemento, fusión de metales y calderas supercríticas.

En 1990 Praxair & Gallo realizaron estudios donde se identifican como candidatos a la aplicación de esta técnica procesos de alta temperatura (>1400 K), con bajas eficiencias térmicas, altas emisiones contaminantes y limitaciones en los gases de combustión. Los procesos de fabricación de vidrio son candidatos ideales para la implementación de esta técnica.

En la mayoría de las aplicaciones, el costo adicional del oxígeno se compensa con el valor derivado del incremento en la producción a través de la eficiencia, así como la optimización en el consumo energético, resultado de la disminución de pérdidas de calor en el sistema global.

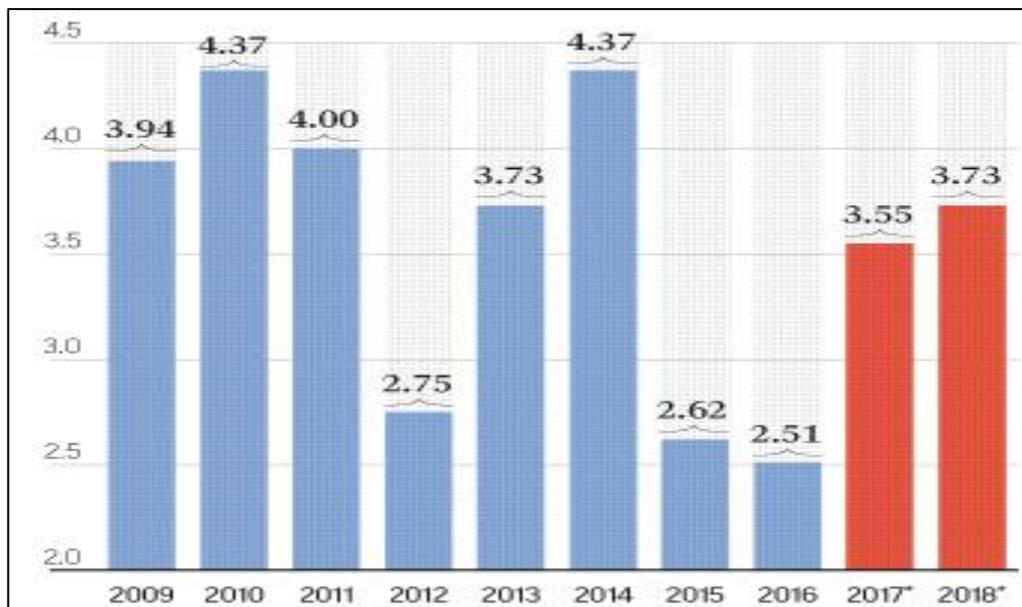
5.2.1 Gas Natural

El precio del gas ha venido aumentando los últimos dos años. Lo anterior impacta a la industria manufacturera mexicana y a las tarifas de electricidad en este país, toda vez que este combustible es la mayor materia prima para la producción de energía eléctrica

El precio spot del gas natural medido por el Henry Hub promedió 2.51 dólares por millón de BTU (mmBTU) en 2016 y se espera que promedie 3.55 en 2017 y luego 3.73 dólares en 2018.

Las razones del incremento son multifactoriales e incluyen una disminución en los inventarios, menor producción, mayores temperaturas en verano y mayor demanda del sector eléctrico.

Parte de la tendencia al alza en el precio del energético prevista para este año ya se hizo patente en los precios observados en los primeros días del 2017, cuando el indicador estuvo entre 30 y 60 por ciento por arriba de los niveles a los que se vendió en los primeros días de 2016, según datos recopilados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE).



Gráfica 5.1 Precio del Gas natural estimaciones por año¹

A finales del 2016 el precio subió hasta 3.90 dólares por millón de BTUs (mmBTU), luego cayó hasta 3.10 para regresar a un nivel más estable que ronda los 3.30 dólares por mmBTU. Lo anterior llevaría a la CFE a incrementar sus

¹ Fuente: Agencia de Información Energética de Estados Unidos 2017

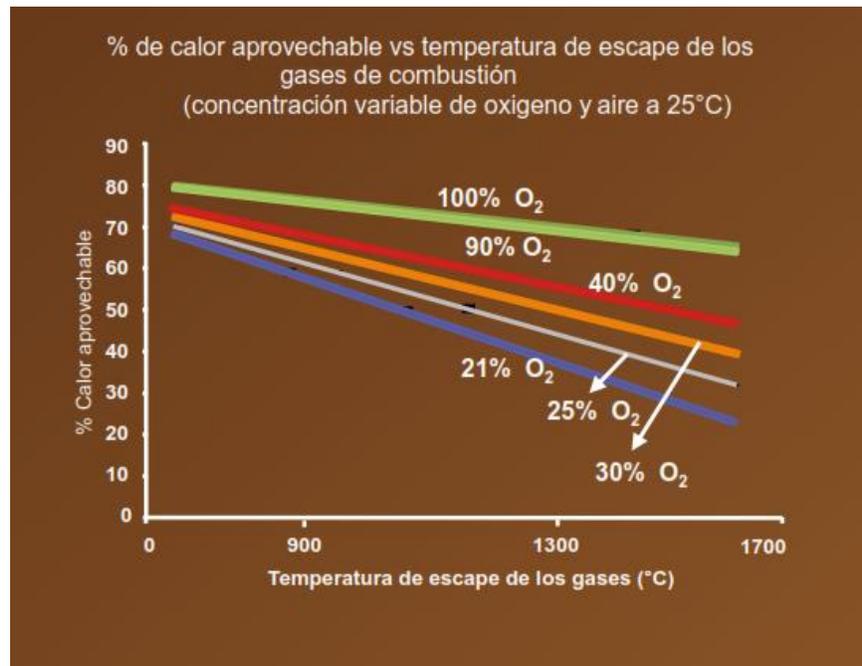
tarifas industriales ya que el gas natural es el principal insumo para la generación de electricidad en este país.

5.2.2 Oxígeno

El uso de oxígeno es indispensable para mejorar la eficiencia de operación de los hornos de fusión de vidrio a través de métodos como:

- Pre-mezclado en el aire para combustión
- Lanceado de oxígeno a través del quemador
- Oxi-Combustible
- Conversión parcial
- Conversión Total

Los sistemas normales, se basan en la combustión del gas natural con aire, el cual tiene aproximadamente 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno. De esta forma una gran cantidad de calor es absorbida por el nitrógeno, disminuyendo la capacidad del horno para fundir vidrio, demandando mayor cantidad de energéticos al sistema y generando grandes cantidades de NOx.

Figura 5.1 Eficiencia térmica a diferentes concentraciones de oxígeno

Fuente: www.infra.com.mx

Al observar la figura 5.1 vemos que, si la concentración de oxígeno se incrementa en el aire de combustión, aumentará la temperatura de flama y se tendrá mayor cantidad de calor disponible para el proceso de fusión, logrando una mayor eficiencia del horno.

5.3 Equipos para instalación del sistema AOF

a. Tanques Criogénicos

Consta de un recipiente interior de acero inoxidable para soportar bajas temperaturas; y uno exterior de acero al carbono, aislados entre sí por una combinación de alto vacío y material aislante.

Regulación de presión: Los tanques criogénicos tienen un sistema que vaporiza líquido para aumentar la presión cuando ésta baja, a medida que se descarga el tanque criogénico. En caso de presión excesiva, entrega gas a la línea de consumo, con lo que la presión baja rápidamente. Este sistema está diseñado

para que el tanque criogénico trabaje a una presión constante adecuada a las necesidades del usuario. Su presión máxima es de 235 psig



Figura 5.2 Tanque criogénico

Fuente: www.praxair.com.mx

Elementos de seguridad: Los tanques criogénicos están equipados con válvulas de alivio y discos de ruptura, para dejar escapar el gas si hay un aumento excesivo de presión a causa de algún imprevisto.

Capacidad: Los tanques criogénicos varían en su capacidad dependiendo de las necesidades de los usuarios, generalmente los proveedores de este servicio manejan las siguientes capacidades.

Capacidad de líquido (gal)	Capacidad equivalente de gas a 21 °C, 1 atm (pies3)	
	Oxígeno	Nitrógeno
900	103590	83799
1500	172650	139665
3000	345300	279330
6000	609600	558660
13000	1496300	1210430
15000	1726500	1396650

Tabla 5.1 Capacidades para tanques criogénicos

Fuente: www.infrasal.com

b. Vaporizadores

El calor proporcionado por el aire ambiente tiene la ventaja significativa de costo cero. En el caso de vaporizadores de vapor natural también hay los beneficios de cero mantenimientos y cero impactos en el medio ambiente. Además de vaporizadores de convección natural, el aire puede ser forzado por los ventiladores para aumentar las tasas de transferencia de calor y minimizar el área de transferencia requerida. Los vaporizadores de aire ambiente pueden utilizarse para vaporizar nitrógeno, oxígeno, argón, CO₂, amoníaco, cloro, GNL, etileno y todos los demás criogénicos y gases licuados.



Figura 5.3 Vaporizador Ambiental

Fuente: www.praxair.com

Estos están contruidos normalmente de una serie de extrusiones de aluminio con aletas con un centro de 12 pulgadas de espaciamiento entre centros que proporcionan un crecimiento de hielo extendido. El vaporizador del estante del hielo se construye específicamente como precursor a los vaporizadores estándar para acumular hielo. Los megafins, con un perfil de aletas de dieciséis aristas, proporcionan la mayor superficie por pie del mercado. Las unidades forradas de acero inoxidable / Monel / latón están disponibles para aplicaciones de alta presión y especiales. Las unidades estándar están disponibles para hasta 200,000 SCFH.

Los Vaporizadores Ambientales de Ventilador reducen la cantidad de área de trazado requerida por los vaporizadores de vapor natural añadiendo un ventilador (es) eléctrico (es).

5.4 Caso de Estudio

DATOS DE OPERACIÓN DE HORNO TIPO UNIT MELTER

Se proponen los siguientes datos basados en la operación de un horno de tipo Unit-Melter para fusión de Vidrio. El horno trabaja de la siguiente manera:

Horas por turno: 8 Toneladas/día
Turnos por día: 3
Días por mes: 30
No. de horas por mes: 720 h / mes

Balance

Esquema de producción:

24 h para fusión de vidrio

Calor requerido para fundir el vidrio: $Q_v = 2593.86 \text{ kJ/kg}$ ← de capítulo 4 sección 4.7

Demanda de calor de fusión:

$$Q_V = V_f * Q_v \tag{Ec. 5.1}$$

Donde:

$Q_v =$ Energía térmica necesaria para la fusión de vidrio de acuerdo a la producción propuesta para eel caso de estudio en kJ/kg

$V_f =$ Velocidad de fusión en kg/h

$$V_f = 8 \frac{\text{toneladas}}{\text{día}} * \frac{\text{día}}{24 \text{ h}} = 0.333 \frac{\text{ton}}{\text{día}} = 333.33 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_V = V_f * Q_v = 2593.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 333.33 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 863 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

	BTU/h	kW
Demanda de calor para fusión de Vidrio (Q_V)	819,980	240.17

Pérdidas de calor

Del capítulo 4 sección 4.8 se tiene:

Pérdidas de calor	BTU/h	kW
Pérdidas por pared (Q_{PP})	320,333.97	93.83
Pérdidas por cuerpo negro (Q_{CN})	870,322.02	254.91
Total	1,190,656	348.74

Calor total requerido

$$Q_{TR} = Q_{CN} + Q_{PP} + Q_V \tag{Ec. 5.2}$$

Donde:

$$Q_{TR} = \text{Calor total requerido en } \frac{BTU}{h} \text{ ó } kW$$

$$Q_{CN} = \text{Pérdidas de calor por cuerpo negro } \frac{BTU}{h} \text{ ó } kW$$

$$Q_{PP} = \text{Pérdidas por pared } \frac{BTU}{h} \text{ ó } kW$$

	BTU/h	kW
Calor total requerido (Q_{TR})	2,010,636	588.92

- **Sistema Aire-Gas Natural**

Eficiencia térmica

Temperatura del aire de combustión: 25°C

Temperatura de flama alcanzada: 2000.6° C ← de tabla 4.13

Temperatura de gases en chimenea: 1500° C ← dato aproximado en campo

Temperatura ambiente: 25°C

$$\eta = \frac{T_{flama} - T_{gases}}{T_{flama} - T_{ambiente}} \quad (Ec. 5.3)$$

Eficiencia térmica: η 25.3%

Requerimiento de calor efectivo

$$\frac{Q_{TR}}{\eta} = Q_{TE} \quad (Ec. 5.4)$$

	BTU/h	kW
Calor total requerido (Q_{TR})	2,010,636	588.92
Calor total efectivo (Q_{TE})	7,934,904	2,324.13

Poder calorífico del gas natural

PC GN = 37236 kJ/Nm³

Flujo de gas Requerido: 224.70Nm³/h

Consumo específico 674.10 Nm³/TON

Gastos de operación del sistema Aire-Gas Natural

- Horas trabajadas por mes

$$\left(\frac{24h}{día}\right) * \left(\frac{30 días}{mes}\right) = 720 \frac{h}{mes}$$

- Capacidad horaria

$$\left(8 \frac{ton}{día}\right) * \left(\frac{1día}{24h}\right) = 0.333 \frac{TON}{h}$$

- Producción mensual

$$\left(0.333 \frac{TON}{h}\right) * \left(720 \frac{h}{mes}\right) = 240 \frac{TON}{mes}$$

- Consumo horario de gas natural

$$224.10 Nm^3/h$$

- Consumo específico de Gas Natural

$$\frac{(224.70 Nm^3/h)}{333 \frac{kg}{h} * \frac{1 TON}{1000 Kg}} = 674.10 \frac{Nm^3}{TON}$$

- Gastos del sistema Aire-Gas Natural
 - Gasto mensual de Gas Natural

$$\left(224.70 \frac{Nm^3}{h}\right) * \left(\frac{\$3.69}{Nm^3}\right) * \left(720 \frac{h}{mes}\right) = \$597,051/mes$$

Tarifa de gas Natural HM

- Potencia eléctrica (por efecto del ventilador de aire)

$$(22.371 kW) * \left(720 \frac{h}{mes}\right) * (\$1.38/kW) = \$22,163/mes$$

- Gastos mensuales del sistema Aire-GN

$$\$597,051/mes + \$22,163/mes = \$619,214/mes$$

- Costo específico de Gas Natural

$$\frac{\$597,051/mes}{240 \frac{TON}{mes}} = \$2,487.71/TON$$

- Costo específico de producción

$$\frac{\text{Gastos mensuales Aire - GN} \frac{\$}{TON}}{\text{Producción mensual} \frac{TON}{mes}} = \frac{\$619,214}{240 \frac{TON}{mes}} = \$2,580.06/TON$$

En la

Tabla 5.2 se presentan el resumen de los resultados obtenidos para una producción diarias de 8 toneladas empleando un sistema de combustión convencional Aire-Gas Natural.

Producción mensual:	240	TON / mes
Velocidad de fusión	333.333	kg/h
Producción diaria:	8	TON / día
Horas trabajadas por mes:	720	h / mes
Capacidad horaria:	0.3333	TON / h
Consumo específico de gas natural:	674.10	Nm ³ /TON
Flujo de gas natural	224.70	Nm ³ /h
Precio del gas natural:	\$3.69	/ Nm ³
Potencia eléctrica el sistema:	22.371	kW
Precio de la energía eléctrica:	\$1.38	/ kW
Mantto Sistema Combustión Actual	\$0.00	/ mes
Precio de venta del Vidrio:	\$10,000.00	/ TON
Costo específico del Gas Natural	\$ 2,487.71	/TON
Costo específico de producción:	\$2580.06	/TON

Tabla 5.2 Resultados del sistema-Aire Gas Natural

- **Sistema Oxígeno-Gas Natural**

Eficiencia térmica

Temperatura del aire de combustión: 25°C

Temperatura de flama alcanzada: 2802° C ← de sección 4.9.2

Temperatura de gases en chimenea: 1500° C ← dato de campo

Temperatura ambiente: 25°C

Eficiencia térmica: η 46.9%

Demanda de calor de fusión:

$$V_f = 10.4 \frac{\text{toneladas}}{\text{día}} * \frac{\text{día}}{24 \text{ h}} = 0.4333 \frac{\text{ton}}{\text{día}} = 433.33 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_v = V_f * Q_v = 2593.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 433.333 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 1,124,006 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$Q_v = 312.22 \text{ kW} = 1,065,974 \text{ BTU/h}$$

Requerimiento de calor efectivo

	BTU/h	kW
Calor total requerido (Q_{TR})	2,256,630	660.97
Calor total efectivo (Q_{TE})	4,813,105	1,406.76

Para efectos del consumo de combustible, se considera como si el de fusión más el de sostenimiento se consumieran solamente durante la fusión:

	kW	BTU/h
Q	4,813,105	1,406.76

Poder calorífico del gas natural

$$PC\ GN = 37236\ kJ/Nm^3$$

Flujo de gas Requerido: $136.30\ Nm^3/h$

Consumo específico: $314.53\ Nm^3/TON$

Gastos de operación del sistema AOF

- Horas trabajadas por mes

$$\left(\frac{8h}{día}\right) * \left(\frac{30\ días}{mes}\right) * (3\ turnos) = 720\ \frac{h}{mes}$$

- Capacidad horaria (aumentando 30% la producción)

$$\left(10.4\ \frac{ton}{día}\right) * \left(\frac{1día}{24h}\right) = 0.433\ \frac{TON}{h}$$

- Producción mensual

$$\left(0.433\ \frac{TON}{h}\right) * \left(720\ \frac{h}{mes}\right) = 312\ \frac{TON}{mes}$$

- Consumo horario de gas natural

$$136.30\ Nm^3/h$$

- Consumo específico de Gas Natural

$$\frac{(136.30 \text{ Nm}^3/h)}{433.33 \frac{\text{kg}}{h} * \frac{1 \text{ TON}}{1000 \text{ Kg}}} = 314.53 \frac{\text{Nm}^3}{\text{TON}}$$

- Gastos del sistema AOF
 - Gasto mensual por consumo de Gas Natural

$$\left(136.30 \frac{\text{Nm}^3}{h}\right) * \left(\frac{\$3.69}{\text{Nm}^3}\right) * \left(720 \frac{h}{\text{mes}}\right) = \$362,163/\text{mes}$$

Tarifa de gas Natural HM

- Gasto mensual por consumo de Oxígeno

$$\left(118.13 \frac{\text{Nm}^3}{h}\right) * \left(\frac{\$2.25}{\text{Nm}^3}\right) * \left(720 \frac{h}{\text{mes}}\right) = \$196,365.20/\text{mes}$$

Renta de equipo criogénico = \$5,000.00/mes

- Gastos mensuales del sistema AOF

$$\$362,163/\text{mes} + \$5,000.00/\text{mes} + \$196,365.20/\text{mes} = \$558,528/\text{mes}$$

- Costo específico de Gas Natural

$$\frac{\$558,528/\text{mes}}{312 \frac{\text{TON}}{\text{mes}}} = \$\text{TON}$$

- Costo específico de producción

$$\frac{\text{Gastos mensuales AOF } \$/\text{TON}}{\text{Producción mensual TON/mes}} = \frac{\$558,528/\text{mes}}{312 \frac{\text{TON}}{\text{mes}}} = \$1790.15/\text{TON}$$

En la Tabla 5.3 se presentan el resumen de los resultados obtenidos para una producción diarias de 10.4 toneladas empleando un sistema de combustión AOF considerando un incremento del 30% con respecto a la producción con un sistema Aire-Gas Natural.

Producción mensual:	312.000	TON / mes
Velocidad de fusión	433.333333	kg/h
Producción diaria:	10.40	TON / día
Horas trabajadas por mes:	720.0	h / mes
Capacidad horaria:	0.433	TON / h
Consumo específico de gas natural en el horno:	314.54	Nm ³ /TON
Flujo de gas natural en el horno:	136.30	Nm ³ /h
Precio del gas natural:	\$3.69	/ Nm ³
Consumo específico de oxígeno en el horno:	272.60	Nm ³ /TON
Flujo de oxígeno en el horno:	118.13	Nm ³ /h
Precio del oxígeno:	\$2.25	/ Nm ³
Renta mensual del eq. Criogénico	\$5,000.00	/ mes
Potencia eléctrica el sistema:	0	kW
Precio de la energía eléctrica:	\$1.38	/ kW
Precio de venta del vidrio al mercado:	\$10,000.00	/ TON
Costo específico del GN	\$ 1,160.78	/TON

Tabla 5.3 Resultados del sistema AOF

Figura 5.4 Diagrama de Sankey para un horno tipo Unit-Melter con sistema de combustión convencional

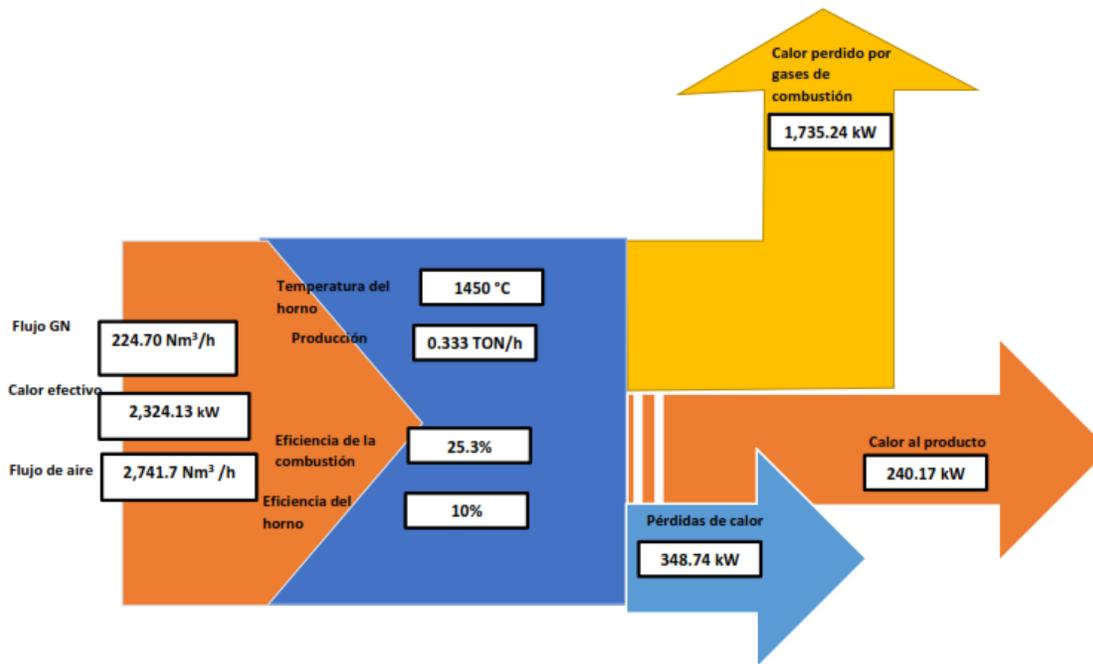
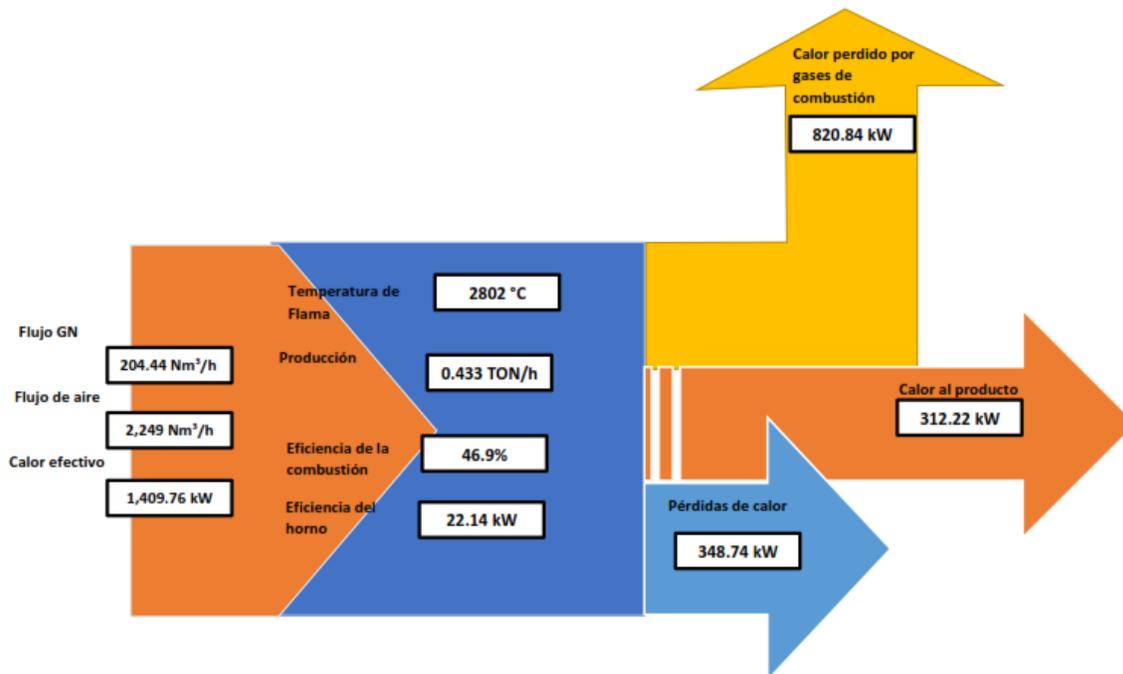


Figura 5.5 Diagrama de Sankey para un horno tipo Unit-Melter con sistema de combustión con oxígeno



En las figuras Figura 5.4 y Figura 5.5 se puede apreciar de manera visual mediante un diagrama de Sankey la distribución de calor dentro del horno, así mismo de modo comparativo se establecen las diferencias que existen en ambos sistemas, como lo son el aumento de la producción y la reducción de pérdidas por gases de combustión en el caso de un sistema AOF, mientras que para un sistema de combustión convencional con aire las pérdidas por gases de combustión son mayores.

Tabla 5.4 Tabla comparativa de los sistemas Aire-GN vs AOF

Tabla 5.4 se pueden comparar los resultados obtenidos, con ambos sistemas con la finalidad de visualizar las diferencias entre ellos a modo de enfatizar las ventajas del sistema AOF comparado con sistema de combustión convencional, en un horno para fusión de vidrio tipo UNIT-MELTER.

De la tabla 5.3 podemos observar utilizando un sistema AOF se obtiene reducciones en consumo de combustible, pese a un aumento del 30% en la producción, por ende, el flujo de combustible de un 39% lo que equivale a un flujo de 88.40 Nm³/h de gas natural, así pues la reducción de gastos por consumo de energía eléctrica por la eliminación de ventiladores de aire.

En lo que respecta a los costos de producción se obtienen reducciones del 30 %, comparado con un sistema convencional.

Conclusiones

Durante el trabajo de investigación se estudiaron dos sistemas de combustión: *Aire-Gas Natural* y *AOF*, con la finalidad de establecer las ventajas económicas cuando se sustituye el aire por oxígeno en hornos de fusión de vidrio, para el caso particular de un horno tipo Unit-Melter que funde vidrio sódico.

Con los resultados obtenidos en los balances de masa y energía para cada sistema se determinaron los requerimientos de calor para fusión de 1 tonelada de vidrio sódico cálcico, así como las pérdidas de calor que tienen lugar durante el proceso, lo cual establece que la cantidad de calor que se requiere suministrar para efectuar la fusión, es de por tanto podemos decir que:

- ✓ Para un sistema de combustión convencional *Aire-Gas Natural*

La temperatura de flama disminuye a medida que se incrementa la proporción de aire, por ende, disminuye la eficiencia al efectuar la combustión. La temperatura de flama alcanzada determina para este sistema una eficiencia de 25.3%.

La distribución de la energía que se suministra al del horno para una producción de 8 TON/día queda de la siguiente manera: 15% pérdidas debidas a la estructura del horno (pérdidas por paredes, y aberturas), 10% al producto, mientras que los gases de combustión absorben 70% de la energía suministrada al horno, al ser este un horno que no cuenta con sistemas de recuperación de calor es energía desperdiciada, en gran medida debida a la presencia del nitrógeno.

Esto implica pérdidas tanto térmicas como económicas debidas al consumo de combustible.

- ✓ Para un sistema de combustión convencional *AOF*

Se alcanza una mayor temperatura de flama debida a la ausencia de nitrógeno por lo cual se tiene una eficiencia de 46.9%.

Con una producción de 10.4 TON/día lo que corresponde a un aumento del 30% con *AOF* la distribución del calor queda de la siguiente manera: 25% pérdidas debidas a la estructura del horno (pérdidas por paredes, y aberturas), 17% al producto, mientras que los gases de combustión absorben 58% de la energía suministrada al horno.

De acuerdo con lo obtenido en el análisis económico al utilizar oxígeno se reduce hasta un 40% el flujo de combustible que hay que suministrar al horno, el consumo específico de combustible también disminuye 53% , así mismo elimina al 100% la necesidad de usar energía eléctrica por la utilización de ventiladores, todo lo anterior se ve reflejado en los costos específicos de producción (\$/TON) ya que estos disminuyen también un 30%, para obtener un ahorro anual de \$2,274,923.64.

Bibliografía

560, A. S. (2001). *Fired Heaters For General Refinery Services*. Third Edition.

Alexis.G.Pincus. (1976). *Melting Furnace Design in the glass Industry*. New York: The Glass Industry Magazine.

Branan, C. (2002). *Rules of thumb for Chemical Engennieers [: A Manual of Quick, Accurate Solutions to Everyday Process Engenieering Problems*. Access Online via Elsevier.

Cengel, Y. B. (2009). *Termodinamics and Engineering Approach* . New York,E.U.A: Mc Graw Hill.

CICSA Combustión Industrial y Control S.A de C.V. (s.f.). Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de <http://cicsa-maxon.com.mx/productos/quemadores-industriales/quemadores-oxy-gas/>

Charles E.Baukal, J. (2000). *The John Zink Combustion Handbook*. Tulsa, Oklahoma: Charles E. Baukal Jr., Robert E. Schwartz.

E.A.Auces, & Rodríguez, J. (2003). Cálculo de las necesidades de energía en un horno de relevo de esfuerzos. *Revista Ciencia e Ingeniería.*, 24(3), 4.

Ibarra, O. (2011). Diseño de un horno de operación periódica tipo day tank de uso en pequeñas y medianas empresas de vidrio. *Escuela de Ingeniería de Materiales. Universidad Nacional de Colombia: Medellín, Colombia*.

INFRA de el Salvador, S.A de C.V. (s.f.). Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de <http://www.infrasal.com/gases/formas-de-suministro/tanques-criogenicos>

INFRA de el Salvador, S.A de C.V. (s.f.). Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de Suministro de Tanques Criogénicos: <http://cicsa-maxon.com.mx/quemadores-industriales/>

Jr, C. E. (2001). *Oxygen-Enhanced Combustion*. Tulsa Oklahoma: Charles E. Baukal Jr.

Jr., C. E. (2003). *Industrial Burners Handbook* . Tulsa Oklahoma: Charles E. Baukal Jr.

Kaboyashi, H. (2004). *Advances in Oxy-Fuel Fired Glass Melting Technology*. USA: Praxair, Inc.

- Madero, K., & Herera, B. (2013). *Revisión de la combustión con aire enriquecido con oxígeno como estrategia para incrementar la eficiencia energética*. Medellín Colombia: Instituto Tecnológico Metropolitano Medellín.
- Navarro, J. (2003). El vidrio.
- Perry, R. W. (1997). *Perry Manual del Ingeniero Químico*. (Vol. I y II). España: Mc Graw Hill/ Interamericana de España.
- Praxair. (s.f.). Recuperado el 24 de Mayo de 2017, de SUMINISTRO DE GASES INDUSTRIALES Y TECNOLOGÍA PARA LA INDUSTRIA DEL VIDRIO:
<http://www.praxair.com.mx/industrias/glass>
- Secretaría de Economía. (Diciembre de 2012). Recuperado el 25 de Mayo de 2017, de Coordinación General de Minería. Dirección de desarrollo minero.:
http://economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_silice_1013.pdf
- Secretaría de Economía. (Diciembre de 2012). Recuperado el 2017 de Mayo de 24, de Coordinación General de Minería. Dirección General de Desarrollo Minero.:
http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/mineria_estadisticas_300513/estadisticas_perfiles_dolomita_0513.pdf
- Skeen, S., & Yablonsky G. Y Axelbaum, R. (2009). Characteristics of non premixed oxygenenhaced combustion: I. The presence of appreciable oxygen at the location of maximum temperaturebcombustion and flame. En S. Skeen, & R. Yablonsky G. Y Axelbaum, *Characteristics of non premixed oxygenenhaced combustion: I. The presence of appreciable oxygen at the location of maximum temperaturebcombustion and flame* (págs. 2145-2152).
- Smith, J., & Van Ness, H. A. (1997). Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. En J. Smith, & H. A. Van Ness, *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química* (págs. 435-486). México: Mc Graw Hill.
- Stadler, H., Beggel, F., Itabermehl, M., & al., e. (2011). Oxyfuel coal combustion by efficient integration of oxigen transport membranas. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 7-15.
- Thermax, Inc. (s.f.). Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de Negocios y Marcas:
<http://www.chartindustries.com/Businesses/Thermax>

Thermax, Inc. (s.f.). Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de Vaporizadores:
<http://www.chartindustries.com/Industry/Industry-Products/Vaporizers>

Thermophysical Properties of Fluid Systems - NIST Chemistry WebBook. (s.f.).
Recuperado el 30 de Mayo de 2017, de NIST Chemistry WebBook:
<http://kinetics.nist.gov/janaf/html/C-067.html>

Tuson., G. (1991). *100% Oxygen Fired Regenerative Container Glass Melters.*
Gallo Glass Company Modesto, C.A; Glass Company Baltimore, Inc.Aka
Praxair Tarrytown. NY.10598: Union Caribe Industrial Gasses.

Vega, C. (2006). Sistema de Oxicombustión para Hornos continuos. Producción+
Limpia. En C. Vega, *Sistema de Oxicombustión para Hornos continuos.*
Producción+ Limpia. (págs. 81-86).