

# Universidad Nacional de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



## “Cálculo y Diseño de un Horno para la Fabricación de Vidrios en la Localidad de Huancayo”

**T E S I S**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO MECANICO**

**MANUEL ADOLFO SANCHEZ AREVALO**

PROMOCION: 19 - 1

**LIMA • PERU • 1990**

## INDICE

	Pag
PROLOGO .....	21
1. INTRODUCCION .....	23
2. EL VIDRIO .....	
2.1 Historia del Vidrio .....	26
2.1.1. Uso del vidrio natural .....	26
2.1.2. El vidrio en la Edad Antigua .....	26
2.1.3. Fabricación del vidrio en Egipto y Siria ...	28
2.1.4. El vidrio en la Antigua Roma .....	33
2.1.5. Artesanía en Francia .....	34
2.1.6. Los vidrios Venecianos .....	36
2.1.7. El vidrio desde el Siglo XVIII .....	37
A nuestra época.	
2.2 Estructura del Vidrio .....	38
2.2.1. Definición del Vidrio .....	44
2.2.2. Unidad Estructural básica de los vidrios de Silicato .....	44
2.2.3. Estructura del Vidrio .....	48
2.2.3.1. Modelo del Retículo al azar.....	48
2.2.3.2. Técnica de difracción de Rayos X .....	50
2.2.3.3. Teorías basadas en la formación de <u>Agrupamien-</u> tos .....	53
<u>2.3.</u> Materia Prima para la Fabricación de Vidrio .....	55

2.3.1. Vitrificantes .....	56
2.3.1.1. Silice .....	56
2.3.1.2. Anhídrido Bórico .....	65
2.3.2. Fundentes .....	68
2.3.2.1. Carbonato Sódico .....	69
2.3.2.2. Otras materias primas aportadoras de Oxido de sodio .....	70
2.3.2.2. Oxido de Potasio .....	72
2.3.2.4. Oxido de Calcio .....	72
2.3.2.5. Oxido de Magnesio .....	74
2.3.2.6. Oxido de Bario .....	75
2.3.3. Estabilizantes .....	76
2.3.3.1. Oxido de aluminio .....	76
2.3.3.2. Oxido de plomo .....	78
2.3.3.3. Oxido de Zinc .....	78
2.3.3.4. Componentes secundarios .....	78
2.3.4. Forma de la Composición del Vidrio .....	79
<b><u>2.4</u> Energía .....</b>	<b>83</b>
2.4.1. Tipos de energía disponible .....	83
2.4.1.1. Energía eléctrica .....	83
2.4.1.2. Energía carbonífera .....	85
2.4.1.3. Energía de los productos Petroquímicos ...	87
2.4.2. Estudio de factibilidad para el uso del tipo de energía .....	88
2.4.2.1. Criterio del Puntaje de Factores .....	90
<b><u>2.5</u> Disposición de Planta .....</b>	<b>92</b>

2.5.1.1.	Determinación de Tipos y Cantidad de vidrios a producirse para utensilios .....	93
2.5.1.2.	Cantidad de vidrio a producirse para botellas y vasos .....	96
2.5.1.3.	Cantidad de producción de vidrio plano .	98
2.5.1.4.	Determinación de flujo de vidrio a fundirse por hora .....	100
2.5.2.	Método de fabricación para los vidrios seleccionados .....	101
2.5.2.1.	Método de fabricación para utensilios ...	101
2.5.2.2.	Método de fabricación de botellas.....	107
2.5.2.3.	Método de fabricación de vidrio plano ...	111
2.5.3.	Disposición de planta .....	112
2.5.3.1.	Disposición de planta en serie .....	113
2.5.3.2.	Disposición de planta en paralelo .....	113
2.5.3.3.	Elección de Disposición de planta .....	115
2.6	Mano de obra .....	116
2.6.1.	Organigrama .....	116
2.6.2	Funciones .....	117
2.6.2.1.	Gerente .....	117
2.6.2.2.	Jefe de producción .....	117
2.6.2.3.	Jefe de Mantenimiento .....	117
2.6.2.4.	Jefe de venta .....	117
2.6.2.5.	Jefe de Almacén .....	118
2.6.2.6.	Supervisor de Laboratorio .....	118
2.6.2.7.	Supervisor de Planta .....	118
2.6.2.8.	Supervisor de Informática .....	118

2.6.2.9. Sobre Estantes .....	118
2.6.2.10 Oficinistas .....	119
2.6.2.11 Asesores .....	119
2.6.2.12 Operarios .....	119
<b>3. Cálculo y Dimensionamiento del Horno .....</b>	<b>120</b>
<b><u>3.1</u> Hornos de Fusión .....</b>	<b>120</b>
3.1.1. Hornos de Crisol .....	121
3.1.2. Hornos de Cuba .....	126
3.1.3. Tipos de Hornos de Cuba .....	129
3.1.3.1. Hornos de Llama transversal .....	130
<i>Ver. →</i> 3.1.3.1. Hornos de Llama de herradura .....	135
<b><u>3.2</u> Características del Vidrio a producir y calor de fusión .....</b>	<b>139</b>
3.2.1. Vidrios a fundir e función de sus componentes .....	139
3.2.2. Reacción en el Sistema $Na_2O - CaO - SiO_2 - CO_2$ .....	139
3.2.3. Evaluación del Calor Específico de fusión .....	143
3.2.4. Calor de fusión .....	147
3.2.4.1. Cálculo de calor específico de fusión calor para fundir el vidrio (QL) .....	147
3.2.4.2. Programa para cálculo de Cv y QL .....	147
<b>3.3. Cálculo del Calor necesario .....</b>	<b>149</b>
3.3.1. Disposición del Horno .....	149
3.3.2. Primera Ley Termodinámica aplicada al <u>vo</u> lume de control .....	149

3.3.3.	Reacción estequiométrica para quemar el Petróleo .....	152
3.3.3.1.	Cálculo de los % del CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> ...	152
3.3.3.2.	Características de los petróleos DIESEL 2 y 6 .....	153
3.3.4.	Cálculo de la entalpía de formación del combustible .....	154
3.3.5.	Cálculo de la masa de Gas e el recuperador y Chimenea .....	155
3.3.5.1.	Cálculo del número de moles de combustible	159
3.3.6.	Programa del Cálculo termodinámico .....	163
3.4.	Selección del Quemador .....	182
3.4.1.	Características de los Petróleos .....	182
3.4.2.	Requisitos de un buen quemador para fundir vidrio .....	185
3.4.2.1.	Requisitos físicos .....	185
3.4.2.2.	Requisito de operación .....	186
3.4.2.3.	Sub-división .....	186
3.4.2.4.	Combustible .....	188
3.4.3.	Tipo de quemadores .....	189
3.4.3.1.	Atomización a presión .....	189
3.4.3.2.	Atomización por corriente rápida .....	191
3.4.3.3.	Atomizadores a baja presión .....	194
3.4.4.	Selección del quemador .....	195
3.5.	Dimensionamiento térmico del horno .....	196
3.5.1.	Horno seleccionado (características).....	197

3.5.2.	Esquemas del Horno a Diseñar .....	198
3.5.2.1.	Descripción de las partes .....	198
3.5.2.2.	Características de funcionamiento .....	198
3.5.3.	Factores y Simplificaciones a considerar para el cálculo de dimensionamiento térmico .....	199
3.5.3.1.	Comenglatura .....	200
3.5.3.2.	Circuito equivalente .....	201
3.5.3.3.	Datos para el cálculo del dimensionamiento térmico .....	202
3.5.3.4.	Valores de emisividad del ladrillo refractario y vidrio .....	207
3.5.3.5.	Cálculo de la dimensiones de la zona de fusión .....	208
3.5.3.6.	Determinación de pérdidas de calor por pared .....	212
3.5.3.7.	Programa de cálculo por computadora de transmisión de calor .....	214
3.5.3.8.	Cálculo del dimensionamiento de la zona de trabajo .....	221
3.5.3.9.	Condiciones de operación .....	222
3.5.3.10	Cálculo del calor que atraviesa la pared pantalla .....	222
3.5.3.11	Cálculo de la longitud de la zona de trabajo .....	223
3.5.3.12	Esquema del dimensionamiento del horno ..	224
3.5.4.	Mecanismo de fundición del vidrio .....	225

3.5.4.1. Determinación de la altura de la zona de fusión de vidrio .....	226
3.5.4.2. Incremento de masa e el proceso de co de_ sación .....	226
3.5.4.3. Cálculo del tiempo de transmisió de calor	226
3.5.4.4. Cál ulo de la distancia recorrida por la partícula a fundir .....	227
3.5.4.5. ome latura de las ecuacion s .....	228
3.5.4.6. Programa e BASIC, para el cálculo del es_ pacio y tiempo del recorrido de la partí- cula a fundir .....	
3.6. Verificación del Dimencionamiento térmico del horno	
3.6.1. Cálculo el coeficiente de transmisió por convección en la parte interior del horno.	
3.6.2. Cálculo del coeficiente de convecció para el exterior del hor o .....	238
3.6.3. Deter inación de la conductividad térmica de los ateriales refractarios y ai lantes	241
3.6.4. Cálculo de la temperatura del refractario	244
3.6.5. Determinació de los factores de forma pa_ ra la conducció en esquina .....	245
3.6.6. Determinación del flujo de calar en pare- des, techo y piso del horno .....	249
3.6.6.1. Cálculo de areas de piso, techo y paredes	252
3.6.6.2. Progra a para verificación del dimen 'ona_ miento tér ico .....	252
3.6.7.1. Cálculo de temperatura de los gases a la	



3.6.7.2.	Cálculo del calor perdido por los gases	259
3.6.7.3.	Cálculo del calor entregado al aire por los gases .....	261
3.6.7.4.	Programa para el cálculo de temperatura de salida de gases , calor entregado al aire y calor perdido por chimenea .....	262
3.6.7.5.	Diagrama de Sankey y cálculo de eficiencia el horno .....	264
4.	Diseño Estructural del Horno .....	266
4.1.1.	Diseño del techo .....	266
4.1.1.1.	Cálculo del peso lineal del techo .....	269
4.1.2.	Diseño de pared .....	272
4.1.2.1.	Cálculo de la fuerza en la pared .....	274
4.1.2.2.	Cálculo del peso lineal de la pared ...	275
4.1.2.3.	Cálculo de la fuerza de presión ejercida por el vidrio en la pared .....	276
4.1.2.4.	Cálculo de la fuerza friccional entre ladrillos .....	276
4.1.2.5.	Cálculo de la resistencia de aplastamiento del ladrillo refractario .....	277
4.1.2.6.	Cálculo del esfuerzo de aplastamiento de diseño .....	277
4.1.3.	Diseño de la solera .....	279
4.1.3.1.	Cálculo de la resistencia del ladrillo refractario de la solera .....	281
<u>4.2.</u>	<u>Cálculo de la estructura</u> .....	284

4.2.1.	Cálculo de los tirantes y de las vigas so- porte .....	285
4.2.1.1.	Cálculo del diámetro del tirante .....	288
4.2.1.2.	Cálculo de las dimensiones de la viga pa- rante .....	289
4.2.1.3.	Cálculo de las vigas de soporte de solera	292
4.2.1.4.	Cálculo de diseño de los pórticos .....	294
<u>4.3</u>	Cimentación .....	300
4.3.1.	Ubicación de las argas e la cimentación	301
4.3.1.1.	Cálculo de cargas .....	301
4.3.1.2.	Cálculo de cargas e pórticos .....	302
4.3.2.1.	Cálculo del esfuerzo del terreno sobre la zapata .....	303
4.3.2.2.	Diseño de la zapata por momento fle tor .	304
4.3.2.3.	Diagrama de momento X-X .....	305
4.3.2.4.	Diagrama de momento Y-Y .....	306
4.3.2.5.	Cálculo e la altura de zapata por mo en- to flexible .....	306
4.3.2.6.	Cálculo del area de acero .....	309
<u>4.4</u>	Cálculo del recuperador de calor .....	310
4.4.1.	Esquema del recuperador .....	310
4.4.2.	Valores eterminados en el cálculo de ba- lance térmico .....	312
4.4.3.	Cálculo de gases expresado en volu e ...	313
4.4.3.1.	Cálculo e presión relativa, temperatura relativa y co presibilidad .....	313

4.4.3.2.	Cálculo del flujo del volumen del gas ...	316
4.4.4.	Cálculo del coeficiente pelicular de los gases en el recuperador .....	317
4.4.5.	Cálculo del coeficiente pelicular el aire	321
4.4.5.1.	Cálculo del área transversal velocidad y número de Reynolds para el aire .....	323
4.4.5.2.	Cálculo de la resistencia del ducto .....	326
4.4.5.3.	Cálculo del área interior y exterior del ducto de gases del recuperador .....	326
4.4.6.1.	Cálculo de la longitud del intercambiador	327
4.4.6.2.	o englatadura e términos equivalentes para usar computadora .....	328
4.4.6.3.	Programa para cálculo del dimensionamiento del recuperador .....	329
4.4.6.4.	Cálculo del aislante de los ductos de aire caliente .....	332
<u>4.5</u>	Cálculos para diseño de la Chimenea .....	336
4.5.1.	Esquema de la chimenea .....	336
4.5.2.	Determinación de pérdidas de presión ....	337
4.5.2.1.	Pérdidas de presión en la zona "0" .....	338
4.5.2.2.	Caida de presión en la zona I .....	339
4.5.2.3.	Caida de presión en la zona II y III ....	340
4.5.2.4.	Cálculo de la caída de presión total y altura de chimenea .....	343
4.5.2.5.	Cálculo de caída de presión para chimenea de 3 metros de altura .....	344
<u>4.6</u>	Diseño del sistema de aire Combustible .....	345

4.6.1.	Esquemas e la Instalación Aire-Combustible .....	345
4.6.2.	Característica de los componentes del sistema .....	347
4.6.3.	Determinación de la potencia requerida por la bomba de petróleo .....	347
4.6.3.1.	Pérdidas de presión e los ductos e petróleo .....	348
4.6.3.2.	Presión total de bombeo .....	350
4.6.3.3.	Potencia de motor .....	350
4.6.4.	Cálculo de la potencia requerida por el compresor .....	351
4.6.4.1.	Caida de presión el aire en los ductos y el recuperador .....	351
4.6.4.2.	Cálculo de la potencia del compresor ,...	353
5.	Prespectivas futuras .....	355
<u>5.1</u>	Gasificación de combustibles .....	355
5.1.1.	Generalidades .....	356
5.1.1.1.	Definición .....	356
5.1.1.2.	Teoría de la gasificación .....	366
5.1.1.3.	Consumo de aire .....	358
5.1.1.4.	Potencia calorífica del gas pobre .....	358
5.1.1.5.	Rendimiento químico de la gasificación ..	359
5.1.2.	Gasificación con ayuda de vapor de agua	359
5.1.3.	Funcionamiento del gasómetro .....	363
5.1.3.1.	estructura del gasómetro .....	363
5.1.3.2.	Marcha en estado de régimen .....	364

5.1.3.3.	Conducción del aire .....	364
5.1.3.4.	Garga del gasógeno .....	365
5.1.4.	Gasificación de los distintos combustibles .....	365
5.1.4.1.	Coque y antracita .....	365
5.1.4.2.	Carbo o con ateria olátil .....	366
5.1.4.3.	Carbones con mucha ceniza .....	367
5.1.4.4.	Carbones muy húmedos .....	367
5.1.5.	Siste a de gasógenos .....	368
5.1.5.1.	Gasógenos antiguos .....	368
5.1.5.2.	Gasógenos modernos .....	368
5.1.5.3.	Gasógeno e parrilla giratoria .....	370
5.1.6.	Balance térmico del ga ógeno .....	372
<u>5.2.</u>	Uso del oxígeno como perspectiva futura e la com- bustió .....	374
5.2.1.	Características de la com ustión en el horno .....	374
5.2.2.	Balance térmico de la combustió en el horno .....	375
5.2.2.1.	Cálculo de masa por el recuperador y chi- enea .....	375
5.2.2.2.	Determinación del consumo d combustible.	376
6.	Costos .....	381
<u>6.1.</u>	Puesta en operación .....	381
6.1.1.	Costo de constitución de empresa .....	384
6.1.2.	Costo de construccio es civiles .....	385
6.1.3.	Costo de instalaciones mécanicas .....	386
6.1.4.	Costo de construcción del horno .....	387

6.1.5.	Costo de máquinas e instalaciones eléctricas	388
6.1.6.	Costo de servicios a administrativos .....	389
6.1.7.	Costo de servicios planta .....	389
<u>6.2.</u>	Costo fijo .....	390
6.2.1.	Costo de recuperación anual de inversión..	390
6.2.2.	Costo de mano e obra .....	392
6.2.3.	Costo de mantenimiento anual .....	392
6.2.4.	Costo de energía eléctrica para servicios	394
<u>6.3.</u>	Costos variables .....	394
6.3.1.	Proyección de la demanda en peso del vidrio a fabricar .....	395
6.3.2.	Cálculo del costo de combustible por Kg. de vidrio .....	395
6.3.3.	Cálculo de energía eléctrica por Kg. de vi- drio fundido .....	397
6.3.4.	Cálculo del costo de vidrio a fundirse en unidad de peso .....	397
6.3.5.	Costo variable total por unidad de peso ..	398
<u>6.4.</u>	Cálculo de la tasa interna de rendimiento .....	398
6.4.1.	Alternativa inicial de recuperación .....	399
6.4.2.	Cálculo de tasa interna de retorno para el caso 1 .....	399
6.4.3.	Segunda alternativa de recuperación de ca- pital .....	401
6.4.4.	Cálculo de la tasa interna de retorno para el caso 2 .....	401

C nclusiones .....	404
Apé dice .....	409
Bibliografía .....	425

## PROLOGO

Esta tesis tiene como propósito plantear una alternativa en el desarrollo de la industria vidriera en la localidad de Huancayo, ya que sus zonas aledañas son ricas en minerales no metálicos tales como: Sílice y Carbonato de Calcio (materias primas básicas).

Con este estudio se espera demostrar que el diseño del horno en la Localidad de Huancayo, a una altitud de 3250 mts. sobre el nivel del mar, sea funcional en su aspecto operativo, lo cuál justificaría una posibilidad de industria descentralizada.

En el presente estudio, en todos los capítulos previamente se hace una descripción teórica de los puntos tratados y posteriormente se plantean las ecuaciones que conducen a las soluciones de cálculos haciendo uso de tablas, gráficas y programas computarizados en el lenguaje BASIC.

El diseño del horno se realiza teniendo en consideración que este deberá fundir tres tipos de vidrio de composición muy similar pero de diferentes usos; también en el diseño se han planteado ecuaciones que buscan la mayor efectividad del horno que por ende implica una combustión más efectiva y una menor pérdida de calor, tanto por sus paredes como por los gases de Chimenea. Es más, la formulación de las ecuaciones generalizadas que permitirán el aprovechamiento en diseños de hornos de mayor y menor capacidad de producción.

Las principales limitaciones que se presentan en el diseño del horno es el medio ambiente de la localidad de Huancayo, ya que muchos valores de las ecuaciones han tenido que ser corregidos por factores



de presión y temperatura, los mismos que afectan negativamente las e  
cuaciones. Otras de las limitaciones importantes con respecto al di  
seño es que no se ha encontrado información estadística exacta del  
consumo de los tres tipos de vidrio de más uso en la localidad de  
Huancayo, motivo por el cuál hay cierto grado de subjetividad en el  
cálculo de la cantidad de vidrio a producir.

## INTRODUCCION

Esta tesis abarca seis capítulos, en cada uno de los cuáles se hace un análisis bastante amplio para desarrollar la parte central de la tesis.

En esta parte, ubicaremos los propósitos, los métodos de trabajo, los alcances y limitaciones de este estudio.

El capítulo dos, trata el estudio del mercado, como puntos importantes se inicia con la descripción del vidrio desde tiempos antiguos hasta la fecha con el objeto de tener una visión de la evolución en la fabricación del mismo.

Aquí, también enfocaremos como un sub capítulo importante referente a la materia prima, ya que sin tener una descripción adecuada de esta, no nos sería posible evaluar las condiciones más importantes para la elaboración del vidrio. En este capítulo se hará una somera explicación con respecto a los tipos de energía que podría usarse en el diseño de nuestro horno y la disponibilidad de esta, en la localidad de Huancayo. Del mismo modo se hará planteamientos bastantes ligeros en lo que respecta a la disposición de planta y al organigrama de mano de obra; y por último en este capítulo también se presentará un estudio estadístico de los tipos de vidrios que frecuentemente usa la población y la industria de la localidad de Huancayo. Asimismo se presentará los métodos de fabricación de los diferentes vidrios previamente seleccionados.

En el Capítulo Tres, se plantea los tipos de hornos que usualmente se usan en la fabricación de vidrio, pero teniendo en cuenta que

sólo nos limitaremos a los hornos que funcionan a petróleo, ya que estos tipos de horno han sido previamente elegidos de acuerdo a un estudio de prefactibilidad hecho en el capítulo dos. En este capítulo se planteará las características del vidrio a fundir tales como su composición, su temperatura de fusión y su calor específico al igual que algunas reacciones que se dan en el proceso de fusión, también se hará la evaluación de la cantidad de calor latente de fusión a través de un programa desarrollado en el lenguaje BASIC. Como consecuencia a lo mencionado con el fin de poder evaluar el dimensionamiento térmico, se procederá al cálculo del calor necesario para fundir el vidrio teniendo en consideración pérdidas de calor referidas en porcentaje al calor requerido para la fusión del vidrio planteado en el capítulo anterior. Para este fin también haremos uso de la elaboración de un programa en el Lenguaje BASIC.

Una vez realizado esta evaluación procederemos a seleccionar el quemador teniendo en cuenta las características del petróleo, lo mismo que las condiciones requeridas para una buena fusión del vidrio.

A continuación pasaremos a realizar el diseño térmico del horno, por lo cual se hará uso de tablas, gráficos obtenidos de los diferentes textos de consulta, con este fin se hizo uso de la computadora.

Una vez obtenidos los resultados de este dimensionamiento térmico se procedió a verificar. Por tal motivo se tomo en cuenta la transmisión de calor en forma más analítica, es decir que aquí se evalua las diferentes formas de transmisión de calor dentro del horno, con el fin de obtener un dato más exacto con respecto a las pérdidas de calor de las paredes y finalmente se evaluará la cantidad de calor que entregan los gases al aire, igualmente que el calor que se pierde por la chimenea con el fin de elaborar un diagrama de SANKEY.

En el Capítulo cuatro, nos dedicaremos al diseño del techo del horno, paredes, soleras, estructuras y cimentación, teniendo en cuenta la resistencia que nos brindan los ladrillos refractarios de las diferentes partes del horno. También se procederá a diseñar la chimenea, recuperador del calor y sistema del aire combustible que alimenta al horno.

El Capítulo cinco enfoca la posibilidad de hacer uso del carbón como fuente de energía y también como otra alternativa futura se plantea la evaluación del uso de oxígeno líquido.

El Capítulo seis, presenta la evaluación de la parte económica del horno teniendo en consideración sus costos fijos y variables, sin variar el dimensionamiento térmico, pero si teniendo en cuenta la variedad de producción de los vidrios fundidos. Con todos estos parámetros será factible determinar la rentabilidad del vidrio a producirse.

Hago presente que para la elaboración de esta tesis, además de la bibliografía anotada, se ha contado con el valioso asesoramiento del Ingeniero Manuel Villavicencio, a quien agradezco de manera muy especial.

## EL VIDRIO

### 2.1. Historia del Vidrio

#### 2.1.1 Uso del Vidrio Natural

Desde los albores de la humanidad el vidrio fué el material que usó el hombre, irviéndole fielmente en su desarrollo. Desde el hombre prehistórico hasta sus aplicaciones científicas.

El vidrio existe en la naturaleza desde que se consolidó la corteza terrestre y de ella aprendió el hombre hacer uso de este antes que hiciera uso el primer artesano.

La roca vítrea más importante usada por el hombre prehistórico, fué la obsidiana, esta roca es compacta y anhidra, de naturaleza ácida suele presentarse en forma de grandes bloques redondos, brillantes traslúcidos o transparentes, de color pardo, gris oscuro o esporádicamente un tinte con tonalidades verdosas o rojizas.

La obsidiana en épocas primitivas permitió ser utilizada en la fabricación de utensilios domésticos tales como: Hachas, puntas de lanza, etc. Aprovechando los bordes cortantes y las fracturas concoides y de grado alto de temple en su formación natural.

Debido al brillo y a su aspecto bello en la antigüedad se utilizó para confeccionar espejos y arbolarios.

En el continente americano se encontró muchos vestigios de objetos de obsidiana de la época precolombiana, tales como áscaras, objetos ceremoniales y espejos, motivo por el cual los españoles le dieron el nombre de espejo de incas.

#### 2.1.2 El Vidrio en la Edad Antigua

La aparición de los primeros objetos de vidrio fabricados por el hombre no ha podido situarse ni geográfica ni cronológicamente. El descubrimiento del fuego le dió al hombre acceso a las altas temperaturas; empleándolas en la elaboración de objetos artesanales.

Algunas personas suponen que el vidrio fué obtenido en forma casual por los primeros fundidores al tratar el cobre.

Esta suposición fué avalada por los colores azul y verde que presentaron los primeros vidrios.

Aunque hay posibilidad de que el vidrio naciera sobre una sencilla vasija de barro (con lo que respecta a este caso) no queda muy claro, ya que para ello se hubiese necesitado que las arcillas tuviesen una temperatura de cocción más elevadas.

El Historiador Cayo Plinio Secundo en su Obra "HISTORIA NATURAL" da una versión sobre el descubrimiento del vidrio en lo que menciona lo siguiente: "Que un lugar de Siria, limítrofe con Judea; llamado Fenicia existe al pie del monte Carmelo un pantano llamado Candebea, en el cuál nace el Río Belus, que después de recorrer 7 Km. desemboca cerca de Ptolomeida. Este río es lento de aguas turbias, profundo y cenagoso; y sus arenas son blancas y brillantes; sólo después de ser lavadas por la acción del mar y sólo así resultan utilizables.

Se cuenta que habiendo arribado unos mercaderes, que transportaban trona (mezcla de carbonato y bicarbonato sódico naturales) estos desembarcaron en las orillas de la desembocadura del río Belus y fueron a preparar su comida, al no encontrar piedras sobre que apoyar sus marmitas para calentarlas, tomaron gruesos pedazos de su mercancía. Cuando la trona se fundió y se mezcló con la arena de la playa comenzó a correr un líquido transparente, hasta entonces desconocido que fué el origen del vidrio".

Este relato tiene una veracidad muy relativa ya que no hay hechos evidentes; pero sin embargo ha podido demostrarse experimentalmente - que con fuego abierto de leña se puede alcanzar en dos horas una tempe ratura de 1200 C, que bastaría para fundir un vidrio binario de silica to sódico, ya que el sistema  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  presenta un eutéctico a 793 C.

Se ha encontrado hallazgos arqueológicos en Egipto de vidrios y vidriados que datan de alrededor del año 2,500 A.C. fecha muy anterior a la del establecimiento del pueblo Fenicio en las costas de Siria, he cho que no tuvo lugar hasta el año 2,000 A.C. coincidiendo, con el im perio de la XI dinastía e Egipto.

Lo más i teresante de esta narración es sin duda que las importan tes se hallaban en Siria. Y así mismo que las arenas del río Belus, tenían una buena calidad para la fabricación del vidrio y estas fueron usadas siglos por los vidrieros del medio oriente como preciada mate ria prima.

Otras obras que hablan al respecto de las arenas del río Belus son:

- "Guerra de los Judíos" de Flavio Josefo
- "Geografía de Estrabon
- "Historia de las Piedras" de Teofrasto

La arena del río en mención, llegaron incluso a ser empleadas por, los vidrieros venecianos hasta finales de la Edad Media; es muy posi ble que se debiera a una elevada proporción de sales alcalinas proce dentes del agua del mar que las bañaba el movimiento alternante de lass mareas.

### 2.1.3 Fabricación del Vidrio en Egipto y Siria

Las investigaciones históricas más completas sobre el vidrio en Egipto se deben al desarrollo del famoso arqueólogo Inglés Sir Flinder Petrie, quién descubrió el vidriado más antiguo y que data de unos -

12,000 A.C.

El antiguo objeto que se encontró de pasta de vidrio data de 7,000 A.C. estos vidrios presentaban colores azules y verdes; lo que las manifestaciones anteriores, que el vidrio proviene de la fundición de metales, es debido que estos colores manifestados, reflejan la presencia de óxidos metálicos, en especial el de cobre.

Parece que la fabricación de vidrio en Egipto en una forma regular se inició en el año 1,500 A.C. A esta época corresponde una perla de vidrio azul turquesa que imita un ojo destinado a una estatua y lleva el sello de Faraón Ane o Thep.

La factoría de Tell-El-Arna, por Sir Flinders Petrie, permitió reconstruir las técnicas y procedimientos empleados por los egipcios en la fabricación de vidrio.

Esta época coincide precisamente con la conquista de Tutmos III a Siria; lo que argumenta que los anteriores vestigios encontrados en Egipto provenían de Siria, ya que los mismos fueron encontrados en ese país. Esto les permitió tener primacía sobre el vidrio hasta mediados del último milenio A.C.

Fenicia, que comprendía la zona de Siria limítrofe con Judea, zona de paso entre Mesopotamia que poseía un nivel técnico avanzado y Egipto, cuyo crecimiento y desarrollo le convertía en país altamente receptivo de conocimiento. Hizo de Egipto un país de primacía en lo que respecta al vidrio.

Debido a la insuficiente temperatura que los rudimentarios medios de la época, el vidrio solía obtenerse en forma de una pasta opaca que se moldeaba en un estado plástico altamente viscoso.

El vidrio se preparaba a partir de una mezcla de sílice obtenido por lixiviación de guijarros previamente seleccionados y de álcalis pro-



cedentes de cenizas de plantas calcinadas. El producto de fusión de esta mezcla, aunque no totalmente incoloro. Era lo suficiente como para poder tomar diferentes coloraciones que se conseguían incorporando fritas generalmente azules o verdes. La mezcla se fundía cuidadosamente en un cuenco de arcilla de unos 10 a 15 cms. de diámetro por unos 2 a 3 cm. de profundidad, y se dejaba enfriar. Una vez fría se rompía el cuenco y se desechaba la capa superior impurificada por escorias. Los trozos de vidrio seleccionados se volvía a calentar hasta un estado pastoso, y se volvían a moldear en forma cilíndrica. A continuación se enrollaban en espiral sobre una barra metálica que contraía en mayor medida que el vidrio, y se retiraba fácilmente. La espiral de vidrio se volvía a calentar y se estiraban hasta reducirla a un espesor de unos 3mm. estas delgadas varillas eran las que se empleaban como material de partida para la posterior elaboración de las piezas de vidrio.

La fabricación de vidrio hueco, iniciada durante el reinado de Tutés III, se llevó a cabo por la técnica del núcleo de arena. Así se moldearon recipientes de vidrio que trataban de imitar las vasijas de arcilla al uso de aquel tiempo.

Para fabricar un recipiente por este procedimiento se empleaban un andrill de cobre ligeramente cónico, de un diámetro igual al diámetro interior del cuello de la pieza. Sobre el extremo del andrill se moldeaba en una masa plástica de arcilla o de arena un núcleo con la forma de la pieza que se deseaba obtener, se envolvía en una funda de tela y se ataba al vástago del mandrill. Las huellas de los hilos del tejido y de las ataduras, han podido verse impresas en las paredes interiores de los recipientes. Sobre el núcleo se iban enrollando en espiral, una vez calentada hasta adquirir un estado plástico

de la delgada arilla de vidrio inicialmente obtenida, hasta que toda la superficie quedaba completamente cubierta. El conjunto se recalentaba en el horno tantas veces como fuera necesario hasta que las vueltas soldaban entre sí, y la superficie de la pieza quedaba uniforme. A continuación se procedía a su decoración enrollando todavía en caliente hilos de vidrio de diferentes colores y la pieza se rodaba con movimientos de vaive sobre una superficie lisa.

Terminada la decoración de la pieza, se colocaba por último el pie y las asas, y se dejaba enfriar. El mandril de cobre contraía y se retiraba de la boca, a continuación se extraía la arena o la arcilla contenida en el interior de la pieza, y está quedaba terminada.

El vidrio de Egipto se exportó a países vecinos como Siria y Palestina, e irradió por el mediterráneo oriental hasta Grecia, Micenas, Creta y Chipre.

Hacia finales del segundo milenio se inició una importante disminución de la producción vidriera en Egipto. Esta disminución fue debido a una decadencia de la técnica del úcle de arena, reemplazada por la de moldeo en caliente y la de tallado en frío.

Tres siglos después de esto, se produce el resurgimiento del vidrio asirio, que más tarde volvería en una época de esplendor, a las costas de Siria, el pueblo de su remoto nacimiento.

El vidrio de esta época se caracteriza por ser prácticamente incoloro. Sus formas más típicas fueron cuecos, arribales, y alabastrones, fabricados por prensado en caliente o por torneado y tallado en frío de bloque de vidrio.

Como hecho curioso debe mencionarse que en el palacio de Ursubani pal (668-626) a.c., uno de los últimos reyes Asirios, se encontró una copa que posiblemente fuera una de las primeras empleadas.

Pero el legado más importante de este rey es la biblioteca de tablillas cuneiforme en las que aparece recogido todo un compendio sobre la fabricación de vidrio, que contiene no sólo diversas fórmulas para la obtención de vidrio incoloro y coloreado, sino también gran número de detalles sobre la construcción y manejo de hornos. Estos textos ponen en manifiesto que hacia el siglo VII a.c. (Cuatrocientos años después, de producirse la decadencia de la artesanía vidriera egipcia), poseían en Asiria y Babilonia un conocimiento muy evolucionado sobre la fabricación de vidrio, especialmente en lo referente a la construcción de hornos, parece que fué en uno de estos pueblos donde por primera vez se empleo el horno de reverbero, que permitió alcanzar temperatura más elevada y por lo tanto, llevar la fusión del vidrio hasta un estado más avanzado y obtenerlo con un grado mayor de homogeneidad.

Hacia el siglo II a.c. se produjo un acontecimiento que había de ser transcendental para la artesanía vidriera. La invención en Sidón de la caña para soplar el vidrio. La técnica del soplado de vidrio supuso la primera innovación verdaderamente revolucionaria en sus métodos de elaboración, La importancia que representó, la incorporación de esta técnica a la artesanía vidriera sólo es comparable con la que habrían de tener cerca de veinte siglos después los modernos sistemas automáticos.

Por otra parte, el empleo de la caña trajo consigo un mejoramiento de la calidad del vidrio, ya que para ser trabajado por ésta técnica se requieren de temperaturas considerablemente más elevadas que las que exige el trabajo de pastas de vidrio. Por esta razón parece seguro que el soplado de vidrio fuera iniciado en Sidón por los vidrieros Fenicios, cuyo conocimiento tecnológico sobre hornos

eran mucho más avanzados que los de los Egipcios.

#### 2.1.4 El Vidrio en la Antigua Roma

Al crearse la gran unidad política del imperio romano con la dominación de Egipto y Siria a mediados del siglo I a.c. comenzaron a llegar a la Metrópoli artesanos vidrieros orientales procedentes de Alejandría y Sidón, que establecieron en Italia los primeros talleres de fabricación de vidrio.

El vidrio soplado no empezó a trabajarse sino después, del año 20 de nuestra Era. Los conocimientos heredados de los vidrieros orientales emigrados, la maestría con que llegaron a dominar la técnica de soplado de vidrio, el espíritu pragmático de los romanos y la potencia económica de su imperio fueron factores determinantes de esa gran expresión de sus productos de vidrio la fabricación en serie de recipientes de vidrio permitió a que estos perdieron el antiguo carácter suntuario que habían tenido en pueblos anteriores y adquiriera un nuevo valor utilitario.

Hacia el año 220 d.c. había aumentado el número de hornos para fusión de vidrio, de manera tal, que el emperador Alejandro Severo, ordenó como medida de seguridad en evitación de posible incendios que todas las vidrieras se trasladaran al monte Coelf, en las afueras de la ciudad, al mismo tiempo que se les aplicó impuesto.

Lo más importante de la técnica vidriera romana, fuera de haber usado el vidrio incoloro; es la fabricación del vidrio plano por el sistema colado que ya no se volvería a utilizar hasta finales del siglo XVII en Francia. El vidrio plano lo obtenían colando sobre una mesa ya sea metálica, de mármol o madera humedecida previamente.

Todos los fragmentos de vidrio plano muestran rugosidad en una de sus caras lo que hace suponer que las mesas eran recubiertas de

arena fina. Otras pruebas en favor de que los vidrios fuerón obtenidos por colada son su desigual espesor, engrosando en sus bordes, y el redondamiento de sus cantos y esquinas.

De esta manera llegaron a obtener hojas de vidrios de diversos espesores comprendidos entre 2 y 15 mm. y de superficie relativamente grande, las de mayor tamaño que se han encontrado son de 100 x 70 cm<sup>2</sup>. su composición llama la atención por su semejanza con los vidrios planos que se fabrican en nuestros días. Un análisis medio representativo de estos vidrios es el siguiente:

69%SiO<sub>2</sub>, 17 Na<sub>2</sub>O, 11%(CaO+MgO), 3%(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MnO<sub>2</sub>)

Otras aportaciones de los Romanos en la fabricación del vidrio son los vasos diatreta, que eran elaborados por soplado de aire dentro de moldes. Así mismo los vasos hechos de vidrio caracteriza a los Romanos; también se encontraron vasos tallados de vidrio tal como el vaso de licurgo. El desmoronamiento de la artesanía de vidrio en Roma vino junto con la decadencia de este pueblo.

#### 2.1.5 Artesanía en Francia

El mayor aporte de Francia en la fabricación del vidrio, es respecto al vidrio plano. Su mayor desarrollo artesanal se llevó a cabo entre los siglos XII al XIX.

La fabricación de vidrio plano se lleva a cabo por el método de soplado en cilindro o anchanes, o bien por soplado en coronas o discos.

Para la fabricación del vidrio plano por el método de cilindro, se hace la descripción de los siguientes pasos. Se inicia tomando una pasta de vidrio que se sopla dándole forma esférica, a continuación se hacia balancear la caña de un lado a otro, con lo que la bola se iba estirando formando un cilindro.

Una vez conseguida, la longitud deseada, se cortaba la base de este, se ensanchaba hasta que alcanzaba el diámetro máximo del cilindro, su fondo abierto se cerraba en forma de ocho con ayuda de unas pinzas y se unía a un pontil. El extremo opuesto se cortaba liberándole de la caña, se ensanchaba igualmente y se cerraba de igual manera que el fondo. Finalmente se cortaba el cilindro a lo largo de una de sus generatrices, se iba abriendo poco a poco y se aplanaba su superficie interior con un rodillo de madera. Ver Fig. 2.1

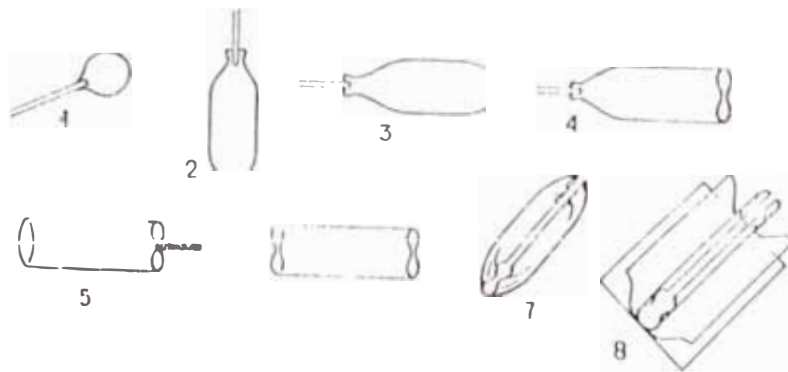


Fig. 2.1 Diferentes fases para fabricación de vidrio plano.

El otro método empleado por los franceses para la fabricación de vidrio plano se ejecuta de la siguiente manera. Primeramente se toma una porción con la caña, que es soplado hasta obtener una esfera del tamaño adecuado. Dicha esfera se transferirá por su extremo a un pontil ó puntel, mediante el cuál se girará a una velocidad suficiente para ensanchar el orificio producido, al retirar la caña

De esta manera el globo de vidrio inicial va adquiriendo la forma de una pequeña campana cada vez más abierta, hasta convertirse en un disco de espesor uniforme. Ver. Fig. 2.2

La fabricación del vidrio francés no perdió la tradición ya que a partir de 1,665 Jean Baptiste Colbert fundó la Real Manufactura de Espejos. Un año después esta fábrica se fusionó con la vidriería Tournlaville, iniciándose así la vida de uno de los fabricantes más importantes que llegó hasta nuestros días.

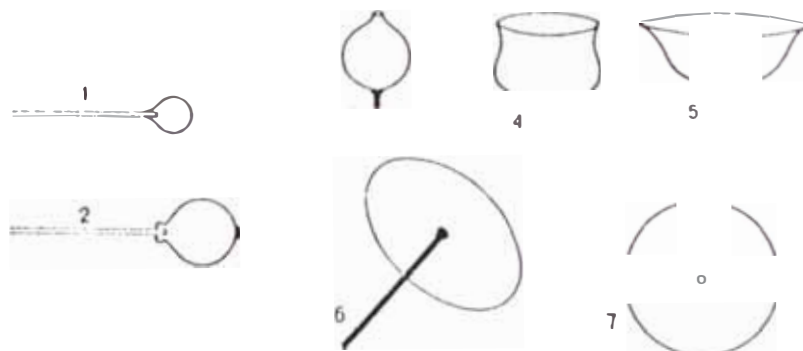


Fig. 2.2 Fases para la fabricación de vidrio en disco.

#### 2.1.6 Los Vidrios Venecianos

Las circunstancias que determinaron el nacimiento, de este nuevo núcleo vidriero no han podido ser conocidas. Probablemente, cuando se produjo la invasión de Italia por los Bárbaros, algunos vidrieros buscaron en Venecia el refugio de su artesanía. Más tarde las relaciones comerciales que establecieron los venecianos con Bizancio

trajerón consigo la importancia de las técnicas vidrieras Bizantinas.

La participación de su flota mercante en las cruzadas, le permitió la importación de vidrio, artesanos y materia prima de Acco, Sidón y Jerusalén. Los barcos regresaban cargados con la famosa arena del río Belus, empleada desde la más remota antigüedad por los Sirios y los Egipcios.

Un clima histórico de características tan peculiares como las que concurrieron en la oscura edad media, contribuyó a crear el ambiente de receloso misterio, análogo al que rodeaba a los alquimistas de la misma época, quienes estaban emparentados con los vidrieros. Las fórmulas y secretos de fabricación que se transmitían de una generación a otra constituye una herencia confidencial.

El aprendizaje de la fabricación de vidrio fue de una alta exigencia. Y, así en el año 1279 se requería de un período de ocho años para poder alcanzar el grado de maestro vidriero.

En Venecia durante los siglos XIII al XVII se dictaron leyes muy severas para poder mantener el monopolio de la industria vidriera en Europa.

#### 2.1.7. El Vidrio desde el Siglo XVIII a Nuestra Época

El perfeccionamiento del vidrio, en esta época se debe al avance de la ciencias y a las exigencias de calidad en la fabricación de vidrios ópticos; esto es consecuencia de algunos factores, tales como;

Conseguir masas con elevado grado de homogeneidad requerido, que resultaba muy difícil en los vidrios al plomo, a causa de alta viscosidad. El mecánico Pierre Louis Guinand, inventó un agitador que lleva su nombre.

Otro factor que influyó apreciablemente en el mejoramiento de



la calidad del vidrio, desde el punto de su composición química, fué la disponibilidad de carbonato sódico puro, por medio del método Leblanc; consistente en tratar sal común con ácido sulfúrico, reducir después con carbón de sulfato sódico formado, a sulfuro sódico, y por último tratar este con carbonato cálcico para pasarle a carbonato sódico.

De la aplicación sistemática del método científico y plantado ' bajo la exigencias de la segunda guerra mundial, en la productividad de la industria vidriera ha surgido resultados, e forma e nuevas ' productos; tales como vidrios cerámicos, fibra óptica, cristales para uso electrónico y otros.

Naturalmente, la revolución tecnológica del vidrio se ha podido alcanzar gracias al intenso y sistemático trabajo e investigación que llevan a cabo más de 60 institutos dedicados exclusivamente al vidrio.

Otro factor que contribuye e contribuye en una buena productividad y calidad del vidrio fabricado en nuestra época, es la evolución con que se ha efectuado el diseño de hornos, y aquí para producir en serie, productos tales como botellas, vidrio plano y otros.

## 2.2 Estructura del Vidrio

Hay una cantidad de sustancias que a temperatura ambiente tienen la apariencia de cuerpos sólidos, que les proporciona su rigidez mecánica.

Por la estabilidad de los vidrios se podría considerarlos como sólidos; desde el punto de su desorden estructural sería más acusado clasificarlo como líquido.

Al vidrio se le trata de considerarlo como un cuerpo sólido amorfo; pero esto solo se cumplía a temperaturas bajas, sin embargo a medida que se subía la temperatura de los mismos llegaba al estado

plástico. Por otra parte, se ha comprobado que los vidrios presentan mayor grado de ordenación que los cuerpos amorfos. La denominación más adecuada es la de sólidos no cristalinos.

Los vidrios tiene características comunes, motivo por el cual nos va a servir para definirlos fenotípicamente.

Una de las primeras características es que los vidrios carecen de un verdadero punto de fusión ó temperatura de líquidos. Los cuerpos vítreos pasan de un modo reversible de su forma fundida en estado líquido al estado rígido ó congelado sin la aparición de ninguna nueva fase en el sistema. Esto ocurre sin variar los grados de libertad del sistema.

Observemos los diagramas a continuación, como se comportan los vidrios con respecto al volumen específico y Calor específico.

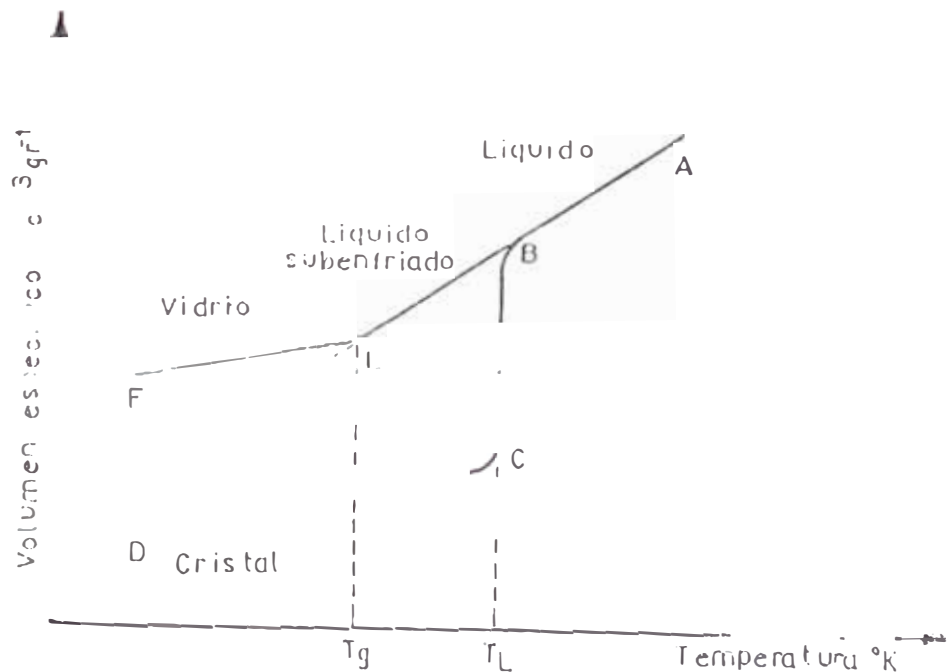


Fig. 2.3. a- Variación del volumen específico Vs. Temp.

Durante el enfriamiento de una especie tiene lugar una disminución continua AB. Si el fundido se halla en equilibrio interno, su volumen en función de la presión y temperatura de fusión T, sobreviene su cristalización que se acusa por una marcada discontinuidad caracterizada, por una brusca contracción B-C. a partir de ese momento la fase cristalina se halla en equilibrio estable, y prosigue su enfriamiento, aunque con una pendiente que el fundido, se debió a que su coeficiente de dilatación es más pequeño.

En algunos casos, si el enfriamiento transcurre, con mayor rapidez que la formación de cristal, puede bajarse la temperatura de fusión sin que se produzca la cristalización, obteniéndose un líquido sub enfriado.

La transición de líquido fundido a líquido sub enfriado transcu

re sin que aparezca discontinuidad alguna en la curva de volumen específico - temperatura. Como la estabilidad de un líquido subenfriado es menor que el de la fase cristalina y termodinámicamente se halla en un estado meta estable de equilibrio, basta una pequeña perturbación para que se produzca su cristalización súbita en caso del liberado de la cristalización elevaría de nuevo su temperatura hasta alcanzar el valor correspondiente a TL y su enfriamiento proseguirá de acuerdo a la curva ideal.

Si aumenta el grado de subenfriamiento sin la aparición de cristales, su contracción continúa hasta que llegue a una temperatura de terminada donde aparece un codo en la curva, que coincide con un notable aumento de la viscosidad. La zona más o menos amplia de temperaturas que tiene lugar este cambio de pendiente se conoce con el nombre de intervalo de transformación. El cuerpo continúa contrayéndose durante el enfriamiento prácticamente con la pendiente EF que representa prácticamente al de la curva de cristalización. A lo largo de la zona EF, el cuerpo se encuentra en estado vítrio.

La amplitud del intervalo de transformación depende en cada caso de la velocidad con que se lleve a cabo el enfriamiento.

El codo o cambio de pendiente que se aprecia a la temperatura de transformación en la curva volumen - temperatura de los cuerpos vítreos puede generalizarse a la variación de otras magnitudes de primer orden como la entalpía H y la entropía S. En cambio, en los sistemas, cristalinos dichas magnitudes presentan, lo mismo que el volumen, una marcada discontinuación a la temperatura de líquidos.

- Esta discontinuación de las magnitudes de primer orden en las especies cristalinas es análoga en su forma a la que tiene lugar en los vidrios a la temperatura de transformación, para la variación de

las magnitudes de segundo orden, como el coeficiente de dilatación térmica  $\delta = dv/vdt$  ó calor específico molar  $C_p = dH/dt$ , que resulta de derivar respectivamente el volumen y la entalpia con respecto a la temperatura, lo que puede considerarse como una segunda característica propia del estado vítreo.

- La causa que determina la congelación de una sustancia en estado vítreo radica en el progresivo aumento de la viscosidad que se produce durante el enfriamiento, que impide la agrupación ordenada de sus elementos constituyentes para formar una red cristalina.

A la temperatura de formación  $T_g$ , que representa la frontera entre la forma plástico - viscosa y la forma rígida de un cuerpo vítreo, le corresponde independientemente de su composición, una viscosidad  $10^{13}$  y  $10^{13,5}$  dPa - s aproximadamente.

- Al no hallarse un vidrio en estado de equilibrio a temperaturas inferiores a la de líquidos, sus propiedades no están determinadas únicamente por la temperatura, sino que dependen además de la velocidad con que se haya llevado a cabo el enfriamiento; es decir, el tiempo interviene como otra variable.

Si el enfriamiento transcurre con rapidez dentro del intervalo de transformación, los agregados constituyentes del fundido se encuentran limitados en su movilidad por el brusco aumento de viscosidad y el vidrio alcanza su rigidez con una estructura más abierta. Por el contrario si el enfriamiento se lleva más lentamente el aumento de viscosidad es gradual y las unidades reticulares disponen de mayor tiempo para agruparse en una forma más compacta y cerrada que conduce a una mayor contracción.

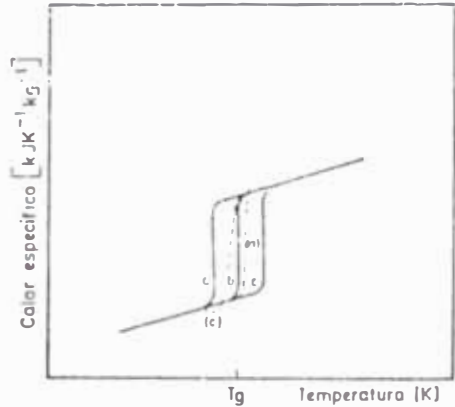
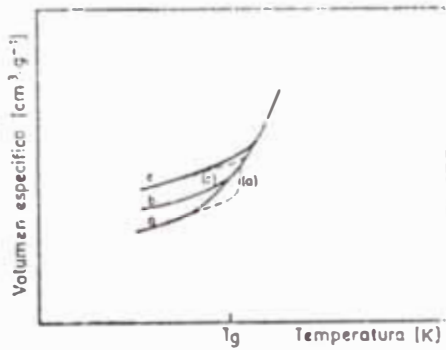


Fig 2.4-a Variación del volumen Vs. temperatura según la velocidad de enfriamiento.

Fig. 2.4-b Variación del calor específico vs. temperatura según velocidad de enfriamiento

- a -- enfriamiento lento
- b -- enfriamiento normal
- c -- enfriamiento rápido

Como consecuencia podemos comprender que la temperatura de transformación no se mantenga constante, sino que, dependiendo del tiempo de que haya dispuesto el vidrio para su congelación o relajación, se desplaza a valores superiores o inferiores (Ver. Fig 2.4.a 2.4.b).

Las curvas a , b y c muestran la variación general de una magnitud de primero y de segundo orden en un mismo vidrio enfriado con

velocidades diferentes. Los puntos de encuentro de las curvas a, b, y c, con la línea de líquido sub enfriado han sido definidos como temperatura ficticia que en cada caso corresponde a un determinado estado estructural de congelación del vidrio.

Como consecuencia de un estado de desequilibrio termodinámico, una sustancia en estado vitreo posee una energía interna más elevada que la que le correspondería en estado cristalino. Por eso la crystalización del vidrio es siempre un fenómeno exotérmico. El hecho de que los vidrios puedan mantenerse indefinidamente a temperatura ambiente sin presentar señales de crystalización se debe a que viscosidad, prácticamente infinita, impide su crystalización.

#### 2.2.1. Definición de Vidrio

De acuerdo a las características mencionadas de las sustancias vitreas se definirá en la forma más adecuada.

Per tanto según Pietzal, el más acertado, el vidrio se define como; un vitreide que es una sustancia compacta, físicamente uniforme que se encuentra en un estado amorfo, que a temperaturas bajas se hace rígida y frágil, y a temperaturas elevadas reblandece.

Dentro del amplio grupo de vitreides, puede adaptarse según con la composición, a la clasificación general de los mismos; de acuerdo a la tabla 2.1.

#### 2.2.2. Unidad Estructural Básica de los Vidrios de Silicate

Los cuatro electrones que presenta el átomo de silicio en su capa externa se disponen, cuando éste se halla en estado fundamental, apareándose dos de ellos en una orbita 3S y situándose los otros dos en dos orbitales 3P diferentes (figura 2.5.a.), Esta disposición electrónica sólo se le permitirá al silicio la formación de dos enla

TABLA 2.1

Clasificación General de diferentes  
Tipos de Vidrio según su composición

	No metálica
Elementos	S, Se
	Metálicos
	Au-si, Pt-Pd, Cu-Au
	SiO <sub>2</sub> , B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Oxidos	SiO <sub>2</sub> -Na <sub>2</sub> O, B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CaO
Inorgánicos	Calcogenuros As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> , GeSe <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
	HKSO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O,
Oxisales	Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
	Oxinitruros Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub>
Orgánicos Mixtos	Algunas siliconas
Orgánicos	Glicoles, azúcares, polímeros

ces covalentes y de uno coordinado. La aportación de pequeña cantidad de energía basta sin embargo para producir el desacoplamiento de uno de los electrones "S" y elevarle al nivel de un orbital P, lo que determina un estado de excitación del átomo y una mayor reactividad,



dad, (fig.2.5.b). En este estado se produce por interacción entre el orbital esférico S y los orbitales alargados P una hibridación de los mismos para dar lugar a la formación de cuatro orbitales q ó  $SP^3$  (fig.2.5.c) de igual forma y con el mismo contenido energético.

Puesto que sus cuatro electrones respectivos tienen el mismo SPIN, estos cuatro orbitales se repelan mutuamente alajandose entre sí lo más posible.

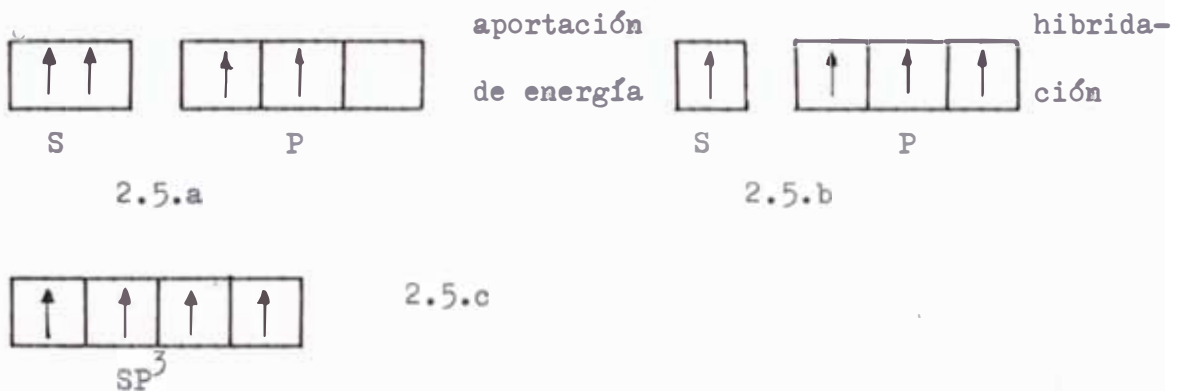


Fig. 2.5. Diferentes estados de los electrones de los orbitales.

El mayor alejamiento se consigue cuando se orientan hacia los cuatro vertices de un tetraedro (Fig.2.6) cada uno de estos orbitales puede albergar a dos electrones con spines antiparalelos. En el caso de los silicatos el segundo electrón de cada orbital es aportado por un átomo de oxigeno, estableciendose entre éste y el silicio un enlace mixto ionico-covalente.

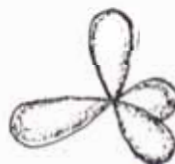


Fig.2.6 Orientación espacial de los cuatro orbitales  $sp^3$  de un átomo de silicio.

El grupo  $\text{SiO}_4$ , representado estereoquímicamente, por una coordinación tetraédrica de cuatro iones  $\text{O}^{2-}$  alrededor de cada catión  $\text{Si}_4^{+}$ ; ver (fig.2.7), es la unidad fundamental de los silicatos cristalinos y los vidrios silícicos. El radio de este catión (0.37Å en coordinación tetraédrica) le permite adaptarse muy aproximadamente al hueco de 0.50Å que dejan entre sí los cuatro iones oxígeno cuando se disponen tangencialmente entre sí en los cuatro vértices de un tetraedro.



Fig.2.7 Unidad tetraédrica fundamental de los silicatos.

La estructura tetraédrica proporciona al grupo,  $\text{SiO}_4$  una gran estabilidad, no solo por el perfecto acoplamiento geométrico de esta coordinación, sino también, desde el punto electrostático, ya que la cuadruple carga positiva del silicio queda neutralizada por las cargas procedentes de cada uno de los cuatro oxígenos circundantes.

Partiendo de estos grupos fundamentales  $\text{SiO}_4$  como unidades estructurales primarias, unidas entre sí por compartición de uno ó más vértices de oxígeno, pero nunca mediante aristas o caras comunes, se forman redes de los silicatos cristalinos y de los vidrios de silicato Fig.(2.8). Estos grupos tetraédricos también pueden unirse mediante diversos cationes de distintas valencias que se rodearán del número de oxígenos no compartidos, que determinan sus exigencias de coordinación.

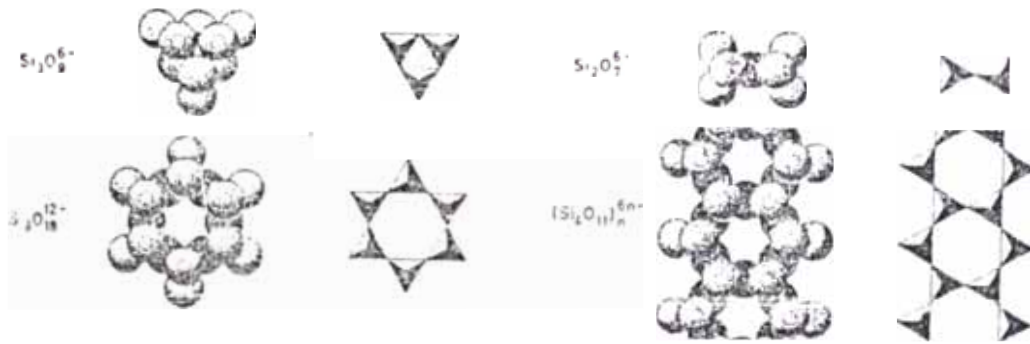


Fig.2.8 Distintas formas de agrupamiento de los tetraédros  $\text{SiO}_4$

### 2.2.3 Estructura del Vidrio

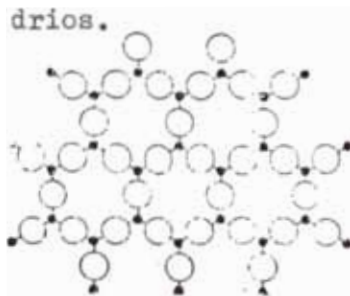
El compartimiento de los materiales está condicionado en buena parte por la ordenación que guardan entre sí sus elementos constituyentes. Por lo tanto, del conocimiento que se posea acerca de su estructura dependerán las posibilidades de aplicación y en definitiva, la utilidad de un material.

Para describir la estructura de los vidrios, en el transcurso de los 80 años últimos han habido, estudios bajo hipótesis geométricas y otras realizadas en bases científicas; aquí se va a describir dos modelos más importantes uno de cada caso. Esto se debe a que las múltiples investigaciones realizadas no definen completamente el compartimiento exacto de los vidrios.

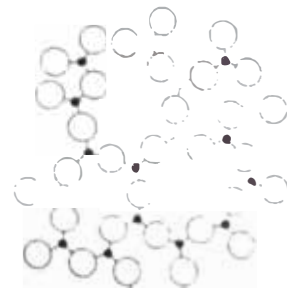
#### 2.2.3.1 Modelo del Retículo al azar (Geométrico)

Zachariasen parte de la base de que la rigidez mecánica de un vidrio resulta, dentro de un amplio intervalo de temperatura, muy semejante a la que presenta un sólido cristalino de la misma composición. Así mismo la diferencia entre el contenido energético, que le corresponde a una sustancia en estado cristalino y en forma

trea es muy pequeña, lo que hace suponer que en ambos casos, estas son constituidas por las mismas unidades estructurales y que las fuerzas de enlace que unen a sus elementos constituyentes sean de muy poca intensidad. Por otra parte, la aparición de bandas difusas, con ausencia de líneas de interferencia, en los diagramas de difracción de rayos X obtenidos en los vidrios, excluye la existencia de una rigurosa ordenación geométrica y conduce a la idea de un extenso retículo distorsionado, en el que los átomos deben disponerse sin la periodicidad y la simetría, característica de los cristales, aunque guardando una cierta distribución, estadísticamente uniforme, impuesta por las condiciones límites de estabilidad de sus enlaces interatómicos. Así pues, en opinión de Zachariasen, la diferencia fundamental entre una sustancia en estado cristalino y en estado vítreo no radica en la forma de sus unidades poliédricas de coordinación sino en su orientación relativa. En el caso de la sílice, dichas unidades corresponden a grupos tetraédricos  $\text{SiO}_4$ . Ahora bien, mientras que en las variedades cristalinas de la sílice estos tetraedros se hallan regularmente dispuestos, manteniendo a lo largo de las tres direcciones del espacio una secuencia determinada, en la sílice vítreo se distribuye con una orientación al azar (Fig.2.9). Una consecuencia de esta asimetría es el carácter isotrópico de los vidrios.



2.9.a Red cristalina  $\text{SiO}_2$



2.9.b Retículo al azar según Zachariasen.

Por otra parte, la disposición irregular y aperiódica de los poliedros de coordinación, que da lugar a una desigual distribución de la energía reticular, permite explicar, porque los vidrios funden entre límites más ó menos amplios de temperatura careciendo de un punto de fusión definido como el que presentan los sólidos cristalinos.

### 2.2.3.2 Técnica de difracción de Rayos X

A través de esta técnica, haciendo historia, se encontró que la posición de las bandas difusas, obtenidas en su espectro de difracción de rayos X, correspondía muy aproximadamente a los mismos ángulos de reflexión de las líneas de cristobalita, que se atribuía un tamaño de 15Å a los cristales del mismo, presentes en el vidrio.

Suponiendo de que la sílice vítrea constituyera un aglomerado de microcristales, Warren y Bisloe realizaron un cálculo de su tamaño medio en función del ensanchamiento producido por la banda de difracción de rayos X del vidrio con relación a la anchura del pico principal del diagrama de la cristobalita. Introduciendo en la banda de la sílice vítrea la corrección necesaria para compensar el fondo debido a las líneas más próximas que aparecen a la derecha en el diagrama de cristobalita.

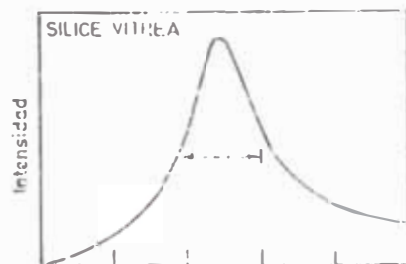
El valor obtenido para la semi anchura de dicha banda fué  $B_m = 0.181 \text{ RAD}$ . El ensanchamiento de la banda producido por el pequeño tamaño de los cristalitos viene dado por la expresión:

$$B = \sqrt{B_m^2 - B_o^2} \quad (2.5.1)$$

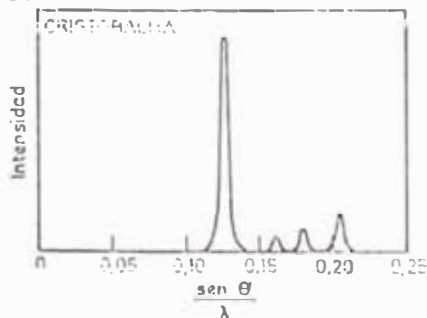
En la que  $B_o$  representa la anchura media del pico principal de difracción de la cristobalita. Sustituyendo el valor de  $B$  en la fórmula de Bragg se obtiene el diámetro medio de partículas:

$$D = \frac{0.89 \times \lambda}{B \times \cos(20^\circ)} = \frac{0.89 \times 1.54}{0.181 \times 0.98} = 7.7 \text{ \AA} \quad (2.5.2)$$

Valor que resulta menor al obtenido en los primeros cálculos realizados en los inicios de los experimentos por rayos X. (Fig.2.10)



2.10.a



2.10.b

Fig.2.10 Diagramas de difracción de rayos X. correspondientes (2.10.a) sílice vitrea y (2.10.b) a la cristobalita.

Este valor corresponde muy aproximadamente al tamaño de la celda elemental de la cristobalita y, por lo tanto, para este orden de magnitud no puede hablarse de verdaderos cristales, ya que el concepto de cristal supone la repetición tridimensional de la célula estructural fundamental.

Para interpretar los espectros de difracción de rayos X, se siguieron dos caminos. En un caso se empleó una modificación del método que ya había sido utilizado por otros autores en el estudio de la difracción en los líquidos. La intensidad de radiación difractada

por un grupo de átomos orientado en todas las direcciones del espacio se obtiene, en función del ángulo de difracción mediante la ecuación de Debye:

$$I = \sum_m \sum_n (f_m \times f_n) \times \frac{\text{sen}(s r_{mn})}{s r_{mn}} \quad (2.5.3)$$

Siendo S una función del ángulo  $\theta$  y de la longitud de onda de la radiación empleada;

$$S = 4 \pi \frac{\text{Sen } \theta}{\lambda} \quad (2.5.4)$$

y donde  $f_m$  y  $f_n$  representan los factores de difracción, para los átomos  $m$ ,  $n$ ; y  $r_{mn}$ , la distancia entre dichos átomos. Si tales distancias son conocidas, la intensidad se obtiene de un modo inmediato en función del ángulo.

Partiendo de datos cristaloquímicos, tales como distancias interatómicas, ángulo de enlace y número de coordinación, obtenidos en los silicatos cristalinos y en las formas cristalinas de la sílice, se deduce la distribución atómica alrededor de cada átomo. De esta manera queda definido el número de átomos vecinos y las distancias a que se encuentran, prescindiendo de la orientación de los grupos tetraédricos.

En el otro método realizaron un análisis de Fourier de la curva experimental de difracción de los rayos X y obtuvieron directamente una función de distribución radial que representa la densidad atómica ó números que rodean a un átomo de referencia en función de su distancia al mismo.

A partir de los resultados roetgenográficos representaron las curvas de distribución radial de la densidad electrónica en función de la distancia a un átomo determinado. En el caso de una sustancia

que presenta un completo desorden estructural, su densidad electrónica radial aumentará con el cuadrado de la distancia siguiente de una función parabólica. Si por el contrario, la curva se desvia de su curso parabólica, ello indica que, a la distancia en que se produce dicha desviación, existe una mayor probabilidad de encontrarse otro átomo o, lo que es lo mismo, pone de manifiesto un grado de ordenación, que será tanto mayor, cuanto más acusada sea la desviación observada. Así, pues, las curvas de distribución radial proporcionan dos datos importantes: La posición del máximo de los picos, que indica la distancia al átomo de referencia, y el área delimitada por ellos, la cuál resulta proporcional al número de átomo que le rodean Ver Fig. 2.11.a

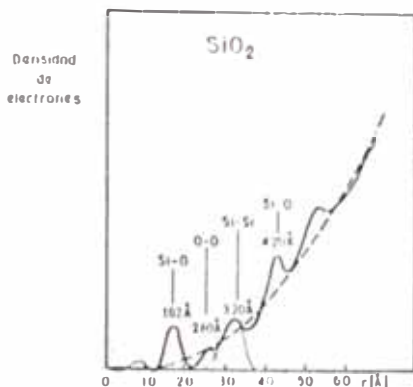
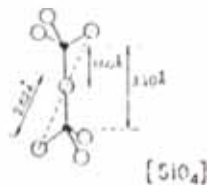


Fig. 2.11.a Curvas de distribución radial de densidad electrónica obtenidas en un vidrio Si O<sub>2</sub>



### 2.2.3.3 Teorías Basadas en la Formación de Agrupamientos (Teoría polímero cristalínico)

De acuerdo con esta idea, la red del vidrio no presentaría un desorden absoluto, sino que existirían algunas regiones aisladas con un elevado grado de ordenación las cuáles se hallarían unidas, a través de un entorno, más ó menos deformado, al resto de la matriz ví



tre que las rodea.

En el caso de vidrios formados por dos o más componentes se comprende que, por efecto de sus fluctuaciones locales en su composición, puede presentarse, con un grado de ordenación más elevado cuyo mayor o menor predominio dependerá de la composición del vidrio se aproximó localmente a una determinada relación estequiométrica de sus componentes (Fig. 2.11.b)

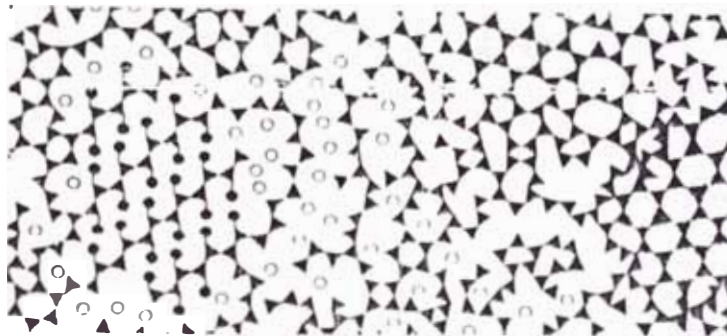


Fig. 2.11.b Modelo esquemático del retículo polímero cristalítico de un vidrio composición  $\text{Na}_2\text{O}_2$ . Se han presentado zonas de  $\text{SiO}_2$  vítreo con un distinto grado de ordenación, separadas por una fase más rica en silicato sódico. Los triángulos negros corresponden a tetraedros  $\text{SiO}_4$  y los círculos a iones  $\text{Na}^+$

La situación largamente debatida sobre el grado de ordenación estructural de un solo componente, le sucede la de la homogeneidad química de los vidrios complejos que presenta un nuevo aspecto del producto estructural.

Así, pues, la estructura de los vidrios, ni posee la ordenación reticular que propone el modelo de las cristalitos, ni la homogeneidad estadística que postula la hipótesis del retículo al azar. La

mayor parte de los vidrios presentan intrínsecamente micro heterogeneidades de naturaleza vítrea que no son, por lo tanto, atribuibles a defectos de homogeneidad de mezcla.

Considerando que en los vidrios de silicato alcalinos binarios con baja concentración de alcalí se producen acumulaciones locales, en forma de enjambre, de los iones modificadores. La formación de estas agrupaciones cuya causa es atribuida a diferencias de tensión superficial entre distintas zonas del fundido, permite interpretar ciertos comportamientos anómalos del vidrio, a la vez que obliga a desechar la idea de una rigurosa homogeneidad química. Los estudios posteriormente llevados a cabo por microscopía electrónica, técnica que fué aplicada por vez primera al estudio del vidrio por oberlies, y por dispersión luminosa confirmaron la naturaleza microheterogénea de la estructura de muchos vidrios y la existencia en ellos de microrecintos de inmisibilidad, cuya composición difiere a la matriz en que se encuentran dispersos. Esta separación de microfases no se debe a variaciones estadísticas de composición, sino que requiere una interpretación termodinámica basada en la variación de energía libre del sistema.

### 2.3 Materia Prima para Fabricación de Vidrio

Las materias primas empleadas para la fabricación de vidrios convencionales pueden clasificarse, siguiendo un criterio empírico basado en el papel que desempeña durante el proceso de fusión, en cuatro grupos principales.

1. Vitrificantes
2. Fundentes
3. Estabilizantes

#### 4. Componentes secundarios

Desde el punto de vista estructural, los vitrificantes corresponden a los óxidos formadores de red; los fundentes, a los óxidos modificadores; y los estabilizantes son aquellos óxidos que bien, pueden actuar de ambas maneras, o bien por su carácter intermedio, no son a simillables a ninguno de los grupos anteriores.

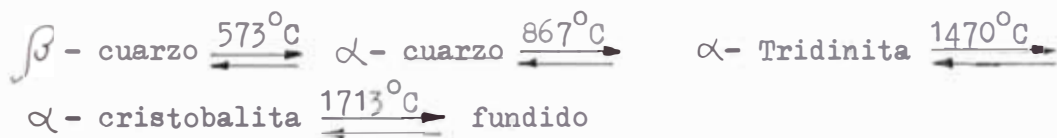
Entre los componentes secundarios se incluyen las materias que se incorporan en proporciones generalmente minoritarias, con fines específicos, pero cuya intervención no es esencial en lo que a la formación de vidrio, se refiere. (Ver tabla 2.2)

#### 2.3.1 Vitrificantes

##### 2.3.1.1 Silice

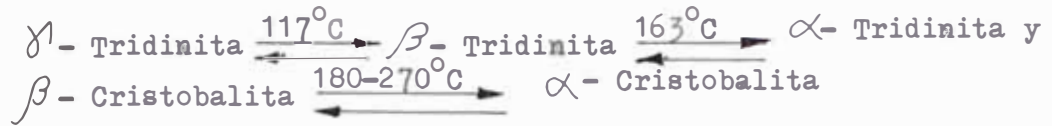
La sílice es el constituyente principal de la mayoría de los vidrios comerciales, en los que interviene formando aproximadamente las tres cuartas partes de su composición.

Entre las fases más conocidas se encuentran el cuarzo, la cristobalita, dos de las seis tridimitas, la keatita, la stishovita y la sílice W. Las formas más frecuentes y las mejor estudiadas son las tres primeras. Su intervalo térmico de estabilidad y sus respectivas transformaciones Enanciotropas son esquematizadas seguidamente.



Además de estas formas estables, existen otras modificaciones inestables y metaestables originadas por transformaciones a baja temperatura, tales como:





Las fases anteriores y sus temperaturas se encuentran resumidas en los siguientes gráficos (Fig. 2.12) y (fig. 13)

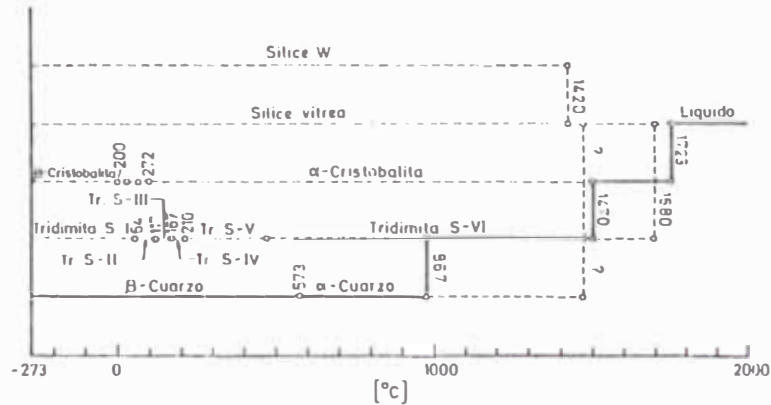


Fig.2.12 Clasificación gráfica de las fases de la sílice, con indicación de las temperaturas de inversión térmica. Las líneas de trazo continuo indican estados estables y las de trazo discontinua , estados meta estables e inestables.

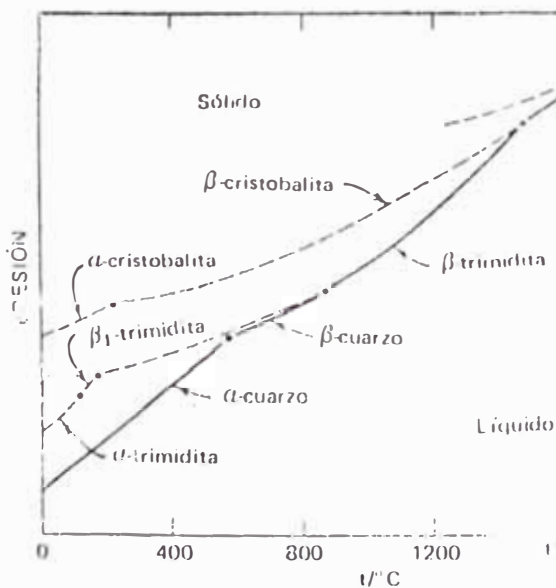


Fig. 2.13 Diagrama de fase de sílice presión VS temp. °C trazo continuo estable, discontinuo inestable o meta estable.

La cristobalita posee una estructura tetraédrica similar al diamante, relativamente abierta, lo que determina una red cúbica con un ángulo Si-O-Si distorsionado (casi  $180^\circ$ ), su densidad es de  $2.33 \text{ gr/cm}^3$ . La tridimita tiene una estructura exagonal abierta, con una densidad de  $2.19 \text{ gr/cm}^3$ , y es menos común de las variedades.

El cuarzo es la forma más común, con una red hexagonal formada por los tetraédros sin deformar, con ángulos Si-O-Si de  $120^\circ$  en el puente de oxígeno, su estructura es más compacta de los tres con una densidad de  $2.65 \text{ g/cm}^3$ .

Un conocimiento de las transformaciones es de gran importancia práctica en muchos aspectos de la fabricación del vidrio. En el estudio de defectos la caracterización de una u otra fase cristalina, formada accidentalmente en el vidrio, ayudará a establecer el origen de la anomalía.

Así mismo su conocimiento resulta de especial interés por las fuertes variaciones dimensionales de estas fases registradas en función de la temperatura, como consecuencia de las anomalías de sus dilataciones. (Fig. 2.14)

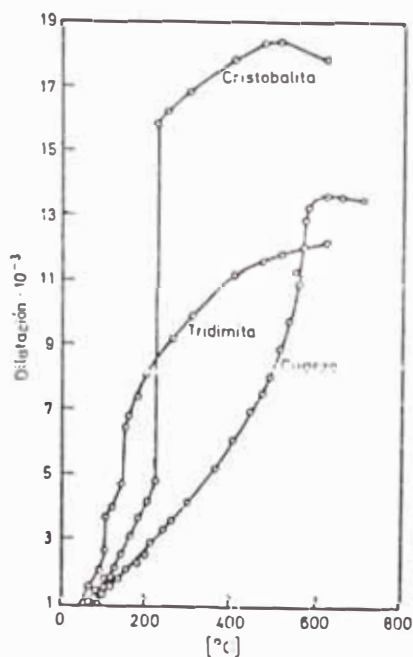


Fig. 2.14 Curva de dilatación térmica de las fases cuarzo, cristobalita y tridimita.

Estos cambios dimensionales desempeñan un papel importante y el intervalo térmico dentro del cuál se producen, resulta particularmente crítico durante el primer calentamiento de los hornos de fusión en que intervienen piezas de sílice, ya que la transformación del  $\beta$  - cuarzo ( $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ ) en  $\alpha$  - cristobalita ( $\rho = 2.21 \text{ g/cm}^3$ ) transcurre con una fuerte disminución de densidad que corresponde a un aumento de volumen de aproximadamente 16% ello exige que el calentamiento se efectúe gradualmente.

La formación de cristobalita también puede constituir un serio inconveniente durante el proceso de fusión de los vidrios. Los granos de cuarzo reaccionan fácilmente con los componentes de la mezcla vitrificable, pero, si eventualmente llegan a transformarse en cristobalita, su incorporación a la masa fundida resulta mucho más difícil ya que al tener menor densidad que ésta, tiende acumularse en su superficie.

Las fuentes principales del sílice como materia prima son el cuarzo, las cuarcitas, las arenas y areniscas de cuarzo, de cuarzo las de origen sedimentario, y la tierra de infusorios. Sin embargo de todas ellas, y exceptuando las pequeñas aportaciones indirectas de sílice que resultan del empleo de feldespatos y de algunos otros silicatos que ocasionalmente forman parte de la mezcla, pueden considerarse que es la arena de cuarzo la única que masivamente consume la industria vidriera. Si tomamos en cuenta que esto último es materia principal de vidrio; en la zona de Junín tenemos grandes reservas de esta materia, en Llocllapampa Muquiyauyo, y otros lugares alejados a Huancayo.

Los tres factores que limitan la utilidad de una arena como materia prima para la fabricación de vidrio, son sus características mineralógicas, químicas y granulométricas.

La proporción de sílice según normas DIN, debe ser superior al 99.5% en las arenas clase A y nunca inferiores al 98.5% en las clase C. Con frecuencia acompañan a las arenas cantidades importantes de feldespato, caolin, y otros minerales de arcilla que pueden eliminarse fácilmente por lavado, flotación y separación magnética la tolerancia de estas impurezas depende de la cantidad de  $Al_2O_3$ , que introduzcan y es función de la composición del vidrio pueda admitir. Normalmente puede considerarse aceptable un contenido de alumina entre 0.1 0.5%.

Especialmente perturbadora resulta la presencia de impurezas de densidad superior a  $2.9 \text{ gr/cm}^3$  conocidas en su conjunto con el nombre de minerales pesados, cuyas especies principales son indicadas en la tabla (2.3)

Su efecto nocivo se debe, por una parte, a los iones colorantes que contienen algunos oxidos, tales como; cromo, hierro y manganeso, y por otra parte, a su difícil disolución en el vidrio fundido cuando rebasan el tamaño de 0.3 0.4 mm. normalmente se recurre a la separación de estos minerales por flotación. Nunca debe permitirse su presencia en una proporción superior al 0.1 % y en ningún caso son admisibles especies, tales como la cromita, corindon y distena que pueden dar lugar a la formación de inclusiones sólidas de difícil digestión.

En cuanto a las características químicas resultan particularmente indeseables los iones de cromo por su intenso poder colorante. Las normas DIN limitan el contenido máximo de  $Cr_2O_3$  a un 0.0002 % en las arenas de clase A y B un 0.0006 % en las de la clase C.



TABLA 2.3  
 PRINCIPALES MINERALES CONTAMINANTES  
 DE LAS ARENAS

MINERAL	FORMULA	DENSIDAD
Anfiboles	Metasilicatos con grupos OH - of	2.9 - 3.7
Arizonita	$Fe_2(TiO_3)_3$	4.5
Casiterita	$SnO_2$	6.8 - 7.1
Circón	$ZrSiO_4$	3.9 - 9.8
Corindón	$Al_2O_3$	3.9 - 4.1
Cromita	$(Fe, Mg) Cr_2O_4$	4.5 - 4.8
Distena	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	3.6 - 3.7
Epidota	$Ca_2(Fe, Al)Al_2Si_3O_{12}(OH)$	3.3 - 3.5
Espinel	$MgO \cdot Al_2O_3$	3.5
Goethita	$FeO \cdot OH$	3.8 - 4.3
Ilmenita	$FeO \cdot TiO_2$	4.5 - 5.0
Magnetita	$FeO \cdot Fe_2O_3$	5.2
Olivino	$MgO \cdot FeO \cdot SiO_2$	3.2 - 4.2
Pirita	$FeS_2$	5.0 - 5.2
Piroxenos	Metasilicatos de elemento divalentes	3.1 - 3.5
Rutilo	$TiO_2$	4.2 - 4.3
Titanita	$CaO \cdot TiO_2 \cdot SiO_2$	3.4 - 3.6
Topacio	$Al_2SiO_4(F, OH)_2$	3.5 - 3.6
Trumalina	$NaF_3(AlF)_6(OH)_4/(BO_3)_3/Si_6O_{18}$	3.0 - 3.6
Zoisita	$Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)$	3.2 - 3.4

El óxido de hierro es una impureza habitual de las arenas, a la que en mayor o menor proporción siempre acompaña y por lo tanto hay que aceptar como un mal inevitable. Las posibilidades de utilización de la arena vienen limitadas en la fabricación de cada tipo de vidrio por el porcentaje de óxido de hierro presente. Este valor, según normas DIN es de 0.030 % para arenas de clase C, de 0.013 % para las de clase B y de 0.008 % para las de clase A.

En la tabla (2.4) se expone, en forma orientativa, las proporciones máximas recomendadas de  $Fe_2O_3$  que debe contener una arena según el tipo de fabricación de vidrio a que vaya a ser destinada.

TABLA 2.4  
CONCENTRACIONES DE  $Fe_2O_3$  PERMISIBLES EN LAS  
ARENAS PARA DISTINTOS TIPO DE VIDRIO

Tipo de Vidrio	$Fe_2O_3$ %
Optico	0.003 - 0.005
Cristal de plomo	0.006 - 0.012
Vidrio blanco y semi cristal	0.015 - 0.020
Vidrio blanco ordinario	0.020 - 0.030
Vidrio plano	0.030 - 0.050
Vidrio semi blanco	0.050 - 0.100
Vidrio botella verde	0.500 - 1.00

Las restantes impurezas son menos críticas y su gravedad depende principalmente del tamaño de sus granos o de su incompatibilidad con otras impurezas o con ciertos componentes que puedan hallarse si

multáneamente presentes. Así, la existencia de  $TiO_2$  es más perturbadora e presencia de  $Fe_2O_3$ , con el que puede producir la coloración parda oscura característica de la ilimita. La conce tración de  $TiO_2$  no debe sobrepasar e ningún caso del 0.06%.

El tercer factor determinante de la utilidad de una arena es su gralunometría. Aunque no existe una unani idad sobre este unto, la mayoría de las opiniones coincide en fijar los límites de tamaño de grano e tre 0.1 y 0.3 mm. para la fusió en crisol. En el caso de hornos, balsa el límite superior puede aumentar hasta 0.5 mm. o más según criterios, siempre que se mantenga por ebajo de 1 mm. La ta bla (2.5), muestra la distribució granulométrica de arenas de tamaño grueso, fino y muy fino empleadas para vidrios.

La proporción de finos, de ta o inferior a 0.1 mm debe ser in signific tes, generalme te menor del 1% de lo contrario estos finos reaccionarían de asiado rápido y anticiparian la formación de una ma sa vitria muy viscosa que requeriri un tiempo más largo de afinado. Los granos gruesos pueden dar lugar, con mucha probabilidad a la forma ción de infundidos.

La superficie específica de la arena es otro factor práctico de gran i portancia. A igualdad de tamaño son siempre más reactivos los granos ángulosos y rugosos que los redondeados, co o corresponde a su mayor superficie específica. Este efecto se hace notar espe cial ente al acelerar la velocidad de reacción durante las pri eras etapas de la fusión. El valor de la superficie específica reco enda da para una arena es 40  $60 \text{ cm}^2/\text{gr.}$

n el caso de que la arena seleccionada, en nuestra localidad no reuna las condiciones adecuadas para la fabricación de los productos pre establecidos se tendrá que someter a tratamiento requeridos.

TABLA 2.5  
 CLASIFICACION DE ARENAS POR SU  
 DISTRIBUCION GRALUNOMETRICA

Tamaño del Grano (mm)	FRACCIONES GRALUNOMETRICAS			% PESO
	Arenas Gruesas	Arenas Medias	Arenas Finas	Arenas Muy Finas
	1.0	max 1	---	---
1.0 - 0.5	5 -10	max 1	---	---
0.5 - 0.355	15 -35	5-15	max 1	---
0.355 - 0.25	25 -35	30-50	15-30	max 1
0.25 - 0.125	20 -30	40-60	60-80	80-90
0.125 - 0.063	0 - 1	0 -2	2-5	10-20
0.063	---	---	max 1	max 3

2.3.1.2 Anhidrido Bórico  $B_2(OH)_3$

Aunque es un excelente formador de vidrio, nunca se emplea, salvo casos muy especiales, como vitrificante único debido a su elevada solubilidad. Es un componente esencial de los vidrios neutros para laboratorio, de los vidrios termo resistentes de alta estabilidad a cambios bruscos de temperatura, de las fibras de vidrio y de otros vidrios especiales.

En proporciones discretas es un aditivo de gran interés para los vidrios sódicos cálcicos ordinarios, ya que actúa acelerando su fusión y mejorando varias de sus propiedades, tales como, su estabilidad química, su resistencia al choque térmico y su índice de refracción.

El anhídrido bórico comparte con la sílice el papel de formador y sus unidades estructurales en coordinación triangular y tetraédrica alterna en el retículo vítreo con los tetraédros  $\left[ \text{SiO}_4 \right]$ . En ausencia de óxidos modificadores, o para bajas concentraciones de estos, los iones boro adoptan coordinaciones triangulares, que pasan a tetraédricas cuando se alcanza una relación molar determinada. Este cambio de coordinación se manifiesta con la aparición de un máximo o de un mínimo en las curvas de variación de algunas propiedades del vidrio en función de su composición, fenómeno que se conoce con el nombre de anomalía bórica. La aparición de estos puntos singulares corresponde a un robustecimiento de la estructura vítrea, que se traduce en un aumento de la resistencia al impacto, del módulo de elasticidad, de la dureza y de la resistencia hidrolítica, así como en una disminución del coeficiente de dilatación térmica, que determina un mejoramiento de la resistencia al choque térmico.

La presencia del anhídrido bórico en la mezcla favorece la fusibilidad y disminuye la tensión superficial del vidrio fundido, lo que facilita el afinado y permite reducir los tiempos de fusión. Se ha demostrado que una sustitución de 1.5 al 2 % en peso de  $\text{SiO}_2$  por  $\text{B}_2\text{O}_3$  mejorara el rendimiento de la extracción del vidrio en un 15 un 20 %.

En la naturaleza existen muchos minerales que contienen anhídrido bórico, si bien los que tienen importancia técnica se reducen a poco más de media docena (Tabla 2.6). De todos estos minerales los más puros son la pandermita y la rasorita, aunque el primero puede contener impurezas de óxidos de cromo. La industria del vidrio acude con frecuencia al uso de colemanita y ulexita ambos suelen ir acompañados de impurezas de carbonato cálcico que normalmente no son

perjudiciales. Mas grave es la falta de homogeneidad química que suelen presentar estos minerales. Para remediar este inconveniente se recomienda someter el mineral a una deshidratación previa, con ello se consigue asimismo reducir las pérdidas de  $B_2O_3$  que se produce por volatilización durante la fusión del vidrio.

TABLA 2.6  
MINERALES QUE CONTIENEN ANHIDRIDO BORICO

Minerales		Naturales	
Mineral	Fórmula	$B_2O_3$	Peso %
Sassolina	$B_2O_3 \cdot 3H_2O$		56.32
Bórax o tinkal	$Na_2O \cdot 2B_2O_3 \cdot 10H_2O$		36.52
Kernita o rasorita	$Na_2O \cdot 2B_2O_3 \cdot 4H_2O$		50.96
Colemanita	$2CaO \cdot B_2O_3 \cdot 5H_2O$		50.82
Pandermita o price íta	$5CaO \cdot 6B_2O_3 \cdot 9H_2O$		48.57
Ulexita ó borona— tro calcita	$Na_2O \cdot 2CaO \cdot 5B_2O_3 \cdot 16H_2O$		42.96
Boracita ostassfor tita	$6MgO \cdot 8B_2O_3 \cdot MgCl_2$		62.30

Además de las fuentes naturales, y en muchos casos con preferencia a ellas, la industria vidriera emplea como materia primas bórica productos químicos preparados, tales como se muestran en e la tabla (2.7).

TABLA 2.7

PRODUCTOS QUIMICOS QUE CONTIENEN  $B_2O_3$

Producto	Fórmula	$B_2O_3$	Peso %
Acido bórico	$H_3BO_3$		56.32
Bórax decahidrato	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$		36.52
Bórax pentahidra-			
tado	$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$		47.81
Bórax anhidro	$Na_2B_4O_7$		.69.20

2.3.2 Fundentes

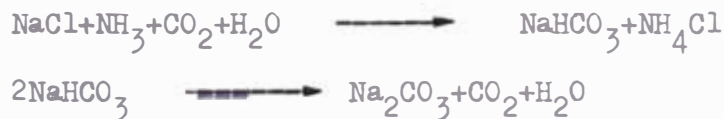
La finalidad de este grupo de componentes es favorecer la forma ción de vidrio, rebajando su temperatura de fusión, y facilitar su elaboración. Los óxidos que así actúan son modificadores de red y , dentro de ellos, son los alcalinos los que mejor cumplen este cometido.

La adición de fundentes viene limitada por la estabilidad de los vidrios. La adición de óxidos modificadores a la red vítrea, la apertura de enlace Si-O-Si, y por lo tanto, la creación de iones oxígeno no puente. Ello trae consigo una disminución de la cohesión ' del retículo que se manifiesta generalmente en detrimento de las propiedades del vidrio; es decir, aumento del coeficiente de dilatación térmica, debilitamiento de la resistencia mecánica, disminución de la viscosidad, mayor tendencia a la desvitrificación.

### 2.3.2.1 Carbonato Sódico

La materia prima más frecuentemente utilizada para introducir el óxido de sodio en el vidrio es el carbonato sódico, comúnmente llamado SOSA. En el Perú, existen yacimientos de carbonato sódico natural ó trona ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{HCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en un % de ( $\sim 40\%$ ). Sin embargo el carbonato sódico que se emplearía en la industria vidriera se prepara por el método SOLVAY, que consiste en el tratamiento del cloruro sódico con bicarbonato amónico para formar bicarbonato sódico que posteriormente se somete a una descarbonatación.

El proceso puede resumirse según las reacciones.



La composición química aproximada de la Sosa Solvay se indica en la tabla(2.8)

TABLA 2.8

COMPOSICION QUIMICA MEDIA DE LA SOSA SOLVAY

Componentes	%
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	97.5 - 99.5
$\text{NaHCO}_3$	0.015 - 0.025
$\text{NaCl}$	0.35 - 0.70
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	0.02 - 0.05
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.001 - 0.003
$\text{H}_2\text{O}$	0.1 - 0.8



Las impurezas que habitualmente la acompañan son restos de cloruro sódico sin reaccionar, óxido de aluminio y óxido de hierro que, en la concentración en que se encuentran, son inofensivas. La más crítica es el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , cuyo contenido no debe exceder del 0.005 %.

Comercialmente se fabrican dos variedades de sosa, de distinto tamaño de grano, que se caracterizan por su diferente densidad aparente: Sosa ligera ( $\rho = 0.8 - 0.9 \text{ gr/cm}^3$ ) y sosa densa ( $\rho = 1.1 - 1.3 \text{ gr/cm}^3$ ). En la primera, la proporción mayoritaria está constituida por la fracción granulométrica menor de 0.1 mm. y por la comprendida entre 0.1 y 0.3 mm.

La sosa densa presenta un predominio de los tamaños de grupo comprendidos entre 0.1 y 0.3 y entre 0.3 y 0.5 mm.

Es muy importante que la sosa no contenga fracciones inferiores a 0.1 mm, con el objeto de evitar la formación de polvo y que se produzcan segregaciones durante la preparación y transporte de la mezcla vitrificable.

Por otra parte, cuanto más pequeño sea el tamaño de grano, más microscópico resulta y más fácil y rápidamente toma el agua de la mezcla para formar hidratos. Al perderse la humedad, se facilita la segregación de componentes. Por eso muchos veces se recurre a la formación previa de monohidratos. Se ha comprobado que el mejor rendimiento de fusión se obtiene cuando la granulometría de la sosa se mantiene ligeramente inferior al de la arena.

#### 2.3.2.2 Otras materias primas aportadoras de Oxido de Sodio

En los últimos años se ha ensayado con gran éxito tanto en cuanto al acortamiento del tiempo de fusión se refiere, como al apreciable ahorro energético, el empleo de disoluciones muy concentradas de

hidróxido sódico empapadas en el resto de la mezcla.

Por razón económica, se está haciendo cada vez mayores esfuerzos para el aprovechamiento de rocas que contengan elementos alcalinos. Dentro de ellas figuran algunas rocas magnéticas, como la nefelina, fonolita, traquita, granito, la obsidiana, perlita, etc.

Las principales especies que componen las rocas magnéticas son cuarzos, mica, feldespato, feldespatoideos, piroxenos y anfíboles.

Entre los feldespatos más importantes figuran los de la serie de la ortoclasa ( $KNa)_2O \cdot 1_2O_3 \cdot 6SiO_2$ ) y la de plagioclasa ( $CaNa_2O \cdot 1_2O_3 \cdot 6SiO_2$ ) y entre los feldespatoides, la nefelina  $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  y la leocita  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ .

Los factores que, de acuerdo con el tipo de vidrio pueden limitar la aplicación de estas rocas son la concentración de sus impurezas de hierro y su contenido de alúmina.

La proporción de alúmina oscila alrededor del 16% en el granito y la traquita, y alrededor del 23% en la nefelina y en la fonolita.

Notobstante su elevada proporción de alúmina, son estas últimas las que más se emplean como materias primas vidrieras, porque con un contenido alcalino total del orden del 16%, con las rocas magnéticas las que presentan la relación  $R_2O/SiO_2$ , más favorable (15-16/54-56 frente a 8-9/68-70 en el granito). En cuanto al óxido de hierro, existe una notable ventaja por parte de la nefelina, que no suele sobrepasar el 0.1% de  $Fe_2O_3$ , con respecto a la fonolita, en la que este óxido llega al 3%. La fonolita también presenta el inconveniente, desde el punto de vista de contaminación, de tener contenidos elevados de iones  $F^-$  y de iones  $Cl^-$  que pueden alcanzar 0.2 y 0.3 % respectivamente.

### 2.3.2.3 Oxido de Potasio

Originalmente muchos vidrios fabricados en la antigüedad fuerón potásicos, ya que la principal materia prima fuerón alcalinos potásicos de que podían disponer los vidrieros primitivos, las moles que procedían de la madera calcinada.

El empleo del óxido de potasio en sustitución del sodio lleva consigo un ennoblecimiento de la calidad del vidrio y un aumento del brillo. Debido al mayor volumen iónico del potasio, los vidrios potásicos son más viscosos, que los sódicos y presentan un intervalo más largo de moldeabilidad.

Habitualmente el óxido de potasio se introduce en el vidrio a partir del carbonato potásico. Debido a su marcada higroscopicidad, tiende a formar carbonatos hidratados más estables de ( $K_2CO_3 \cdot 1,5H_2O$  y  $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$ ).

La mayor parte del carbonato potásico se obtiene a partir de silvina y carnalita y de las melazas del azúcar de remolacha. Las impurezas que más frecuentemente le acompañan son KCl,  $K_2SO_4$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $K_3PO_4$ ,  $K_2SiO_3$  y  $Fe_2O_3$ , que normalmente no se hallan en concentraciones perturbadoras.

### 2.3.2.4 Oxido de Calcio

El óxido de calcio es el componente que, después de la sílice y del óxido de sodio, ocupa el tercer lugar en proporción dentro de la composición de los vidrios comerciales ordinarios. Su presencia aumenta la estabilidad química y mecánica del vidrio, por lo que, desde el punto de vista funcional, actúa como estabilizante, aunque estructuralmente tenga el carácter de modificador de red un exceso de óxido de calcio puede facilitar la desvitrificación si la composición

on del vidrio entra dentro de la zona de estabilidad de ciertas fase cristalinas.

### Carbonato Cálcico

La materia prima habitualmente empleada para introducir el óxido de calcio es la caliza natural.

Las calizas se prese tan en la naturaleza, bajo dos variedades cristalinas de calcita y aragónito, en forma de rocas o de agregados granulares. La mayor parte de los yacimientos de caliza estan constituido por sedimentos masivos depositados e fosas de mares primitivos, como puede verse por su abundante i clusión de fósiles. Debido a su origen Bioge ético, las calizas suelen tener una composición muy pura y homogénea, aunque a veces presenta concentraciones variables de sílice o de fosfato, procedente de esqueletos de micro organismos o peces, así como pequeñas cantidades de óxido de magnesio , generalmente inferiores al 0.3 % cuando estos yacimientos han estad sometidos por acción de corrientes continentales con arrastre de arcilla o arena, pueden formarse margases areniscas calcáreas, que se observa, sobre todo en las zonas próximas a la superficie o en los flancos de los yacimientos, tales depósitos hacen perder el interés de estas materias para la industria del vidrio.

A consecuencia de estas sedimentaciones o arrastres secundarios las calizas van acompañadas, a veces, de sílice, alúmina y óxido de hierro. Como siempre la presencia de este último es la más i deseable para su uso como materia prima vidriera.

Según normas ( DIN ), las calizas para la fabricación de vidrio debe tener una riqueza mínima del 55.2 % de CaO. En cuanto a impurezas, la concentración de  $Fe_2O_3$  no debe exceder del 0.035 % y el contenido de materia orgánica deb ser inferior al 0.1 %.

Cualquier otro elemento colorante del vidrio debe estar ausente. El residuo insoluble en ácido clorhídrico, incluyendo la sílice debe mantenerse por debajo del 1 % y otras impurezas, tales como manganeso, plomo, azufre y fóforo consideradas individualmente, no han de exceder del 0.1 % expresadas en óxidos.

El tamaño de grano de caliza debe estar comprendida entre 0.3 y 1.2 mm. Cuando la fusión del vidrio se realice en crisol. Para la fusión en hornos de balsa el intervalo granulométrico debe ser más estrecho. Así, el tamaño de grano no puede ser mayor de 0.45 mm, pero la fracción inferior a 0.12 mm, no debe exceder del 25 %.

#### Otras materias de Oxido de Calcio

Con carácter excepcional se ha introducido el óxido de calcio bajo la forma de cal viva ( $\text{CaO}$ ) ó de cal muerta  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . La ventaja de ambas radica en su mayor grado de pureza. En el primer caso debe señalarse el inconveniente de su higroscopicidad, si bien es ampliamente compensado por el aumento de la velocidad de fusión que puede llegar a ser de un 20 %.

En ocasiones, para introducir parte del óxido de calcio, también se recurre a otras materias primas naturales, como el feldespato cálcico o amortita ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) que es a la vez fuente de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

El elevado contenido de alúmina constituye al mismo tiempo una importante limitación de sus posibilidades de aplicación.

#### 2.3.2.5 Oxido de Magnesio

Este óxido desempeña en el vidrio un papel semejante al del óxido de calcio y completamente en cierto modo la acción que este ejerce, mejorando algunas propiedades, los vidrios magnésicos son más estables que los de calcio y basta en ellos una pequeña concentración

de MgO para disminuir su tendencia a la desvitrificación. Al mismo tiempo, la presencia de este óxido en proporciones del 3% al 4% eleva la viscosidad del vidrio y alarga el intervalo térmico de oldeabilidad.

La materia prima más frecuente para su introducción en el vidrío es la Dolomita. La magnesita nunca es aconsejable emplearla causa de su elevado contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

#### Dolomita

La mayoría de los yacimientos de Dolomita o Carbonato doble de calcio y magnesio ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) son de origen secundario, formados por procesos de alteración de las calizas debido a la aportación de soluciones de magnesio. En general, son muy puras y presentan sobre la magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) la ventaja de su contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , la cual es considerablemente menor. Las restantes impurezas que pueden acompañarla, tales como sílice y alúmina, en la concentración en que comúnmente suelen estar presentes, no resultan nocivas.

Respecto a su granulometría, se aconseja que no existan granos mayores de 0.5 mm ni menores de 0.1 mm, que podrían favorecer la segregación de la mezcla.

#### 2.3.2.6 Oxido de Bario

Este componente, aunque químicamente emparentado con los óxidos alcalinoterreos anteriores es decir, se comportan en el vidrio muchísimo más parecidas a las que le comunica el óxido de plomo. Si aumenta su densidad, índice de refracción y brillo, y mejora su sonoridad. Debido a su elevado radio iónico, aumenta la viscosidad del vidrio, le hace más moldeable y ensancha su intervalo de trabajo.

Ninguna de las dos especies minerales bajo las que más frecuentemente se presentan en la naturaleza, baritina ( $\text{BaSO}_4$ ) y Whiterita ( $\text{BaCO}_3$ ) son materias primas empleadas por la industria vidriera. La industria recurre generalmente a productos de síntesis más puros tales como el propio carbonato o el vitrato.

### 2.3.3. Estabilizantes

Algunos de los componentes tales como  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ , desempeñan un papel estabilizante en el vidrio, se han incluido en el apartado anterior por tratarse de verdaderos modificadores de red, y se han reservado para este lugar aquellos óxidos que, además de estabilizar ciertas propiedades, actúan con un carácter intermedio entre el de los verdaderos formadores de red y el de los modificadores.

#### 2.3.3.1. Oxido de Aluminio

El ion aluminio puede actuar como modificador de red en coordinación octaédrica o como formador de red en coordinación tetraédrica  $\text{AlO}_4$  alternando con, los iones silicio. La formación de coordinaciones tetraédricas exige una mayor proporción de oxígeno que le corresponde a la fórmula del óxido introducido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Para satisfacer estos requisitos, parte de los oxígenos no puente se unen al ión aluminio, convirtiéndose en oxígeno puente que hacen disminuir el número de enlace y aumentar la cohesión del retículo vítreo.

La incorporación de alúmina al vidrio lleva aparejado, por lo tanto, un aumento de la resistencia mecánica, un mejoramiento de la estabilidad química, una elevación del índice de refracción, una disminución del coeficiente de dilatación térmica y, consecuente a esto, una mejor resistencia al choque térmico. Por otra parte, la presencia de

mina reduce la tendencia a la desvitrificación, aumenta la viscosidad del vidrio, ensancha su intervalo de trabajo y eleva considerablemente su tensión superficial esto hace que los vidrios aluminosos, además de requerir temperaturas de fusión más altas, presentan mayores dificultades para su afinado.

En la mayoría de los vidrios sódico cálcicos comerciales es frecuente la incorporación de  $Al_2O_3$  en una proporción del 1 al 3%. Este contenido es mayor en los vidrios especiales que estarán sometidos a altas temperaturas durante su uso.

#### Feldespatos

Las materias primas que más se utilizan habitualmente para aportar alúmina al vidrio son los feldespatos, cuyos representantes más típicos son los de las series de las ortoclasas y de las plagioclasas así como la anortita ( $CaO.Al_2O_3.2SiO_2$ ). Su uso es recomendable porque son compuestos que funden a temperaturas relativamente bajas y se incorporan fácilmente al vidrio sin producir perturbaciones.

#### Hidróxido de Aluminio

De los hidróxidos de aluminio naturales, como son el Diásporo ( $Al_2O_3.H_2O$ ), bauxita ( $Al_2O_3.2H_2O$ ) e hidrargilita ( $Al_2O_3.3H_2O$ ), el más abundante y el que puede encontrar mayor repercusión industrial es la bauxita. Sin embargo, la elevada proporción de óxido de hierro que la acompaña limita la aplicación a algunos tipos de vidrio verde.

#### Productos Químicos Aluminosos

Raramente y sólo en casos que se requiera una elevada pureza, recurre la industria vidriera a productos químicos tratados, como la alúmina calcinada ( $Al_2O_3$ ), el hidróxido de aluminio  $Al(OH)_3$  y el nitrato de aluminio  $Al(NO_3)_3.15H_2O$



### 2.3.3.2 Oxido de Plomo

El óxido de plomo es uno de los componentes que más ennoblecen la calidad de vidrio, proporcionándole un alto índice de refracción y brillo, una elevada densidad y una buena sonoridad. Los vidrios de plomo deben fundirse en atmósferas fuertemente oxidante para evitar la reducción de este óxido a metal elemental. Funden con facilidad y resultan muy moldeables dentro de un amplio intervalo térmico. El principal inconveniente que presentan estos vidrios es el de ser más blandos que los sódico cálcicos ordinarios.

El óxido de plomo se emplea en muchos vidrios ópticos, en vidrios para aplicaciones eléctricas y electrónicas y en los vidrios artísticos y decorativos.

### 2.3.3.3 Oxido de Zinc

La adición de óxido de zinc en proporciones hasta el 5 % resulta generalmente favorable a la mayoría de vidrios comunes. Este componente actúa mejorando la resistencia química del vidrio, elevando el índice de refracción, aumenta la dureza y reduce el coeficiente de dilatación térmica. A altas temperaturas disminuye la viscosidad de vidrio y facilita el afinado.

De las materias primas naturales que pueden emplearse son la smithsonita ( $ZnCO_3$ ), y la cinkita ( $ZnO$ ) sin embargo, casi siempre se recurre a preparados de óxido de zinc bien en su forma blanca que es la de mayor pureza o en su forma gris, que suele ir acompañada de alrededor de un 5 % de  $PbO$  y de un 0.2 - 0.3 %  $Fe_2O_3$ .

### 2.3.3.4 Componentes Secundarios

En la composición de los vidrios intervienen habitualmente

otros constituyentes minoritarios con funciones determinadas; Colo  
rantes, decolorantes o pacificantes, etc. que no se considera de mu  
cha importancia en lo que respecta a la fusión del vidrio.

#### 2.3.4. Formas de Expresión de la Composición de los Vidrios

En las formulaciones industriales la dosificación de todos los  
componentes suele referirse a cien partes en peso de arena.

La transformación de la composición molar a la composición ponde  
ral se efectúa de la manera siguiente:

$$a_{pi} = \frac{a_{mi} \times M_i \times 100}{\sum a_{mi} \times M_i}$$

Donde:	$a_{pi}$	Composición ponderal
	$a_{mi}$	% molar
	$M_i$	Peso molecular
	$\sum$	Sumatoria del % molar peso molecular del compuesto.

La cantidad de componente  $C_i$  que hay que incorporar a la mezcla  
vitrificable para introducir el tanto % del óxido requerido, se ob  
tiene multiplicando dicho porcentaje por el factor  $f_i$  de equivalen  
cia correspondiente a la materia prima bajo la que se desee introdu  
circe (Ver tabla 2.9).

$$C_i = a_{pi} \times f_i$$

A continuación se proporciona tablas de composición de vidrio.  
Ver tabla (2.10) y tabla (2.11)

TABLA 2.9

Oxido	peso mol cul.	A partir del comp.	Peso molecul.	Factor Fi
SiO <sub>2</sub>	60.96	--		
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	69.62	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	61.83	1.776
		Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	381.38	2.739
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101.96			
Li <sub>2</sub> O	29.88	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	73.89	2.473
Na <sub>2</sub> O	61.98	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	142.04	2.292
		Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	381.38	6.153
		Na NO <sub>3</sub>	85.00	2.743
		Na F	41.99	1.377
K <sub>2</sub> O	94.20	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	138.21	1.467
		K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	174.26	1.850
		KNO <sub>3</sub>	101.10	2.146
Mg O	40.31	Mg CO <sub>3</sub>	84.32	2.092
		MgCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	184.41	4.575
CaO	56.08	CaCO <sub>3</sub>	100.09	1.785
		MgCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	184.41	3.288
		CaF <sub>2</sub>	78.06	1.392
BaO	153.34	BaCO <sub>3</sub>	197.35	1.287
PbO	223.19	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	685.57	1.024



TABLA 2.11  
COMPOSICION DE ALGUNOS VIDRIOS INDUSTRIALES

	Componentes (Peso %)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	BaO	PbO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Plano Estirado	71-73	0.5-2	-	12.5-15	0-1	1-4	4-10	-	-	0.3
Plano Flotado	70-71.5	0.5-1.5	-	13-14	0-1	4-5	8-9.5	-	-	0.3
Semi Blanco (Envases)	69-73	1-2.5	-	12-15	0-2	1-2.5	8-10	0.5	-	0.1
; Verde para Envases	65-71	1-5	-	12-16	0-1	1-2	8-12	-	-	0.2-2
Servicio de mesa	71-74	1-2	-	11-15	0-4	0-2	7-9	0-3	-	0-02
Material de Labort.	71-73	1.5-4.5	5-9	6-8	0-1	2-4.5	2-4	0-3	-	0.1
Farmacautico Neutro	70-75	5-9	5-9	6-8	0-1	0-1	3-7	2-4	-	0.1
Cristal	55-62	-	0-1	0-3	8-14	-	0-3	0-3	24-35	0.01
Crown de Silicato	63-69	-	2-2.5	4-5	15-16	-	0-8	0-11	0-1	0.01
Vycor	96.6	0.4	2.9	0.02	0.02	-	-	-	-	0.01
Pyrex	80.3	2.8	12.2	4.0	0.4	-	0.3	-	-	0.01

## 2.4 Energía

### 2.4.1 Tipos de Energía Disponible

Las energías que se disponen en la localidad de Huancayo y sus lugares aledaños son: La eléctrica, y carbonífera, de esta última son de dos tipos de carbón, antracítico y bituminoso. Los combustibles de tipo petroquímico, también son fácilmente obtenidos por comercialización.

Posteriormente elaboraremos tablas que nos proporcionan cierta información de los tres tipos de fuente de energía, tales como; energía disponible, costo de la energía, cantidad de energía por kg de material a fundir (por cada tipo de energía utilizada); y valores aproximados de eficiencia de los hornos, eléctricos o de combustible.

#### 2.8.1.1 Energía Eléctrica

Los hornos eléctricos, para fundir vidrio normalmente hace uso de la propiedad en la que el vidrio a altas temperaturas se transforma en un buen conductor de la electricidad; ya que el vidrio se comporta como electrolito.

Para este tipo de hornos lo más recomendable es utilizar electrodos, entre los cuáles se encuentra los de molibdeno; ya que estos son los menos contaminantes, de mayor duración y alcanzan las temperaturas más altas. Las tablas (2.12.a), (2.12.b), proporcionan información tales como costo, cantidad de energía utilizada por kg de vidrio a fundir, eficiencia de los hornos y proyección de los costos años futuros. En estas tablas también se ha incluido los mismos valores para los hornos de inducción; como alternativa, pero

no son recomendables porque usan crisoles de platino y solo funden poco material.

TABLA 2.12.a  
 CARACTERISTICAS ENERGETICAS DE HORNOS  
 ELECTRICOS Y SUS COSTOS

Tipo de horno eléct.	Eficiencia %	Energía /kg. de fund. Kw-h/kg	Temper. de paredes °C	Produc. de vidrio Ton/m <sup>2</sup>	Energía/peso Fund. Kcal/kg
Horno por electrodo	0.85	0.72	300-400	2	605
Horno por Inducción	0.90	0.63	200-300	1.5	540

Los datos que se proporcionan a continuación han sido obtenidos de Electro Centro; estos datos estadísticos, también proporcionan una proyección hasta el año 1990, del costo de energía.

TABLA 2.12.b  
 CUADRO ESTADISTICO DE ENERGIA ELECTRICA  
 Y COSTO EN HUANCAYO

Año	Energía disponible. Kw	Punto crítico de utilización Kw	Costo I/Kw-h
87	8,000	5,000	2.10
88	9,000	7,000	6.20
89	10,000	9,000	15.40
90	10,000	11,000	32.10

De acuerdo a estos datos se graficará las curvas de energía disponible vs.año y costo Vs.año. Ver Fig.(2.15) y (2.16).

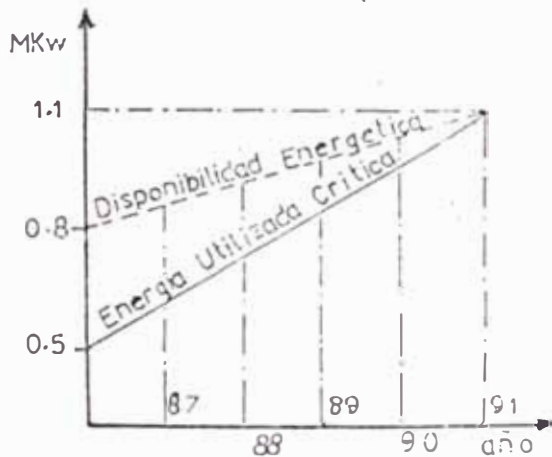


Fig. 2.15 Variación y proyección, energía disponible Vs año y energía utilizable crítica.

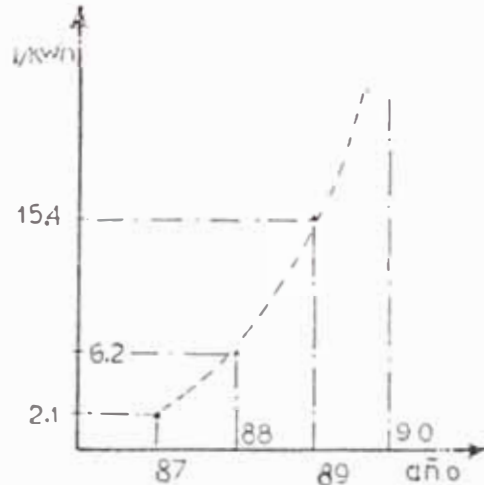


Fig. 2.16 Proyección de costo de energía.

En la figura 2.15, podemos observar que el crecimiento de energía proyectada, crece en menor proporción que la energía utilizable crítica. Lo cual indica que Electrocentro tendría que corregir su programa energético.

En la Fig.(2.16); el costo de energía eléctrica en la localidad de Huancayo crece parabólicamente. Esto se debe a la devaluación de nuestra moneda y al incremento en costo de mantenimiento.

#### 2.4.1.2 Energía Carbonífera

En la localidad de Huancayo, y zonas aledañas existe grandes reservas de carbón antrasítico y bituminoso, aun no explotados.

Los carbonos para ser utilizados en hornos de vidrio; no son recomendables en su utilización directa, ya que forman muchas cenizas



y por ser dificultoso en la regulación de la combustión. Lo cuál implica su utilización con tratamiento especiales para ser empleadas como gas.

La tabla (2.13), proporciona los tipos de carbones que existen en la localidad de Huancayo, su poder calorífico, costos de extracción aproximado en dólares, el costo de tratamiento, la eficiencia del horno y el costo total de energía en el horno.

Lo que muestra la tabla (2.13) es la evaluación del costo energético del carbón, lo cuál indica lo económico que resulta usar este tipo de fuente energética. Con toda la información proporcionada hasta el momento, la cuál nos servira de ayuda, para la evaluación de factibilidad energética, que se desarrolla en la sección siguiente.

TABLA 2.13  
 CARACTERISTICAS ENERGETICAS Y DE COSTO  
 DE LOS HORNOS Y CARBON

Tipo de Carbón	Poder Calorífico Kcal/Kg.	Costo de Extracción \$/Tn.	Costo de tratamiento \$/Tn	Eficiencia del horno %	Costo Total de Ener. \$/kg	Costo Ener. Kcal/\$	Ener Kgr. Fun. Kcal/Kg.
Antrácitico	8,600	7.28	40	15	0.32	26,875	2800
Bituminoso	7,800	6.70	50	12	0.47	16,595	2800

### 2.4.1.3. Energía de los productos petroquímicos

Los combustibles líquidos han probado ser ventajosos en muchas aplicaciones metalúrgicas. Aunque usualmente los petróleos combustibles son de un costo de adquisición mayor que el carbón, por Kcal. Otras características pueden conducir a un costo general del calentamiento más económico utilizando petróleo. En particular los petróleos combustibles son de fácil manejo, almacenamiento y transporte de conducción al horno dentro de la planta.

Los petróleos están conformados por una serie de hidrocarburos del tipo aromático ( $C_n H_{2n-2}$ ) y oleofenicas ( $C_n H_{2n}$ ). Y de acuerdo a la mayor o menor cantidad de estas tendremos la calidad de petróleo siendo los mejores los que tienen mayor cantidad de series oleofenicas.

El peso específico de los petróleos se determina en grados API (Instituto Americano del Petróleo), con un hidrómetro marcado en forma especial. La unidad se define con la siguiente relación

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{\gamma_{\text{esp. a } 60^{\circ}F}} = 131.5$$

De acuerdo a esto podemos observar que los combustibles más pesados son los que tienen menos de  $10^{\circ}$  y los más ligeros los que tienen más de  $10^{\circ}$  API, siendo su rango de  $10^{\circ}$  a  $50^{\circ}$  API. De acuerdo a esta propiedad se hará la elección del sistema de bombeo y equipo de calentamiento de petróleo.

El poder calorífico de los petróleos no es el mismo para todos Los tipos de grado; pero con cierta variación. Por ejemplo los petróleos de grado más ligero tienen mayor calentamiento, más elevado sobre una base en peso. Pero en volumen los más pesados pro

porcionan un mayor poder de calentamiento.

A continuación se elaborará la tabla (2.14), la cuál muestra los tipos de petróleo, costo, poder calorífico, eficiencia del horno, y costo por Kcal/\$.

TABLA 2.14  
CARACTERISTICAS ENERGETICAS Y DE COSTO  
DEL HORNO A PETROLEO

Tipo Petróleo	Poder Calorif Kcal/Kg.	Peso Pet. /Peso fund. Kg/Kg.f	Eficien Hornos %	Peso Petrol. /costo Kg/\$	Calor /costo Kcal/\$	Energía /Kg.f Kcal/kg
Diesel # 2	10,210	0.20	20	0.33	3,369	1,985
Diesel # 6	9,660	0.24	16	0.40	3,864	2,400

De acuerdo a los datos proporcionados en las tablas anteriores se procederá hacer, la evaluación energética a través de un estudio de factibilidad. Lo cuál determinará el tipo de energía, más adecuado a ser usado para fundir vidrio en la localidad de Huancayo.

#### 2.4.2. Estudio de Factibilidad para el Uso de Tipo de Energía

Para poder evaluar el tipo de energía a usar se tomará en cuenta muchos factores, tales como consumo de energía por Kg de fundido, seguridad, eficiencia del tipo energético, inversiones en aparatos se

cundarios, seguridad, temperaturas máximas alcanzables, inversión inicial y disponibilidad energética.

Para llevar a cabo la evaluación se hará en base de puntajes los cuáles serán tomados en base 100, siendo los mayores valores, correspondientes a una mayor factibilidad. Aunque esto se hará en una forma subjetiva, se dará explicaciones en base a datos obtenidos por información de instituciones tales como Electrocentro e Intintec.

Ver Tabla (2.15)

TABLA 2.15

CUADRO DE FACTIBILIDAD

Tipo de Energía vs. tipo horno			
Factor	Eléctrico	Petróleo	Carbón
Eficiencia - Horno	80	50	40
Tratamiento Especial	60	80	50
Seguridad	70	70	80
Inversión Inicial	40	80	50
Disponibilidad inmediata de la fuente	60	90	40
Costo de energía	70	60	50
Contaminación	70	70	50
Costo de Mantenimiento	50	80	60
Factores	500	570	390

#### 2.4.2.1 Criterio de Puntaje de Factores

##### Eficiencia de Hornos

Los eléctricos son de mayor eficiencia, debido a que no hay fuga de calor por gases, los hornos de petróleo tienen mayor eficiencia que los de carbón, ya que sus gases radian calor mejor que los de carbón tratado.

##### Tratamiento Especial de la Energía

Los eléctricos necesitan ser transformados y darle control especial, los de carbón tienen por otro lado que ser tratados, pulverizados y atomizados o gasificados, mientras que el petróleo solo es a través de su quemador.

##### Seguridad

Los sistemas eléctricos traen normalmente inconvenientes de la fabricación de vidrio cuando hay apagones a causa de cortos circuitos en la planta o en nuestro medio debido a situaciones imprevistas de las centrales eléctricas, lo cual se podría solucionar con un grupo de emergencia, especialmente para mantener el horno caliente. Los sistemas de combustible petro químicos, tienen el riesgo de producir incendio motivo por el cual, son siempre instalados; los tanques de suministro alejados, de las instalaciones de la planta. El carbón aunque menos riesgoso que los combustibles petro químicos no dejan alternativa de que pueden producir incendios.

##### Inversión inicial

El costo de un horno eléctrico se hace grande por la instalación de sistema eléctrico de protección, controles eléctricos, instalación de porta electrodos y transformadores. Los hornos de carbón también tienen un costo inicial elevado, debido a la instalación de sistemas de cokificación, molienda, pulverización y eyectores especiales y gasificadores. Mientras que los hornos con productos petroquí

nios sólo necesitan la instalación de un quemador soplador.

#### Disponibilidad Inmediata

En la localidad de Huancayo, si bien es cierto que en la actualidad hay suficiente energía eléctrica, como se muestra en la figura (2.15), el crecimiento proyectivo de energía, no va de acuerdo al consumo de energía urbana e Industrial; lo cual es causa para no hacerlo disponible, en cierta medida para este proyecto. El uso de carbón de lugares aledaños a Huancayo, también implicaría un nuevo proyecto de inversión, tanto para su extracción como para su tratamiento; mientras que si se usará de otro lugar, la TM de carbón sería más costosa que la TM de carbón de la Localidad.

#### Costo de Energía

Es cierto, que el costo de la energía eléctrica es bastante barata en la localidad de Huancayo, lo cual la hace ganadora en este factor. Siguiendo la del petróleo; lo que parece un poco extraño aparentemente, es que el costo de la energía producida por el carbón es considerada de costo más elevado; es debido a la no existencia de carbón tratado en esta zona.

#### Contaminación

Los hornos de energía eléctrica son los que menos contaminan el medio ambiente, pero los electrodos muchas veces resultan ser contaminantes de los vidrios ya que están hechos de óxido de molibdeno, carbón y grafito, estos son reductores del Zn, Pb,  $As_2O_3$  siendo estos últimos afinantes del vidrio. El petróleo tiene un mayor poder contaminante del ambiente; pero un poco menos que el carbón, esto último debido a las cenizas, que produce dicho combustible.

#### Costo de Mantenimiento

Los hornos eléctricos hay que proveerlos continuamente de elec

trodos, lo cual implica paradas intermitentes de lapsos relativamente cortos, cambios medianamente de cables eléctricos, cambio y/o reparación de fusibles y cajas de control. Los quemadores de carbón pulverizado continuamente hay que desatorarlos, hay que hacer reparaciones periódicas de los pulverizadores u otros, como en el caso de emplearse gasificadores, tendrían que hacerse mantenimiento de estos que relativamente resultan ser largos. Los quemadores de petróleo son menos críticos en su mantenimiento, ya que tienen una mayor facilidad para hacer trabajos de reparación. En lo que respecta a la duración de paredes y techos de los hornos eléctricos, son de mayor duración, que los hornos de petróleo como los de carbón.

Lo anteriormente señalado va a limitar que la energía a usar; para el funcionamiento de la planta de vidrio ha ser instalada en la localidad de Huancayo; implica el uso de energía de productos petroquímicos para los hornos de fundición, y la energía eléctrica para las instalaciones restantes de la planta; tales como alumbrado, sistemas de control eléctrico, accionamiento de ventiladores, bombas, compresoras de aire, y otros.

## 2.5 Disposición de Planta

Antes de realizar alguna alternativa de disposición de planta va ser conveniente determinar los tipos y cantidad de vidrio a producir; para ello se realizó encuestamientos de muestra a persona, empresas, e instituciones que hacen uso de insumos de vidrio. Los cuales serán mostrados en cuadros y gráficos; además de estos resultados se efectuará cálculos de proyección estadística para año venideros. Esto nos permitirá tener una idea del dimensionamiento de la planta.

Para poder diseñar la disposición de la planta es indispensable valernos de la secuencia de fabricación, y así mismo de la organización administrativa y de producción de la planta. Para tener una visión más objetiva de esto último, se describirá un diagrama de flujo. Pero previamente se realizará una descripción de los métodos para fabricar los utensilios seleccionados.

La disposición de la planta será expresada a través de un plano esquemático, haciendo uso de las i formaciones que proporcionan los párrafos que se elaborarán previamente a este. Para visualizar lo descrito, ver plano N° 1; el cual mostrará las dimensiones de la planta, con la única finalidad de vislumbrar mejor el área que se emplearía si se realizará este proyecto. Es importante recordar, que nuestra meta es solo el cálculo del horno, para una producción basada en la necesidad del mercado.

#### 2.5.1.1 Determinación de tipos y Cantidad de Vidrios a Producirse Para Utensilios

Para la evaluación de vidrios utilizados como servicio de mesa se hizo un muestreo de cinco casas comerciales que se dedican a la venta de estos productos, obteniéndose la información que aparece en la tabla (2.16).

De acuerdo a la información proporcionada por esta tabla, se procede a graficar la curva que muestra la tendencia que puede seguir su proyección. La cual nos permite crear una ecuación de proyección más ajustables a estos datos, para años futuros. Ver Fig.(2.17)

Según esta gráfica podemos observar que la curva sigue una tendencia parabólica, por lo que la ecuación para esta curva es la siguiente:



$$x_p = x_{84} + n^2 f \pm \sigma$$

$$f = \frac{36(x_{85} - x_{84}) + 9(x_{86} - x_{84}) + 4(x_{87} - x_{84})}{3 \times 36}$$

Donde:

$x_p$  = Consumo proyectado al año/semana

$x_{84}$  = Consumo del año 1984/semana

$n$  = Número de años en curso desde el 1984

$f$  = Factor de crecimiento

Cálculo de f

$$f = \frac{36(878 - 766) + 9(1102 - 766) + 4(1430 - 766)}{3 \times 36}$$

$$f = 90$$

TABLA 2.16

Comercial/año	(Venta de Unidades/semana)			Promedio
	1984	1985	1986	1987
Central	180	224	309	390
Palomino	80	104	144	189
Padilla	125	138	176	264
Policard	221	240	262	282
Mayta	760	172	211	305
$\Sigma$ Prodc.	766	878	1102	1430

Cálculo de Producción al Año Proyectado  $X_p$  al 88

$$X_{88} = 766 + 4^2 \times 90$$

$$X_{88} = 2.206 \text{ Product/semana}$$

Cálculo de la desviación

$$\sigma = \frac{(X'_{84} - X_{84})^2 + (X'_{85} - X_{85})^2 + (X'_{86} - X_{86})^2 + (X'_{87} - X_{87})^2}{n}$$

$$\sigma = \frac{(766 - 766)^2 + (856 - 878)^2 + (1126 - 1102)^2 + (1576 - 1430)^2}{n^2}$$

$$\sigma = \frac{0 + (22)^2 + (24)^2 + (146)^2}{4}$$

$$\sigma = \pm 38$$

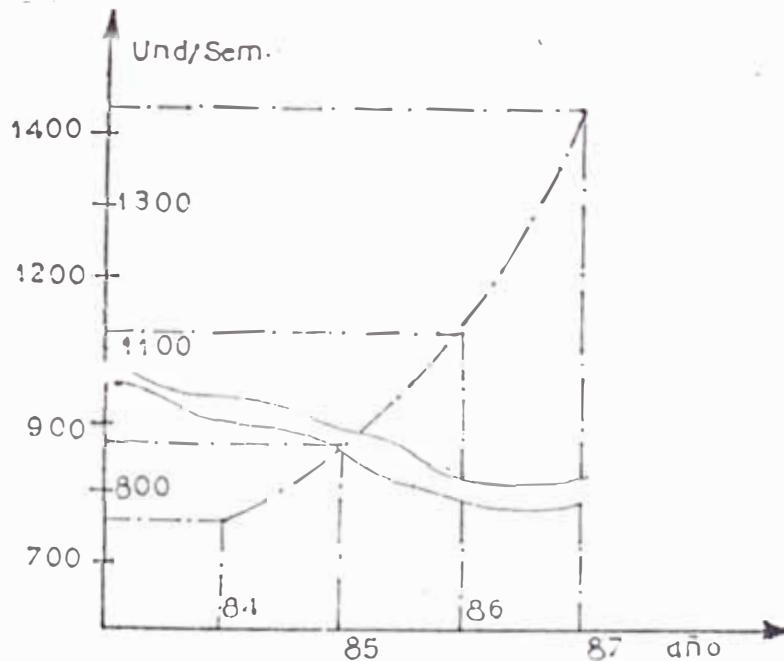


Fig. 2.17 Curva para proyección de utensilios para servicios

Debido a que el muestreo es de unos cuantos comerciantes a esta proyección ( $X_{88}$ ) se le afectará por el 3,000% lo cual nos conduce lo siguiente:

$$W = \frac{(X_{88}) \times 30 \times w}{7}$$

Donde:

W = peso por día

X<sub>88</sub> = proyección al 88

w = peso por producto = 0.300 kg/ prod.

$$W = \frac{2206 \times 30 \times 0.300}{7}$$

$$W = 2835 \text{ kg/día}$$

### 2.5.1.2 Botellas Y Envases

En este párrafo también se hace un cuadro estadístico que, fueron proporcionados por algunos industriales que hacen uso de botella para gaseosas, botellas para licor, industriales de algunos productos alimenticios, tales como harinas preparadas de quinua, kiwicha, arbejas, etc. Ver Tabla (2.17).

TABLA 2.17

	Consumo (Ea/día)			
	A	Ñ	O	
Fabricantes	84	85	86	87
Venus	45	72	84	96
Calixto	55	67	74	84
Gonzales	200	211	224	331
Casas	240	300	350	400
	540	650	732	911

Estos datos se ajustan a una proyección lineal. Para visualizar mejor se trazara la gráfica siguiente; (Fig. 2.18)

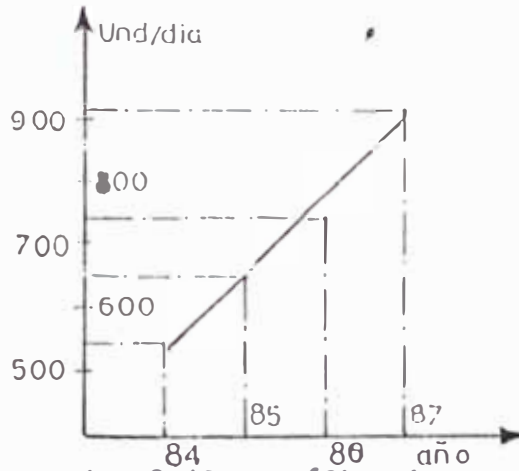


Fig. 2.18. Gráfica de proyección del uso de curvas.

$$X_p = X_A(84) + nf \pm \sigma \qquad X_p = X_a + nf$$

Donde:

$$f = \frac{911 - 540}{3} = \text{factor de pendiente}$$

$n$  = número de años posteriores al 84

$X_A$  = producción del año

$X_p$  = producción al año proyectado

$$= \frac{(X_{84} - X_{p1}) + (X_{85} - X_{p2}) + (X_{86} - X_{p3}) + (X_{87} - X_{p4})}{n}$$

TABLA 2.18

AÑO	$X_A$	$X_p$	$X_A - X_p$
84	540	540	0
85	650	663	13
86	732	787	55
87	911	911	0

De la tabla 2.18 se obtiene, la desviación (  $\sigma$  )

$$\sigma = 17$$

La producción proyectada al 88 es

$$X_{p(88)} = 540 + \frac{911 - 540}{3} \times 4 \pm 17$$

$$X_{p(88)} = 1034 \pm 17$$

Pero como el muestreo es sobre un aproximado del 1/6 de empresas dedicadas a esta industria afectaremos por un factor = 6

$$X'p = 6 \times 1034$$

$$X'p_{(88)} = 6,204 \text{ EA/día}$$

Cada botella ó ambase se considera que pesa 0.5 kg por tanto en este rubro habra que producirse en peso la siguiente cantidad:

$$W_T = 6,204 \times 0.5 \text{ kg}$$

$$W_T = 3.102 \text{ kg/día}$$

### 2.5.1.3 Vidrios Planos

Para obtener los datos estadísticos del uso de este vidrio se recurrió a los 3 concejos distritales más importantes de Huancayo, los que proporcionaron los siguientes datos; los cuales aparecen en la tabla (2.19).

TABLA 2. 19

Concejo \ Año	Area Construida / mes			
	84	85	86	87
Huancayo	4,000	4,580	5,120	5,500
Tambo	8,000	8,900	9,100	10,200
Chilca	2,500	3,050	4,600	5,100
Areas Const.	14,500	16,530	18,820	20,800

Para poder determinar si la proyección es lineal o parabólica elaboraremos el gráfico siguiente . Fig.(2.19)

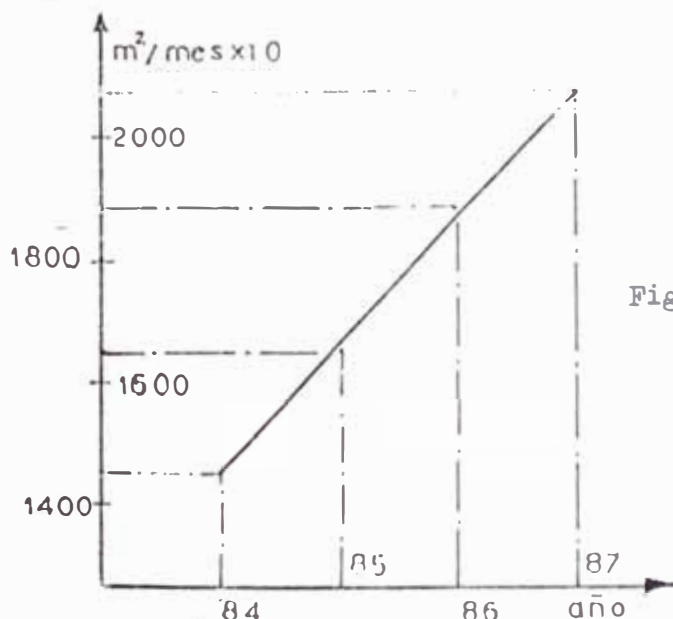


Fig.2.19 Curva de proyección de área construida

De acuerdo a como se muestra la curva de proyección elegiremos una proyección lineal. Por lo tanto expresaremos nuestras ecuaciones de acuerdo a lo siguiente:

$$X_p = X_{84} + nf \pm \sigma$$

Donde:

$$f = \frac{6(X_{85} - X_{84}) + 3(X_{86} - X_{84}) + 2(X_{87} - X_{84})}{3}$$

de crecimiento

$n$  = Número de años en curso con respecto al 84

$X_{84}$  = Area const/mes en el año 84

$X_p$  = Area construida/mes al año proyectado

$$\sigma = (X_{p85} - X_{85}) + (X_{p86} - X_{86}) + (X_{p87} - X_{86})$$

Cálculo de f

$$f = \frac{6(16,530 - 14,500) + 3(18,820 - 14,500) + 2(20,800 - 14,500)}{3 \times 6}$$

$$f = 2,096$$

Cálculo de  $X_{88}$

$$X_{88} = 14,500 + 4 \times 2,096$$

$$X_{88} = 22,884 \text{ m}^2 / \text{mes}$$

Cálculo de la Desviación

$$\sigma = \frac{(16,596-16,530)+(18,692-18,820)+(20,788-20,800)}{3}$$

$$\sigma = \pm 21$$

Este valor indica que nuestro modelo de proyección lineal es lo correcto.

Cálculo de peso de Vidrio Plano (kg / Día)

$$W = \frac{X_{88} \times n \times w}{dm} \times z$$

Donde:

$X_{88}$  Area construida/mes proyectado al año 88

$n$  % de área iluminada = (0.18)

$w$  Peso/m<sup>2</sup> de vidrio plano = 3.5 kg/m<sup>2</sup>

$dm$  Días laborables en el mes = 24

$z$  Factor de producción = 3

$$W = \frac{22,884 \times 0.18 \times 3.5 \times 3}{24} = 2,319$$

2.5.1.4 Determinación del Flujo de Vidrio a Fundir por hora

Asi como se determinó el peso de cada tipo de vidrio, que sea factible fundir, proyectada al año 88. Determinaremos el flujo total a fundir por hora durante ese año, lo cuál nos conlleva a la siguiente relación.

En el plano N<sup>o</sup>.2 se hace un diagrama de un sistema neumático para poder automatizar fácilmente el proceso.

#### Descripción Analógica para Sistema neumático del Feeder

a.- El aire de alimentación ingresa por la válvula de 4 vías V4v-1, la cuál es controlada por pilotos de aires que provienen; en un caso desde el conjunto de máquina embotelladora o estampadora. Y en otro caso desde el sistema de accionamiento del Ratch de pistón de la torna mesa.

b.- La línea 1, alimenta de aire a las válvulas de control VC-1, y VC-2; quienes esperan señales de aire para dar pase de aire a las líneas principales. Siendo el caso que la válvula VC-1; alimentará de aire al sistema de máquinas para producir botellas o utensilios; mientras que la válvula VC-2 dará pase de aire al sistema de alimentación Feeder; casi directamente.

c.- La válvula restrictora VR-1 y el acumulador AC-1 temporiza a la válvula VC-1, con la finalidad, de que primero actúe el sistema neumático de alimentación, y después de cumplir esta función actúe el sistema de máquinas embotelladora ó de utilería.

d.- La válvula de control VC-3, es pilotada por aire que proviene de la válvula de control VC-4, en un caso; y en otro por aire que proviene del sistema de giro de la tornamesa. En el primer caso el aire de la línea principal hará actuar el pistón PI-1, empujando una porción de vidrio fundido hacia la boca del feeder; una cantidad del flujo de aire de la línea ingresa al acumulador AC-2, a través de la válvula restrictora VR-2 este último paso actuó como temporizador del paso de aire principal en la válvula de control VC-5.

e.- La válvula de control VC-5, deja pasar el aire principal a los pistones PI-2, para hacer actuar a las cizallas quienes corta--



con el fin de asegurar una buena formación de la boca y primer paso de formación de botella .

d.- El pistó PJ-4 hace girar la tornamesa, pero para realizar esto, el mecanismo de giro de botella sostiene a los mismos por medio del mecanismo accionado por el pistón PI-7, el cuál actúa por el aire que pasa por la válvula de 4 vías V4V-2, una vez sostenida la botella el aire pasa al pistó PI-4 a través de la válvula de control VC-3.

e.- Una vez que el pistó PI-4, llega al tope, se genera una sobre presión, haciendo actuar a la válvula de control VC-5, quien cambia la posición del carrete de la válvula de 4 vías V4V-2, para introducir aire al pistón PI-7, quien con este proceso suelta la botella.

f.- El pistón PI-5 termina de formar la botella, y es para la inversión de flujo de aire en este pistón para colocar la tornamesa en otra posición.

g.- El pistón PI-6, se extiende con la finalidad de coger la botella por medio del mecanismo, que actúa por medio del pistón PI-6 llega al tope, se genera una sobre presión que hace actuar la válvula de control VC-8; lo cuál permite el paso de aire hacia el pistón Pi-8.

h.- Regresando al paso; al generarse la sobrepresión que hace actuar a la válvula de 4 vías V4V-2, en posición inversa a lo original. Actuando de esta manera, todo el proceso inverso a lo descrito, hasta el momento.

i.- El proceso de inversión del sistema también viene acompañado de enviar aire a la válvula de 4 vías, V4V-1 del sistema de alimentación feeder; con el fin de hacer retroceder el pistón del rat-

### 2.5.3.3 Elección de Disposición de Planta

Para efectuar la elección de la alternativa ganadora se va a hacer a través de un criterio de puntaje. Para ello se planteará algunas características comunes de cada tipo de planta.

a) Espacio

Una planta en serie ocupa menor espacio, que una en producción en paralelo.

b) Capacidad

La planta en paralelo es para una producción mayor, la de serie menor. Debido a que la fábrica va a tener poca producción es conveniente una en serie.

c) Equipo (Cant)

La planta de producción en paralelo hace más uso de equipo que la de serie.

d) Personal

Obviamente a mayor tamaño de planta se hará mayor uso de mano de obra.

De acuerdo a estas características se hará la selección, tal como se muestra en la tabla (2.20)

TABLA 2.20  
Puntaje para Elección del Tipo de Planta

Características	Puntaje	
	Paralelo	Serie
Espacio	40	60
Capacidad	50	50
Equipo (Cant)	30	70
Mano de Obra	40	60
Total	160	240

De acuerdo a esta tabla, consideramos que la planta de producción es serie, es la más adecuada para la cantidad de vidrio a fundir.

### 2.6 Mano de Obra

Para poder evaluar el costo de funcionamiento en mano de obra para la evaluación económica de la planta, primero se hará un organigrama de acuerdo a las necesidades que obedece, la disposición de la planta. Y a un anual de funciones del personal, que será descrito después de hacer el organigrama.

A continuación de esto se procederá hacer una planilla mensual tomando en consideración jornales de acuerdo a ley, categorías y otros como porcentaje de su ausentismo (por vacaciones, enfermedad y accidente).

#### 2.6.1 Organigrama

Para elaborar este organigrama se ha considerado, que todo el mando, como la acción es vertical, involucrar la autoridad de un nivel a otro. Para esto ver la Fig. (2.26)

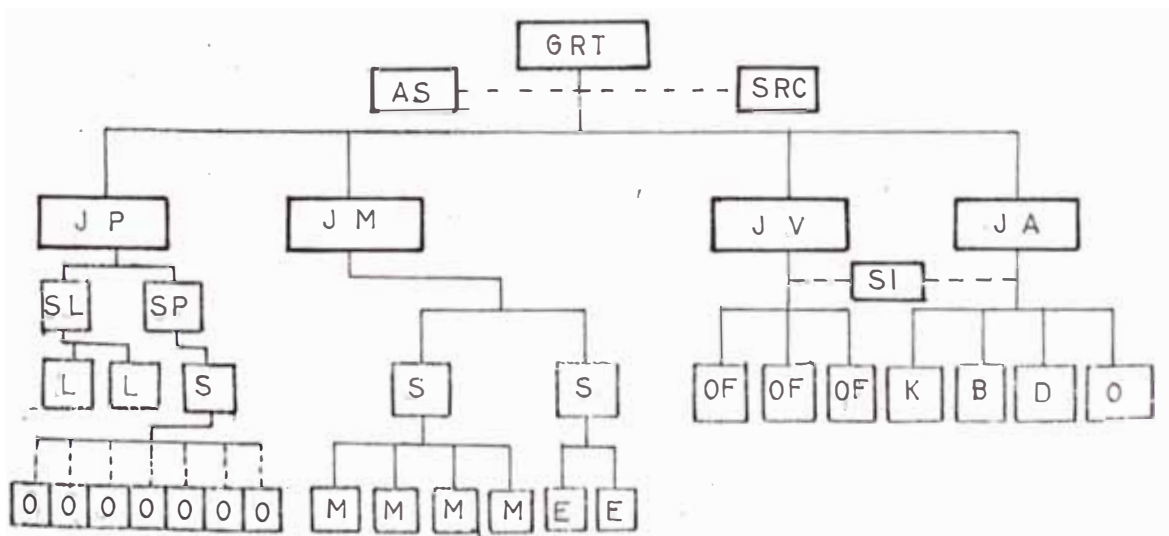


Fig. 2.26

## 2.6.2. Funciones

### 2.6.2.1. Gerente (GRT)

Tiene como función, hacer cumplir la política de inversión general, coordinar con el Jefe de Planta, Jefe de Mantenimiento, Jefe de Ventas, Jefe de Almacenes. Ejecutar cambios o mejoras en la política de inversión, implementar proyectos y realizar reinversiones.

### 2.6.2.2. Jefe de Producción (J.P)

Organizar personalmente, modificar y establecer las normas de operación, hacer o modificar diseños de operación en la planta, controlar la producción y coordinar con el Gerente y con los supervisores de planta y laboratorio. El Jefe de Planta, también debe controlar los costos de producción.

### 2.6.2.3. Jefe de Mantenimiento (J.M)

Programar reparaciones, efectuar modificaciones de planta, hacer diseños de máquinas o elementos de máquinas; organizar al personal, controlar costos de inversión en mantenimiento y coordinar con el Gerente y sus sobrestantes.

### 2.6.2.4. Jefe de Ventas (J.V)

Tiene como función promover los productos, controlar los niveles de venta a través de la demanda y oferta, evaluar el crecimiento de demanda del mercado y asimismo, organizar su personal de venta y distribución. Y por último coordina con Gerencia sobre las ventas proyectadas según política de inversión.

2.6.2.5. Jefe de Almacén (J.A)

Tiene la función de coordinar con producción proveyéndole de materia prima; con mantenimiento, proveyéndolo de repuestos; con venta de productos terminados. También tiene como función organizar los almacenes, bodega y codificar tanto los repuestos como los productos.

Asimismo, debe proporcionar información a la supervisión de informática. Y, finalmente coordinar con Gerencia con respecto a inversiones realizadas por compras.

2.6.2.6. Supervisor Laboratorio (S.L)

Tiene como función el análisis de las materias primas, hacer nuevos diseños metalúrgicos e investigación sobre los vidrios. Debe coordinar sus actividades con el Jefe de Producción.

2.6.2.7. Supervisor de Planta (S.P)

Debe velar por mantener una buena calidad de vidrio; organizar su personal, modificar o diseñar los procesos de fabricación del vidrio y coordinar con el Jefe de Producción y los sobrestantes. Asimismo éste supervisor debe mantener el nivel de Producción.

2.6.2.8. Supervisor de Informática (S.I)

El supervisor de informática, tiene la función de procesar los datos proporcionados por ventas, almacén y los datos proporcionados por los Jefes de mantenimiento y producción, con el fin de optimizar las paradas que podrían ocurrir en la planta. Debido a un mal funcionamiento de sus máquinas.

2.6.2.9. Sobrestantes (L/S)

Es el personal que hace ejecución de los trabajos, que tienen que ver prácticamente con la producción, estas personas tienen que manipular personal, tienen que conocer el campo técnico de su labor y asimismo deben coordinar con su supervisor o jefe.

2.6.2.10. Oficinistas (OF/K/B/D/ )

Personal que se dedica a la función administrativa de algunas secciones, que en nuestro caso son la de ventas y la de almacén.

2.6.2.11. Asesores ( S/SR)

Son personas de apoyo a Gerencia, en el aspecto Legal y archivos de la empresa.

2.6.2.12. Obreros (O/M/E)

Ejecutan labores netamente de producción o mantenimiento, bajo ordenes del sobrestante o supervisor.

## CALCULO Y DIMENSIONAMIENTO

### TERMICO DEL HORNO

En este capítulo procederemos primeramente hacer la descripción del tipo de hornos de fusión, que funcionan a petróleo, ya que estos han sido seleccionados en el capítulo 2 de acuerdo a un estudio de factibilidad.

De acuerdo a esto se procederá a plantear las características de los tipos de vidrios a fundir y del cálculo del calor latente de fusión. Para esto se hará uso del lenguaje BASIC en la computadora Commodore 64k.

A continuación se procederá a calcular el calor necesario también haciendo uso del micro computador. Y de acuerdo a esto se seleccionará el tipo de quemador para el horno seleccionado.

Finalmente dimensionaremos térmicamente al horno, y así mismo se verificará estas dimensiones, para lo cual también emplearemos la computadora.

#### 3.1 Horno de Fusión

Los hornos para fundir vidrios son fundamentalmente de dos tipos discontinuos u hornos de crisoles, y continuos, u hornos de cuba. Los hornos de crisoles fueron usados, como vimos en el capítulo 2, durante milenios, y actualmente se sigue utilizando para fundir vi

ál permitía un mejor tiraje; además se proveía de un número mayor de conductos de la cámara de combustión a la cámara de los crisoles, de modo que cada crisol fuese envuelto por las llamas. (Fig.3.1)

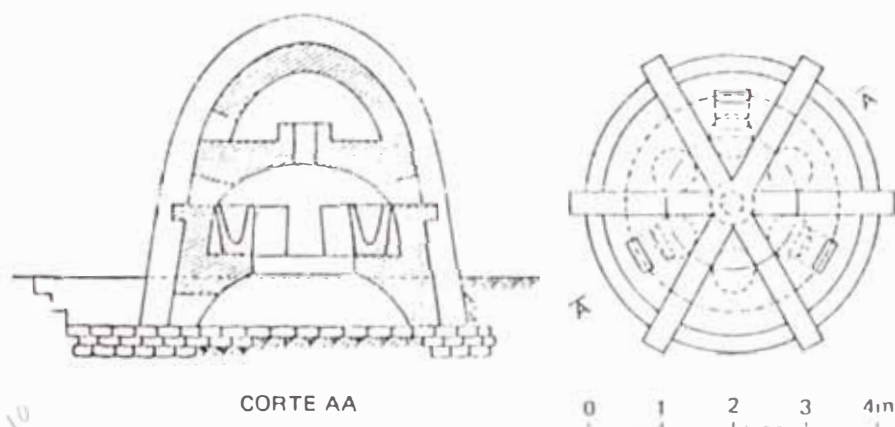


Fig.3.1 Horno de crisoles del Siglo XVI

Hacia mediados del siglo pasado, los estudios teóricos sobre el calor, y la experiencia práctica acumulada, sugerían que podía mejorarse el rendimiento térmico de los hornos aprovechando de alguna manera el calor de los gases de la combustión, que se perdía completamente. Los primeros intentos en ese sentido fueron hechos por BOETTUS, y sus hornos tuvieron bastante difusión hasta comienzos del presente siglo, pero las dos innovaciones tecnológicas fundamentales se debieron a los estudios teórico - prácticos de los hermanos SIEMENS: los gasógenos, por una parte, y los recuperadores de calor, por la otra que hicieron cambiar radicalmente el diseño de los hornos y la concepción de su funcionamiento. En los gasógenos, el carbón se gasifica por combustión parcial, dando una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Este gas de gasógeno, y el aire necesario para quemarlo, se precalientan antes de entrar al horno, en un intercambiador de calor, aprovechando el calor de los gases de combustión a su salida del horno. Esto puede hacerse con dos siste-



mas: recuperativo (intercambio directo), o regenerativo (intercambio indirecto), que veremos con mayor detalle al tratar de los hornos continuos (V.3.1.2). Más tarde, el uso de otros combustibles, en lugar del carbón como el fuel-oil (fracción pesada del petróleo), o el gas natural, hizo necesarias otras modificaciones, si bien ya de menor importancia; la diferencia más notoria es que a los combustibles modernos no les hace falta precalentar los, basta con precalentar el aire.

En la actualidad, e independientemente del tipo de combustible, se usan dos clases de hornos de crisoles. Para la fabricación de vidrios artísticos por soplado manual, se usan hornos de planta circular o elíptica, con llama vertical (o varias bocas de llama simétricas), por lo general sin recuperación. Los crisoles, en número variable (hasta 20), de aproximadamente 250 litros de capacidad, se hallan dispuestos cerca de las bocas de toma, de manera tal que los sopladores puedan tomar desde afuera la cantidad necesaria de vidrio con sus cañas. El tiempo reservado al trabajo manual es, por lo general de 8 horas, por la mañana; luego (siempre queda algo de vidrio dentro del crisol), que ayuda a la fusión subsiguiente), se cargan con la mezcla de materias primas y se eleva la temperatura hasta la fusión completa, produciéndose el afinado durante la noche. A la mañana siguiente, se baja la temperatura del horno para que el vidrio tenga la viscosidad adecuada para su conformado por soplado, y los artesanos recomienzan su labor repitiéndose el ciclo.

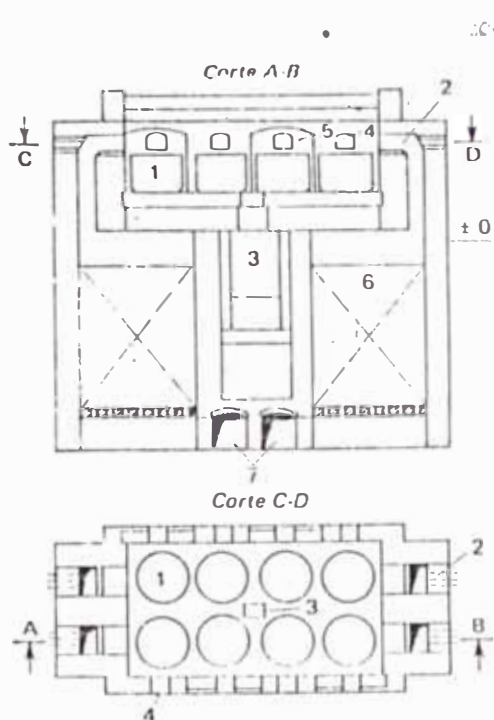
La segunda clase de hornos de crisol que se continúa usando tiene planta rectangular, son de mayor tamaño (pueden contener hasta 16 crisoles de 1,000 litros de capacidad), y se utilizan para

la fabricación de vidrios planos de gran espesor o planchas de vidrios oftálmicos, o especiales por el procedimiento de colado (Fig.3.2) la llama es horizontal, circulando por sobre los crisoles, y su sentido se invierte a intervalos regulares (generalmente cada 20 ó 30 minutos), dado que utilizan cámaras regenerativas. En estos hornos, los crisoles se colocan y retiran del horno con la ayuda de dispositivos mecánicos (pinzas de gran tamaño y aparejos), volcándose sobre la mesa de colado.

Existen también, hornos especiales, como los utilizados para fundir vidrios ópticos, en los cuales la masa fundida se agita continuamente; en estos casos el vidrio no se cuele, sino que se recuece en el mismo crisol y este, una vez frío, se rompe para extraer y seleccionar los mejores trozos. Hay también hornos para fundir vidrio de distinto tipo y color, que están interiormente divididos en compartimientos, con regulación individual de la temperatura. La fusión en crisoles en hornos eléctricos está limitada a pequeñas cantidades de vidrio (escala de laboratorio o planta piloto), o a vidrios muy especiales y de tipo especiales de alto precio, o cuando es necesario un control muy riguroso de la temperatura.

Para combustión líquidos o gaseosos existe una gran variedad de sistemas de quemadores, que permitan una mezcla regulada del aire y el combustible, y una llama de forma y longitud adecuada. Para el caso de rotura de algún crisol, en todos estos tipos de hornos de crisoles, el piso de la cámara respectiva está provisto de orificios de descarga del vidrio fundido.

Uno de los problemas más importantes de un horno a crisol es lograr la mejor uniformidad de temperatura, tanto entre un crisol y otro como dentro de cada crisol.



1. Crisoles
2. Quemadores
3. Evacuación de vidrio fundido en caso de rotura de un crisol.
4. Boca de toma
5. Crisol compartimentado
6. Regeneradores
7. Conductos de salida de los gases a la chimenea.

Fig.3.2 Esquema de un horno regenerativo.

En este sentido, en los hornos con llama horizontal se producen importantes gradientes de temperatura, tanto entre los crisoles que están en los extremos del horno y los que están en la parte central, como también porque la llama circula sobre los crisoles y, por lo tanto, el calentamiento tiene lugar preponderantemente por radiación por lo que el fondo de los crisoles queda a menor temperatura que su superficie. Con todo, sin embargo, en este tipo de hornos, los crisoles sufren menos choque térmicos que en los hornos con llama vertical. Naturalmente, este problema se agrava al aumentar las dimensiones del horno; de aquí que se haya propuesto gran número de soluciones para este problema, ya que, desde el punto de vista económico, un horno es tanto más conveniente cuantos más crisoles puedan calentarse a la vez. Cuando se trata de hornos de llama horizontal más pequeños, (2 a 4 crisoles), es más económico usar recuperadores, siendo habituales los intercambiadores de acero inoxidable, y el régi-

men térmico puede controlarse con mayor facilidad.

Existen una gran variedad de diseños de hornos de crisoles, de los cuales el lector podrá encontrar mayores detalles en la referencia (R-2).

### 3.1.2. Hornos de Cuba

A diferencia de los hornos continuos utilizados en la industria metalúrgica desde mediados del siglo anterior, los hornos de cuba, para proceso continuo son de empleo reciente en la industria vidriera; creados hacia fines del siglo pasado, sólo a partir de la época de la Primera Guerra Mundial comenzaron a tener amplia difusión, gracias, en primer lugar, al perfeccionamiento de los materiales refractarios, pero fundamentalmente debido al estímulo dado por el desarrollo de las máquinas formadoras automáticas y los sistemas de alimentación de las mismas. En efecto, las máquinas automáticas, cada vez más veloces, requieren una constancia casi perfecta en la composición y propiedades del vidrio fundido, que sólo un horno de cuba continuo puede asegurar, así como una alimentación constante durante las 24 horas del día.

Durante las décadas del 20 y del 30 se llevaron a cabo, especialmente en Alemania, muchos estudios para incrementar el rendimiento y mejorar la eficiencia de los hornos de cuba, y esos perfeccionamientos que llevarón a este tipo de horno a las formas y características con que los conocemos hoy en día, fueron sólo posible, como dice GUNTHER, "como resultado de la aplicación sistemática de la ciencia a todos los problemas complicados que surgen en la operación de los hornos para fundir vidrio". En los últimos años, el desarrollo de modelos matemáticos y físicos como base del diseño y del cálculo

desconocidos en aquella época—han llevado a los hornos de cuba a un grado notable de perfección.

En la actualidad, la gran industria vidriera (vidrios huecos, vidrios planos, etc.), utiliza, sin excepción, hornos de cuba de distintos tipos, cuyas dimensiones tiende a ser cada vez mayores y su funcionamiento cada vez más automatizado. Todos los hornos de este tipo, (llamados a veces también "hornos de balsa"), consisten fundamentalmente en una cuba o recipientes de forma aproximadamente rectangular, construida con materiales refractarios resistentes a la acción corrosiva del vidrio líquido. Por uno de los extremos de la cuba la mezcla vitrificante, en tanto que por el otro se extrae el vidrio fundido, manteniéndose constante el nivel dentro de la cuba. Esto implica una circulación continua del material fluido que va experimentando, sucesivamente en zonas de diferentes temperatura los procesos de reacciones químicas, fusión, afinado, homogeneización y acondicionamiento. En otras palabras, mientras en los hornos de crisoles estas operaciones tienen lugar en ciclos de tiempo en los hornos de cuba se desarrollan en el espacio, a lo largo del eje del horno, resultando en un diagrama de flujo lineal y continua

El calentamiento de los hornos de cuba se puede llevar a cabo mediante combustibles líquidos o gaseosos, o bien eléctricamente. En el caso de uso de combustibles (el más común), los hornos son, por lo general, de tipo regenerativo, con cámaras para precalentar el aire aprovechando el calor de los gases de combustión que salen, del horno y que funcionan en forma alternada. Hay hornos de cuba pequeños que como se describió para los hornos de crisoles, usan recuperadores para aumentar la eficiencia térmica, o bien son de fuego directo (sin recuperación de calor). Los recuperadores son sim

ples intercambiadores de calor, en los cuales los gases de la combustión circulan en sentido contrario al aire que entra; el sistema es continuo (sin inversión de flujo). Sin embargo, cuando los hornos sobrepasan una cierta dimensión se prefieren los regeneradores a cámaras porque, si bien su instalación y mantenimiento son más costosos resultan más eficientes en el aprovechamiento del máximo posible del calor de los gases de combustión para precalentar el aire que entra. También se han desarrollado sistemas de calentamiento mixto, es decir, a combustibles y eléctrico (boosting).

Aparte de las ventajas obvias del proceso continuo los hornos de cuba poseen otras ventajas no menos importantes con respecto a los hornos de crisoles: mejor aprovechamiento del combustible, mayor seguridad al eliminarse el peligro de rotura de los crisoles, mayor constancia en las características y calidad del vidrio producido, y temperaturas constantes en cada zona que hace que los refractarios no sufran bruscos choques térmicos que disminuyen su duración. La campaña o vida útil de una cuba oscila hoy en día entre tres y cinco años, según el tipo de refractario utilizado en su construcción y el tipo de vidrio que se funde. Como desventaja de los hornos de cuba podemos mencionar el hecho de que no resulta económica su instalación para pequeñas producciones, ni prácticos cuando se deben fundir alternativamente vidrios de distinta composición (p. ej., diferente color). Si bien se han propuesto soluciones a estos problemas como se ve más adelante, el hecho es que el rendimiento económico de un horno de cuba aumenta en relación entre el volumen de vidrio fundido. Se construyen hornos de vidrio de cuba de diferente tamaño, el que se mide por la extracción de vidrio: desde pocas toneladas hasta varios centenares de toneladas diarias.

### 3.1.3. Tipos de Hornos de Cuba

Existe una gran variedad de hornos de cuba según la disposición de los quemadores, la existencia o no de puente y garganta, el sistema de calentamiento y el sistema de recuperación del calor, además de otros parámetros menores, todo lo cual hace difícil su clasificación sistemática. En este párrafo nos referimos a los hornos de cuba clásicos que utilizan combustibles líquidos, o gaseosos; los sistemas de calentamiento eléctrico se verán. Cualquiera que sea su tipo, sin embargo, en todos los hornos de cuba el proceso se lleva a cabo en forma continua, de un extremo a otro del horno, atravesando el material tres zonas claramente diferenciadas: La de fusión, la de homogeneización y acondicionamiento. Las dos primeras nunca están separadas, y juntas constituyen la cámara de fusión. La tercera, o cámara de trabajado, puede estar separada de las dos primeras (osea, de la cámara de fusión), por un puente de material refractario, en cuya parte inferior hay una abertura o garganta, por la cual se ve forzado a pasar el vidrio fundido de una cámara a otra. La cámara de trabajado debe su nombre al hecho de que antiguamente, cuando todo el proceso era manual, los sopladores tomaban el vidrio con sus cañas en esta parte del horno. En realidad debería denominarse mejor "cámara de acondicionamiento", ya que cumple con la función de enfriar la masa fundida hasta la temperatura adecuada para su alimentación, por diversos sistemas, a las máquinas formadoras.

Según su forma geométrica y la disposición de los quemadores, podemos hablar de dos tipos básicos de horno de cuba: los hornos de llama transversal (o de "fuego cruzados"), y los hornos de llama en forma de herradura (o llama trasera).

### 3.1.3.1 Hornos de llama Transversal

En este tipo de horno los quemadores están dispuestos en forma lateral, siendo el sentido de las llamas perpendicular al de la circulación del vidrio. Generalmente los hornos de cuba más grandes, de gran producción (para vidrios planos o envases) son de este tipo (por gran producción se entienden comunmente extracciones mayores de 50 t/día). Una diferencia importante por tener en cuenta es que mientras que en los hornos de fabricación de vidrio plano estirado (procesos Fourcault y Pittsburgh), la cuba no está dividida por el puente, en los otros hornos (vidrioplano colado, envases, etc.), existen el puente y la garganta. Los quemadores, en número de cuatro a seis de cada lado, y regulables independientemente, están ubicados en los pórticos, que son las bocas o aberturas por donde entra el aire precalentado y se mezcla con el combustible formando la llama; los gases de la combustión (fundamentalmente anhídrido carbónico y vapor de agua), más nitrógeno, oxígeno no utilizado y vapores desprendidos durante las reacciones de fusión) salen por el pórtico opuesto, alternándose esta operación a intervalos regulares de tiempo (por lo general, la inversión se efectúa cada 20 ó 30 minutos). Los pórticos conducen, a través de los voladores, a las cámaras regenerativas.

Las cámaras regenerativas son dos grandes recintos prismáticos de sección rectangular o cuadrangular, dentro de los cuales se encuentran en empilaje de ladrillos refractarios especiales. La función de los empilajes (de los cuales se muestran distintas disposiciones en las figura (3.4) es tomar la mayor cantidad posible de calor de los gases de la combustión. Cuando se invierte el sentido de la llama (por medio de una válvula inversora situada en el empal



me de los conductos que llevan de ambas cámaras a la chimenea) entra aire frío a la cámara caliente y se calienta tomando calor de los ladrillos del empilaje. Al mismo tiempo, por la cámara opuesta, ya a baja temperatura, pasan los gases de la combustión volviendo a calentar los ladrillos. De esta manera, alternativamente se recupera una buena cantidad de calor (en los hornos de gran tamaño, el intercambio directo sería impracticable, por los grandes flujos de gases circulantes) pero, como es evidente, los ladrillos de los empilajes están sometidos a un continuo choque térmico que reduce su vida útil. En este tipo de hornos las cámaras regenerativas se encuentran a ambos lados y por debajo del nivel de la cuba. Como se comprende, la correcta regulación del ciclo térmico es fundamental para alcanzar la máxima eficiencia en el funcionamiento del horno.

En los hornos de llama transversal, la carga de las materias primas se efectúa por el extremo posterior de la cuba (boca de enformaje), mientras que el vidrio fundido sale por el extremo opuesto. Según el tamaño del horno y el tipo de cargador utilizado puede haber más de una boca de enformaje, y su forma y disposición puede ser bastante variable.

La cuba está cubierta en su totalidad por una bóveda única (independientemente de que la cuba pueda estar dividida en cámara de fusión y cámara de trabajado). La bóveda, construida con cuñas de material refractario de sílice, apoya sobre las paredes laterales de modo que el horno resulta un recinto completamente cerrado, con pequeñas aberturas para la observación o la introducción de instrumentos de medición o regulación. Las paredes del horno están enfriadas externamente por ventiladores de gran potencia y circulación de agua de modo de obtener la máxima aislación térmica.

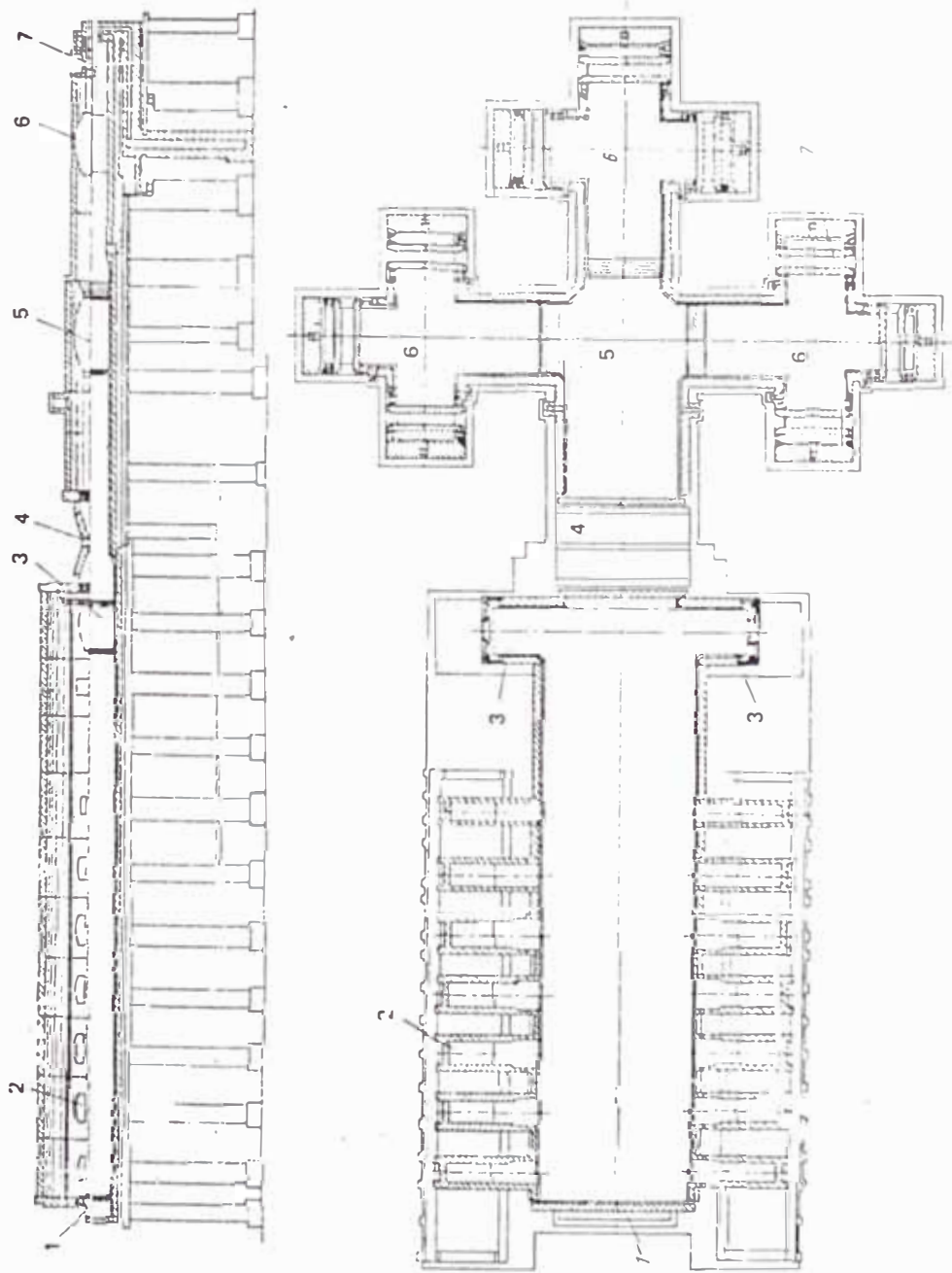


Fig. 3.3 Horno de llama transversal: 1 Boca de enforaje; 2: quemadores; 3: flotadores; 4: puente; 5; Cámara de distribución; 6: Cámara de acondicionamiento; 7: Cámara de estirado.

En las cubas que tienen separadas las cámaras de fusión y de trabajo, la división está constituida por un puente, que es una pre (imple o oble) de material refractario especial, que obliga al vidrio líquido a pasar por una garganta situada en una parte inferior. La función de este puente es múltiple. En primer lugar, fuerza al vidrio líquido a circular, produciendo corrientes de convección, ver fig. (3.6), que coadyuvan grandemente a la homogeneización térmica y química. En segundo lugar retiene las impurezas que pueden flotar en la superficie del líquido. Por último, cumple la importantísima función de crear una diferencia neta de temperatura (del orden de los a tres centenares de grados) a uno y otro lado, ya que el vidrio se enfría considerablemente al verse obligado a sumergirse en zona más profundas y pasar a través de la garganta. El puente tiene la misma altura que la cuba, y en ciertos casos puede continuarse hacia arriba, hasta la bóveda, con una pared con aberturas tipo pañal; llamada pared de sombra, que acentúa la diferencia de temperaturas entre ambas cámaras, al impedir que los gases calientes de la llama pasen a la zona de trabajo.

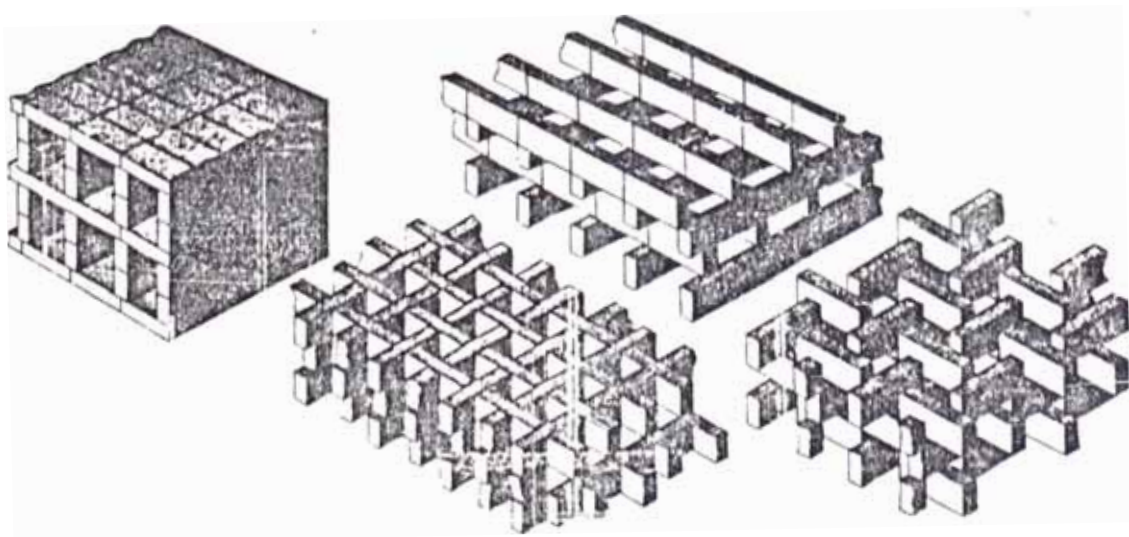


Fig. 3.4- Diferentes disposiciones de los ladrillos en los empilajes de las cámaras regenerativas.

La existencia o no de una pared de sombra depende el tipo de horno, de su régimen, del tipo de máquinas utilizada, y otros factores. El puente (y la eventual pared de sombra) dividen así a la cuba en dos partes o zonas bien diferenciadas, ya mencionadas anteriormente: la cámara de fusión y la cámara de trabajado, donde el vidrio fundido se encuentra ya calmado y a menor temperatura, acondicionado para su conformado. En los casos ya mencionados, en que no existe el puente, la cuba debe ser de mayor longitud, para poder conseguir el efecto de enfriamiento adecuado. Normalmente, el puente es una pared simple, pero en ciertos diseños es una pared doble, configurando así, prácticamente dos cubas; en este caso (poco frecuentemente dado el mayor costo de su construcción), la cámara de trabajado lleva quemadores adicionales para mantener el vidrio a la temperatura adecuada.

Cuando no existe el puente, se colocan, entre la zona de afinado y la de trabajado, piezas móviles de refractario, llamadas flotadores, que poseen formas variadas (barras rectas, semicirculares, o anillos) los flotadores se colocan por lo general, en un estrechamiento o constricción de la cuba, actuando como separación entre ambas cámaras; en realidad, los flotadores (usados también en los crisoles) son antecesores históricos del puente fijo. La gran variedad de diseños y sistemas existentes impide generalizar sobre estos puntos; por ejemplo, pueden colocarse flotadores aun cuando haya puente, para impedir al máximo el arrastre de impurezas infusibles. Cabe señalar a este respecto que toda pieza refractaria sumergida en el vidrio fundido (como el puente, los flotadores, etc), es en sí generadora de impurezas, ya que al ser atacada por el vidrio se va desintegrando y originando pequeñas inclusiones ("piedras") en el vidrio resul-

tante. La calidad del material refractario utilizado para la confección de estas piezas es, por lo tanto, de suma importancia.

El conjunto de los pilares (de cemento refractario) sobre los que apoya la cuba, las paredes laterales, la bóveda, las bridas y vigas de acero que soportan y anclan todo el conjunto, y las demás partes accesorias de la construcción se denomina la super estructura del horno. Finalmente, debajo de la solera o piso de la cuba, a la altura de la base de los pilares de sustentación de la misma, suele haber una pileta de agua, destinada a recoger el vidrio fundido cuando el horno se vacía, ya sea por necesidad de reparación o por una rotura accidental.

### 3.1.3.2 Hornos de Llama de Herradura

Estos hornos generalmente más pequeños que los de llama transversal, poseen solamente pórticos ubicados en la pared posterior encontrándose la boca de enforaje en posición lateral, ver fig. (3.5).

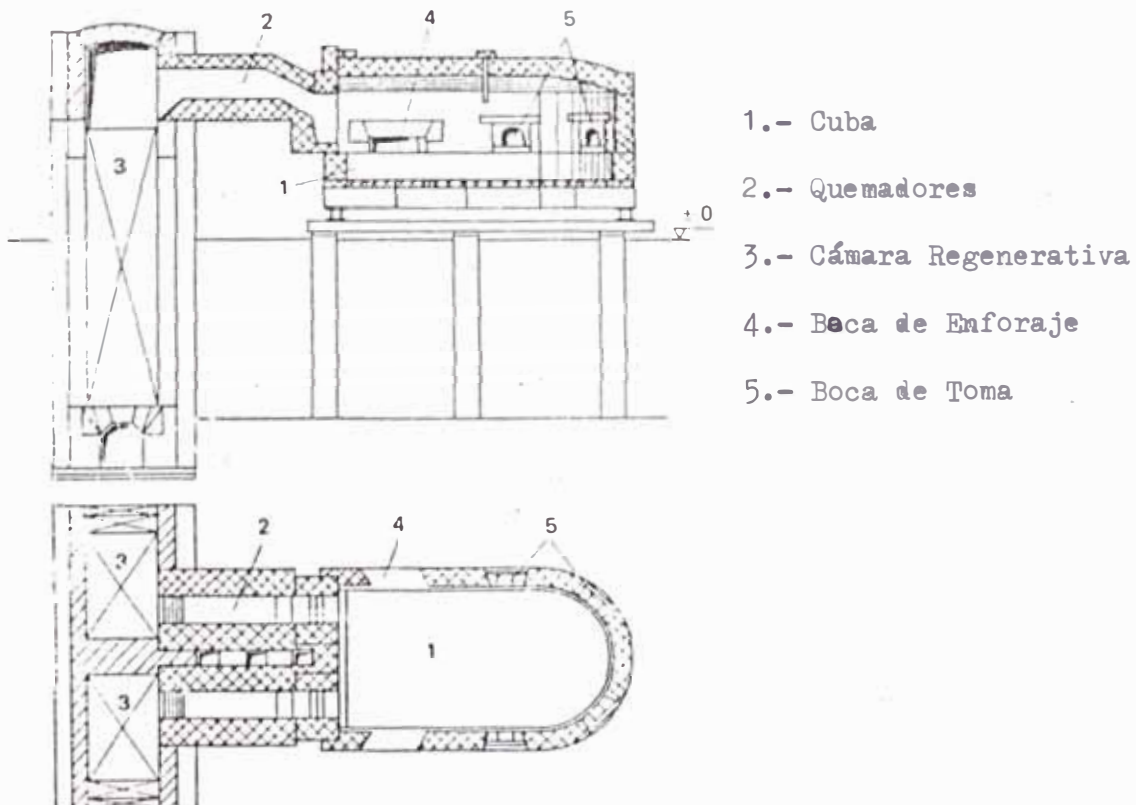


Fig. 3.5- Horno de llama en herradura.

En cada pórtico hay un quemador. La llama que se forma en un pórtico realiza un recorrido de ida y vuelta en forma de "U", saliendo por el otro pórtico hacia la cámara regenerativa respectiva, a través de la chimenea correspondiente. En este tipo de horno las cámaras regenerativas (similar a las descritas) se encuentran en la parte posterior. Al accionarse la válvula inversora, se invierte el recorrido de la llama y de los gases, el calentamiento es sumamente efectivo; dado el particular recorrido de estos. Los hornos de llama de herradura se utilizan comunemente para la fabricación de envases (botellas, frascos), vajillas y artículos de bazar.

Además de los dos tipos básicos mencionados, ambos con cámaras regenerativas, existen otros tipos de hornos de cuba continuos con otro sistema de recuperación de calor o aun sin ellos, como el caso del horno de llama directa. Hay hornos con recuperadores (intercambiadores de calor de material refractario o de acero inoxidable), en los cuales las chimeneas estan colocadas, estas, directamente sobre la boca de enforaje, de manera de generar una contracorriente de gases calientes con respecto a la circulación del vidrio. Su tamaño es generalmente pequeño, y se los usa para productos que requieren poca extracción, del orden de las 10 tn/día. Debemos mencionar aqui tambien los hornos de uso diario u hornos de colada diaria, que son pequeños hornos de cuba, en los cuales los vidrios se funden y afinan durante la noche y luego, durante el día se operan, es decir, se extrae el vidrio, en forma manual o semiautomática, hasta un determinado nivel mínimo. Luego se vuelve a cargar con mezcla vitrificable y se repite así el ciclo diariamente sobre la base de una programación estricta. Estos hornos diarios son bastantes similares a los descritos para fundir en crisoles, y podrían definirse como semicon-

tinuos; su producción está entre 1 y 5 tn/día. Se los utiliza para fabricar series pequeñas de artículos prensados y soplados, como vajilla especial, artículos para iluminación y otros objetos prensados. Su operación es muy económica, si se los compara con los hornos de crisoles, siendo su única desventaja la corta duración de su campaña, de uno a dos años, debido a los continuos ciclos térmicos a que se ven sometidos los materiales refractarios.

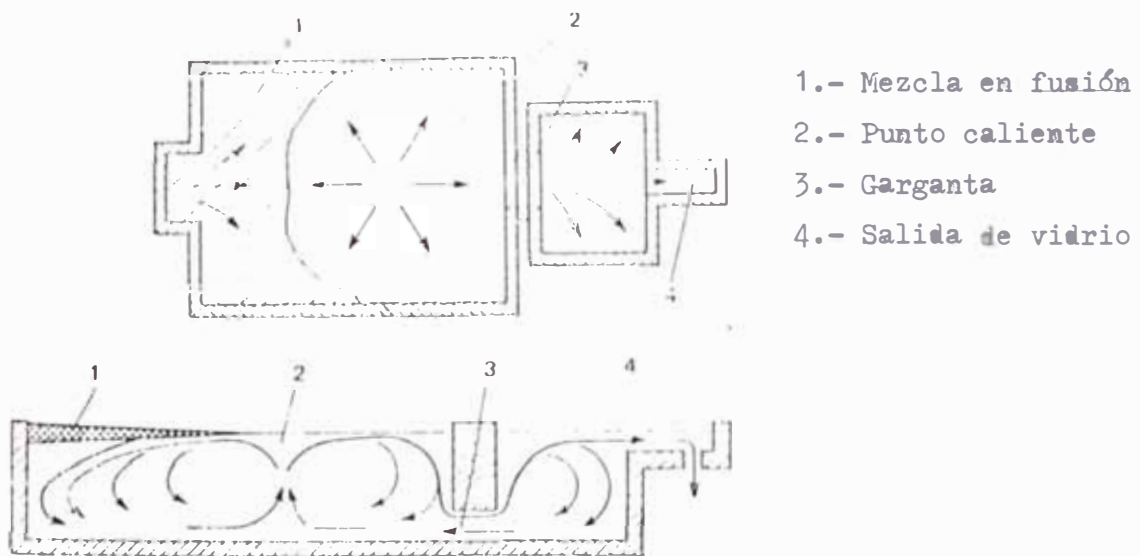


Fig. (3.6) Esquema de las corrientes del vidrio en un horno de cuba

Mencionaremos, por último, otro tipo especial de horno continuo de cuba: "la unidad fundidora". Se trata de un horno de llama directa (sin recuperación de calor), cuya cuba es larga y angosta y posee una cierta pendiente hacia la zona de trabajado. La mezcla y el aire para la combustión entran por el mismo extremo, sobre el cual está colocada la chimenea, en tanto que los quemadores están ubicados lateralmente (llamas transversales). Estos hornos se construyen de muchos tamaños (hasta de 100 tn/día) tiene la ventaja de que su instalación requiere una inversión relativamente baja (por ausencia de

cámaras regenerativas), pero consumen más combustible por tonelada de vidrio producido que los hornos regenerativos. Esto se utiliza para fabricar vidrios, para una gran variedad de artículos: botellas y frascos, bulbos para lámparas incandescentes, bulbos para termos, tubos de vidrio y otros.



### 3.2 Características del Vidrio a Producir y Calor de Fusión

Las características de los vidrios dado en función de sus componentes figuran en la tabla (3.1) en función de su composición.

Las características de los vidrios a fundir se representará por sus tipos de reacción y así mismo se evaluará el calor de fusión de estos tipos de vidrio.

#### 3.2.1 Vidrios a Fundir e Fusión de sus Componentes

Como se mencionó anteriormente los vidrios a seleccionar, que les permite competir dentro del mercado de la localidad de Huancayo. Ser tabulados en la tabla encio ada anteriormente en la cuál figurarán sus componentes, en función al porcentaje en peso.

TABLA 3.1

Tipo de Vidrio	Componentes							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO
S mi Blanco y Envases	69.73	1-2.5	12-15	0-2	1-25	8-10	0.1	
Servicio de e a	71-74	1-2	11-15	0-4	0.2	7-10	0.02	
Plano Flot.	70-71.5	0.5-1.5	13-14	0-1	4-5	8-9.5	0.3	

Se observará en esta tabla que casi todos sus componentes están en un mismo porcentaje; lo cuál indica que estos tipos de vidrio pueden manipular fácilmente en un solo horno, para la producción serie.

#### 3.2.2 Reacción en el Sistema Na<sub>2</sub>O-CaO-SiO-CO<sub>2</sub>

(Seleccionado según Tabla (3.1)).

Es importante tener una noción de lo que sucede a medida que se funde, para ello se procederá a explicar los tipos de reacciones probables que pueden suceder mientras se funde el vidrio; en función de la temperatura y sus reacciones.

La primera reacción que tiene lugar, a partir de los 600°C, es la formación del carbonato doble de sodio y calcio  $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$  que funde a 813°C. Este carbonato doble puede formar con más carbonato cálcico, cristales mixtos que a 785°C presentan un punto eutéctico para la reacción aproximada de  $2\text{CaCO}_3 \cdot 3\text{Na}_2\text{CO}_3$ , que corresponde al primer signo de fusión; en la (Fig.3.6) se aprecia lo anteriormente mencionado.

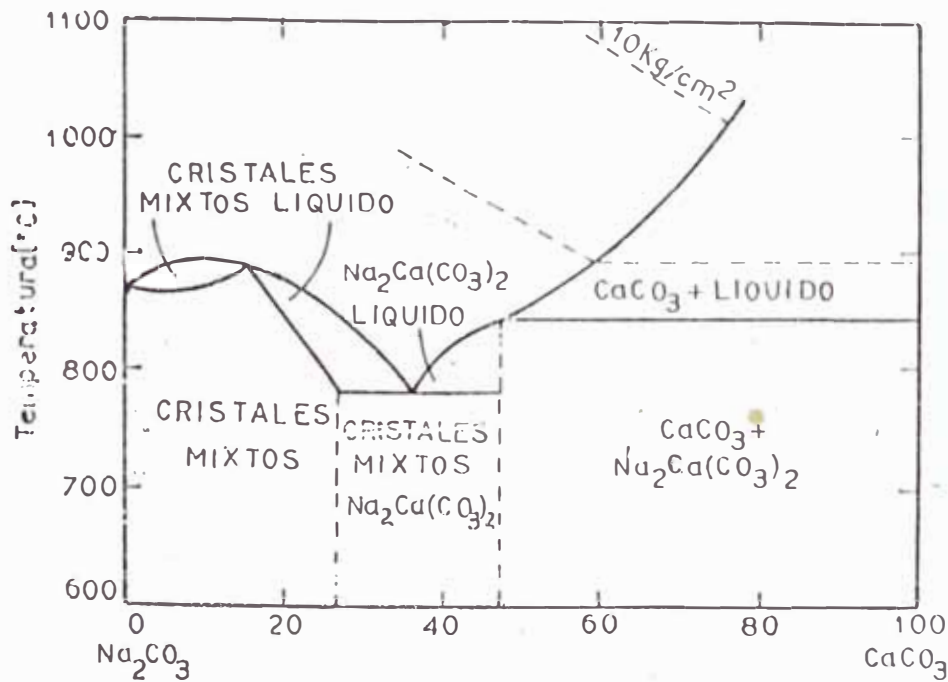
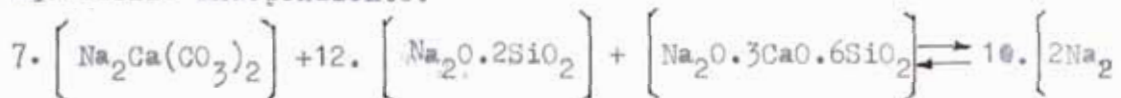


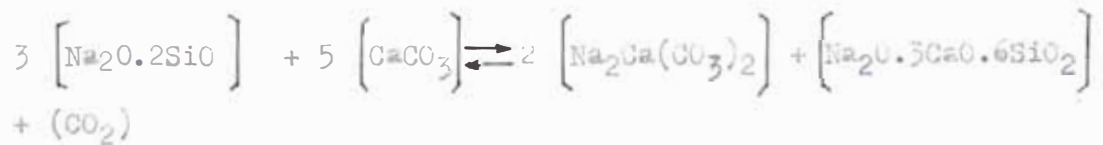
Fig. 3.6 Sistema  $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-CaCO}_3$

A temperaturas más altas interviene la fase fundida en las regiones más altas en alcalí, estableciéndose de esta manera, el siguiente equilibrio independiente:





Por acción del disilicato sódico se forma de vitrita según la siguiente reacción.

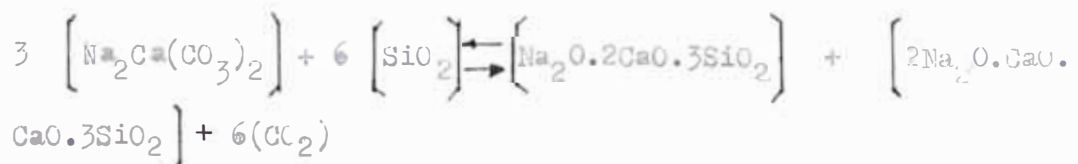


En cuanto a la velocidad con que transcurre la reacción de la mezcla ternaria de carbonato sódico, carbonato calcico y sílice, se comprueba que, a temperaturas inferiores a 850°C, pasa por un máximo para la relación molar, y que la influencia de la sílice es pequeña.

En cambio, a temperaturas próximas al punto de fusión del carbonato sódico, la velocidad de reacción de las mezclas equimolares de ambos carbonatos aumenta intensamente con el contenido de SiO<sub>2</sub>.

Si se aumenta la proporción de CaCO<sub>3</sub>, la velocidad de reacción pasa por un máximo situado cada vez más bajo, de tal manera que las mezclas Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: CaCO<sub>3</sub>: SiO<sub>2</sub>, correspondientes a las relaciones molares 1:1:2, 1:2:3, 1:2, 7:9:6; presentan casi las mismas velocidades de reacción.

Los resultados anteriores corresponden a ensayos realizados en atmósferas de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, si la presión parcial de CO<sub>2</sub>, es menor como sucede en los hornos industriales de fusión de vidrio, en las que se mantiene por debajo de 0.2 ATM, disminuye la temperatura de equilibrio. Así, en la reacción:



Las principales reacciones y transformaciones que tienen lugar en este sistema pueden reunirse en la tabla (3.2)

La velocidad con que reaccionan los componentes de este sistema resulta marcadamente influida por efecto de los aditivos que se incorporan. Para proporciones que de 1:1:6 de carbonato sódico, carbonato calcico y silice cuarcitico respectivamente; al sustituirse parte del carbonato sódico por carbonato de litio o potasio, aumenta la velocidad de reacción, debido a que estos carbonatos dan lugar a un aumento de la cantidad de fase fundida.

TABLA 3.2  
TRANSFORMACIONES TERMICAS PRODUCIDAS EN EL SISTEMA  
NaO - CaO - SiO<sub>2</sub> - CO<sub>2</sub>

Temperat. °C	Transformación
≥ 600	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$
760	$3 \text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 + 10 \text{SiO}_2 \rightarrow 2 \text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 0.3\text{CaO} \cdot 0.6\text{SiO}_2 + 6(\text{CO}_2)$
≥ 760	Fusión Peritectica $\text{Na}_2\text{O} \cdot 0.3\text{CaO} \cdot 0.6\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot 0.2\text{CaO} \cdot 0.3\text{SiO}_2 + \text{Liquidos}$
785	Fusión de Eutectico $2\text{CaCO}_3 \cdot 3\text{Na}_2\text{CO}_3$
790	Fusión del Eutictico $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 - \text{SiO}_2$
827-834	Fusión Peritectica $2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 0.3\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot 0.2\text{CaO} \cdot 0.3\text{SiO}_2 + \text{Liquido}$
1045	Fusión Inconerente del $\text{Na}_2\text{O} \cdot 0.3\text{CaO} \cdot 0.6\text{SiO}_2$
1125	Fusión Inconerente del $4\text{Na}_2\text{O} \cdot 0.3\text{CaO} \cdot 0.5\text{SiO}_2$
1141	Fusión Inconerente del $2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 0.3\text{SiO}_2$
1284	Fusión Congruente del $\text{Na}_2\text{O} \cdot 0.2\text{CaO} \cdot 0.2\text{SiO}_2$
1450	Fusión Congruente del $\text{Na}_2\text{O} \cdot 0.2\text{CaO} \cdot 0.2\text{SiO}_2$

El diagrama de equilibrio correspondiente al sistema  $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ , ha sido parcialmente estudiado en la zona más próxima al vertice de silice que corresponde precisamente a la que comprende la mayor parte de las composiciones habituales de los vidrios silico-calco-sódicos (Fig.3.7).

Dentro de dicha zona se identifican dos eutecticos y seis fases ternarias, una de las cuales que responde a la composición  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , no pudo ser caracterizada.

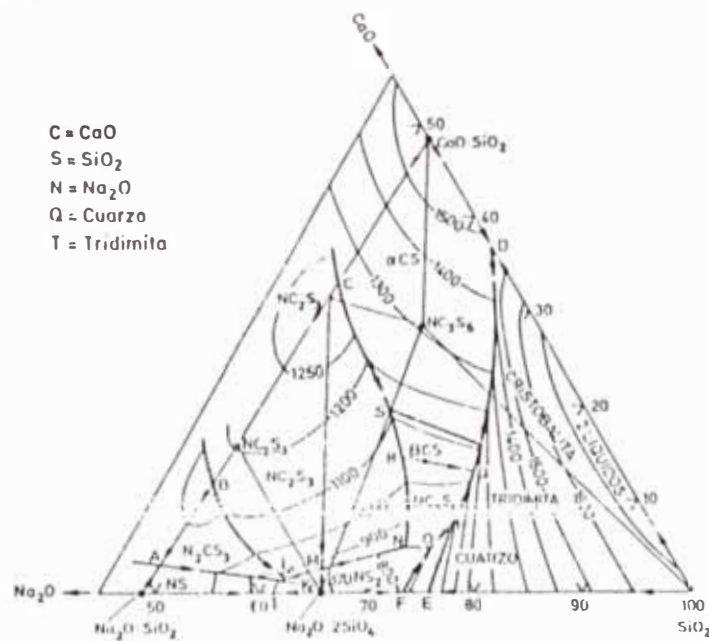


Fig. 3.7 Sistema  $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$  en su zona más rica en  $\text{SiO}_2$ .

### 3.2.3 Evaluación del Calor de Fusión

La capacidad calorífica isoterma de los sodicos depende de las vibraciones atómicas, y su valor aumenta con la temperatura a medida que aumenta la amplitud de estas, de acuerdo a la conocida ley de DEBYE, aplicable a vibraciones armónicas;

$$C_v = N \cdot k (\theta/T)^2 \times \left[ \frac{e^{\theta/T}}{(e^{\theta/T} - 1)} \right]$$

Donde:

- N = Número de Avogadro
- R = Constante de los gases
- k = Constante de Boltzmann
- T = Temperatura absoluta

$$\theta = \frac{h \times \nu}{k}$$

- h = Constante de Planck
- $\nu$  = Frecuencia

Pero sin embargo, esta relación no cumple rigurosamente, por lo que es preciso recurrir a fórmulas empíricas, que permiten calcular aditivamente entre 0 a 1500 C, con una precisión de error del  $\pm 1\%$  para el cálculo del calor específico se utilizará la siguiente expresión.

$$C_v = \frac{0.00146T \sum a_i f_i + 2T \sum a_i f_i + \sum a_i c_i}{(0.00146T + 1)^2}$$

La cuál da valores bastante exactos.

Donde:

- $a_i$  = Fracción ponderal de los óxidos
- $f_i$  = Factor de temperatura de cada óxido
- $c_i$  = Calor específico a 0°C. de cada óxido

Los valores de  $f_i$  y de  $c_i$  se expresan en la tabla (3.3)

TABLA (3.3)  
FACTORES DE TEMPERATURA  $f_i$  Y CALORES ESPECIFICOS  
DE  $c_i$  A 0°C DE DISTINTOS OXIDOS

Oxido	$f_i \times 10^{-4}$	$c_i \times 10^{-4}(\text{Kcal/Kg.}^\circ\text{C})$
SiO <sub>2</sub>	4.68	1657
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.98	1935
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.53	1755
MgO	5.14	2142
CaO	4.10	1709
PbO	0.13	490
Na <sub>2</sub> O	8.29	2229
K <sub>2</sub> O	4.45	1756
SO <sub>3</sub>	8.30	1890

De acuerdo a la tabla (3.3) y a los tipos de vidrios seleccionados, elaboraremos la tabla (3.4); que será útil para determinar el calor específico de los vidrios de diferente composición y uso al cual han sido designados; tales como vidrios para servicio, vidrio plano y vidrio para envases. Siendo el calor específico seleccionado para el cálculo del diseño del horno, el de mayor valor numérico. Ya que este valor, nos permitirá diseñar un horno que pueda fundir los tres tipos de vidrio seleccionados empleando el mismo horno; de manera que la fundición de estos vidrios sean operados en condiciones óptimas.

TABLA 3.4

Tipo Vidrio	Oxidos	ai % Peso	fi	ei Kcal/Kg-°C	C <sub>v</sub>
Semi Blanco Para Envase y Vidrio Plano Flotado	SiO <sub>2</sub>	71	0.000468	0.1657	0.3329
	Al <sub>2</sub> O	2	0.000453	0.1755	
	Na <sub>2</sub> O	14	0.000829	0.2229	
	K <sub>2</sub> O	2	0.000445	0.1756	
	MgO	2	0.000514	0.2142	
	CaO	9	0.000410	0.1709	
	Fe <sub>2</sub> O	0.1	- . -	- . -	
Servicio de Mesa	SiO <sub>2</sub>	71	0.000468	0.1657	0.3312
	Al <sub>2</sub> O	2	0.000453	0.1755	
	Na <sub>2</sub> O	12	0.000455	0.2229	
	K <sub>2</sub> O	4	0.000445	0.1756	
	MgO	2	0.000514	0.2142	
	CaO	7	0.000410	0.1709	
	B <sub>2</sub> O	2	0.000013	0.0480	

\* C<sub>v</sub> Son valores proporcionados por los cálculos realizados por la computadora. (Kcal/Kg<sup>o</sup>C)



3.2.4.1. Cálculo del Calor Específico y Calor para fundir el Vidrio

Para realizar este cálculo se hará uso de la computadora motivo por el cual se usará el lenguaje BASIC y la tabla (3.4), que proveera de datos a la computadora.

Asimismo se hará uso del valor de la masa a fundir y de la diferencia de temperatura al que hay que elevar el vidrio para su fusión.

$$M_V = \text{Masa/hr} = 345 \text{ kg/hr (ver párrafo 2.3.1.4)}$$

$$T_f = \text{Temperatura de fusión} = 1450^\circ\text{C (según tabla (3.2))}$$

$$T_A = \text{Temp. ambiente} = 3^\circ\text{C (punto más bajo de Temp. en Huancayo)}$$

3.2.4.2. Programa para Cálculo  $C_V$  y  $Q_L$ . (Calor Latente)

```
5 DIM A(8), F(8), C(8)
10 INPUT "TF=";TF;"SPC(3)";"TA=";TA
20 INPUT "M=";M
22 T=TF+273
25 GOSUB 60
30 CV=(0.00146*(T^2)*I+2*T*I+R)/(0.00146T)^2
35 QL=M*CV*(TF-TA)
40 PRINT"TF=";TF;"SPC(2)";"TA=";TA;"SPC(2)";"M=";M;"SPC(2)";"CV=";CV;"SPC(2)";"QL=";QL
50 END
60 FOR S = 1 TO 7
70 READ A(S),F(S),C(S)
80 I = I+A(S)*F(S)
90 R = R+A(S)*C(S)
100 NEXT S
110 RETURN
```

PRIMER BLOQUE DE DATOS (VIDIOS PARA ENVASES Y PLANO)

120 DATA 0.71, 0.000468, 0.1657  
121 DATA 0.02, 0.000453, 0.1755  
122 TA 0.14, 0.000829, 0.2229  
123 DATA 0.02, 0.000514, 0.2142  
124 DATA 0.02, 0.000445, 0.1756  
125 DATA 0.09, 0.000410, 0.1709

SEGUNDO BLOQUE DE DATOS (VIDRIOS PARA S VICIOS)

120 DATA 0.71, 0.000468, 0.1657  
121 DATA 0.02, 0.000453, 0.1755  
122 DATA 0.12, 0.000829, 0.2229  
123 DATA 0.04, 0.000445, 0.1756  
124 DATA 0.02, 0.000514, 0.2142  
125 DATA 0.07, 0.000410, 0.1709  
126 DATA 0.02, 0.000013, 0.0480

Ver diagrama de flujo en apéndice (A-1)

Es importante hacer notar que los valores, que arroja la computadora, respecto al calor específico y calor latente de fusión, están en las unidades dimensionales siguientes: (Kcal/kg-°C) y (Kcal/hr), respectivamente.

Los valores obtenidos y datos importantes quedarán enmarcados dentro de la tabla (3.5), ya que estos serán utilizados en nuestro diseño, en los párrafos posteriores.

TABLA 3.5

$M_v$ (kg/hr)	$T_F$ °C	$T_A$ °C	$C_v$ (kcal/Kg-°C)	$Q$ (Kcal/hr)
345	1450	-4	0.3329	167,037

### 3.3. Cálculo del Calor Necesario

Para calcular el calor necesario haremos las evaluaciones termodinámicas, aplicando la primera ley termodinámica, a un volumen de control.

Sin embargo, nos veríamos i posibilitados de dar una aplicación directa de esta Ley, si previamente no hacemos un planteo físico de nuestro volumen de control; y así mismo se planteo el tipo de combustible a usar, sus características y la evaluación de las entalpías de formación del combustible, y como la de los productos reaccionados (aire combustible).

Luego para la evaluación del calor necesario haremos el seguimiento aquí planteado.

#### 3.3.1. Disposición del Horno y Evaluación General del Volumen de Control

La disposición del horno que aparece en la fig. (3.8), se plantea de la forma presentada con el fin de facilitar el cálculo del balance térmico. La determinación del flujo de las asas de combustible y aire; por razones obvias esto se efectúa posteriormente, ya que para ello, previamente se hará los cálculos de dimensionamiento.

#### 3.3.2. Primera Ley Termodinámica aplicada al volumen de control planteado

Las consideraciones que vamos hacer para esta aplicación es siguiente:

- Que el horno se encuentra en estado y flujo estable.
- Que la temperatura de los gases de salida están a casi la misma temperatura del aire calentado con el recuperador.
- Que el calor perdido por las paredes, solera y techo son por

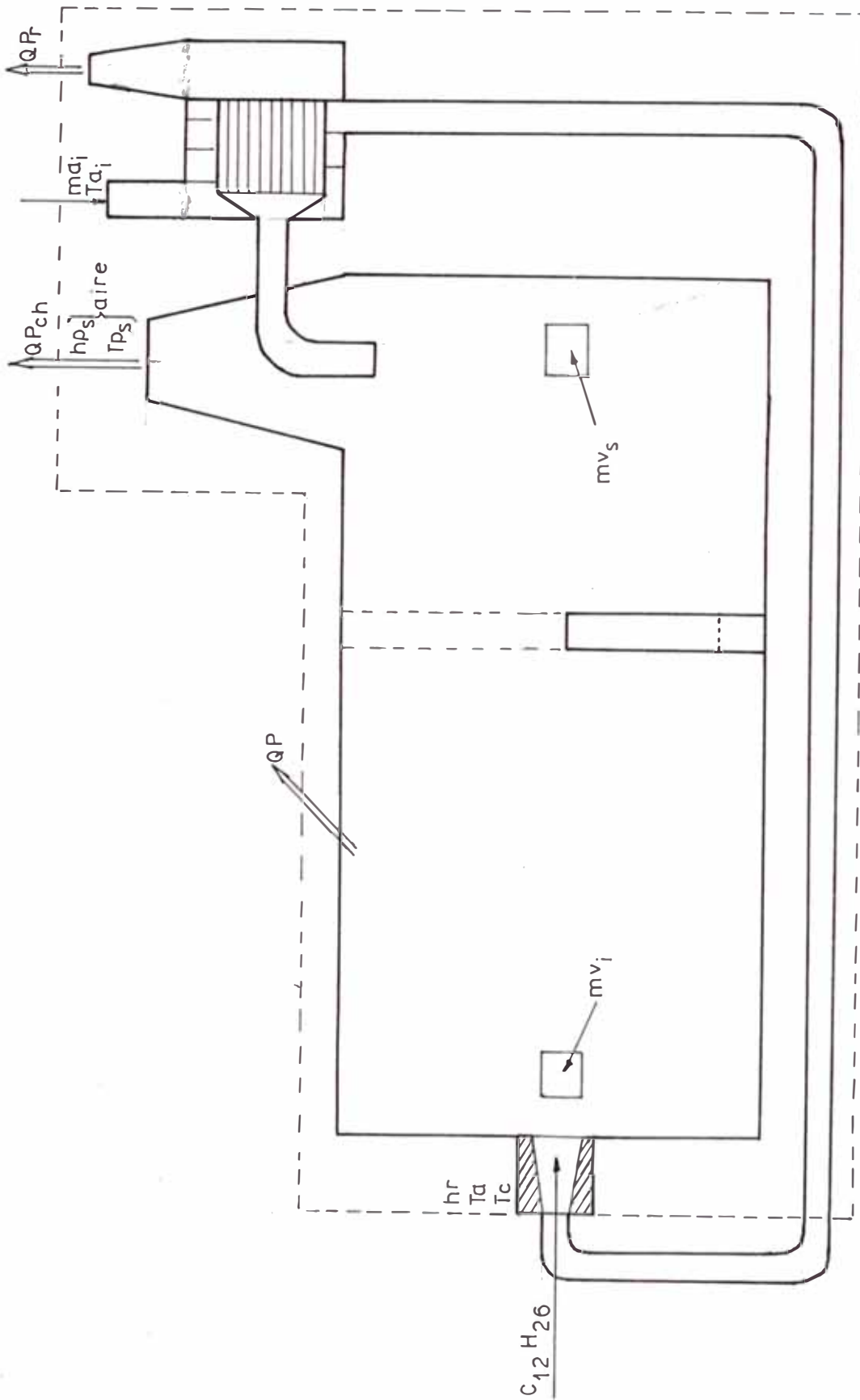


Fig. 3.8 Disposición de Horno para aplicación

en el Balance Técnico

centajes del calor transmitido al vidrio.

- Que en la cámara de combustión se tiene la temperatura adiabática de la llama, a la salida del horno una temperatura un poco mayor que la temperatura de fusión congruente del vidrio.
- Las pérdidas de calor en el recuperador están involucradas en pérdidas del volumen de control.
- La composición del petróleo, como promedio es el dodecano  $C_{12}H_{26}$ , es decir 85% C y 15% hidrogeno de acuerdo al peso .
- La presión en la cámara del horno debe ser igual o algo mayor que la atmosférica.

Luego nuestro balance estara dado por la siguiente relación aplicada a la primera ley termodinámica.

Primera Ley

$$Q_p + Q_L = \left[ \sum (h_{ps}^{\circ} + \Delta h_{ps}) \times N_p - \sum (h_{re}^{\circ} + \Delta h_{re}) \times N_r - \left[ W_{vent} - W_{ext} + E_{kr} - E_{kr} \right] \right]$$

Para facilitar el cálculo podemos hacer cierto tipo de simplificaciones.

- $W_{vent}$  = Trabajo de ventilador, muy pequeño con respecto al calor emitido.
- $W_{ertr}$  = Trabajo extractor, igual que lo anterior.
- $E_{kp} - E_{kp}$  = Energía cinetica de reactantes y productos. (se considera cero, con fines de facilitar el cálculo ya que ello así como las dos simplificaciones

anteriores afectan poco.

3.3.3 Reacción estequiométrica para quemar el Petróleo Completamente

Para que esto ocurra es necesario que haya un exeso del 30% de aire, ya que con este incremento de aire se consigue una combustión perfecta. Por lo cual plantearemos la siguiente ecuación de reacción.



3.3.3.1 Cálculo de los % CO<sub>2</sub>, % H<sub>2</sub>O, % N<sub>2</sub> y % O<sub>2</sub>

$$\begin{aligned} WMT &= 12x WMT CO_2 + 13.0 WMT H_2O + 90.24 WMT N_2 + 5.5 WMT O_2 \\ WMT &= 12 x (12+32) + 13x(2+16) + 90.24x2(14) + 5.5x2(16) \\ WMT &= 3464 \end{aligned}$$

Donde:

- WMT = Peso molar total
- WMT(CO<sub>2</sub>) = Peso molar del CO<sub>2</sub>
- WMT(H<sub>2</sub>O) = Peso molar de H<sub>2</sub>O
- WMT(N<sub>2</sub>) = Peso molar de N<sub>2</sub>
- WMT(O<sub>2</sub>) = Peso molar de O<sub>2</sub>

Luego:

$$\% CO_2 = \frac{12 WMT CO_2}{WMT} = \frac{518}{3464} \cdot 100 = 15.24 \%$$

$$\% \text{H}_2\text{O} = \frac{13 \text{ WMT H}_2\text{O}}{\text{WMT}} = \frac{234}{3464} \times 100 = 6.75 \%$$

$$\% \text{N}_2 = \frac{90.24 \text{ WMT N}_2}{\text{WMT}} = \frac{2564}{3464} \times 100 = 75.06 \%$$

$$\% \text{O}_2 = \frac{5.5 \text{ WMT O}_2}{\text{WMT}} = \frac{176}{3464} \times 100 = 5.08 \%$$

### 3.3.3.2 Características de los Petróleos

#### Disel 2 y 6

Las características del petróleo que posiblemente pueden ser usados están tabulados en la tabla (3.6). Pero para efecto de cálculo se hizo las consideraciones siguientes:

- 1.- El petróleo tiene una configuración promedio de  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$
- 2.- La entalpia de formación  $h_f = -144,322 \text{ kcal/kg mol}$
- 3.- La  $r_{a/c} = 19.38 \text{ kg aire/kg comb.}$  (relación aire / combustible)
- 4.- Temperatura Adiabática de la llama ( $T_A = 2151 \text{ }^\circ\text{C}$ )

TABLA 3.6

Características de Identificación	Disel 2	Disel 6
Clase de Fuel- oil	Destilado	Residual
Color	Ambar	Negro
Peso específico APJ	32	12

Características de Identificación		Disel 2	Disel 6
Carbón Residual		Trazas	12%
Propiedades de FLUIDEZ	Viscosidad centistokes 38°C	2.6	700
	Temperatura de fluidez crítica	- 18°C	19°C
	Temperatura Bombeo	Atmosf.	38°C
	Temperatura Atomiza.	Atmosf.	94°C
Pureza	Contenido Azufre	0.4% - 0.7%	2.8% Max.
	Contenido Agua	Trazas	2.0% Máx.
	Contenido Cenizas	Trazas	
Composición	Oxígeno y Nitrógeno	0.2	0.93
	Hidrógeno	12.7	10.50
	Carbono	86.10	85.70
Poder Calorífico		10.20 kcal/kg	9.660
Temperatura de la llama adiabt. °C		2151	2106
Kg de aire por cada kg de combust. teórico		14.43	13.64

### 3.3.4 Cálculo de la Entalpia de Formación

#### DEL Combustible

Para evaluar la cantidad de combustible a usar necesitamos evaluar la entalpia de formación del  $C_{12}H_{26}$ , para ello haremos un ar



tificio. Ya que en las tablas no existen.

$$Q = h_f H_2O \times (13) + h_f CO_2 \times (12) - h^\circ C_{12}H_{26}$$

$$h^\circ C_{12}H_{26} = h_f H_2O \times (13) + h_f CO_2 \times (12) - Q_{p.c}$$

Donde:

$$h^\circ C_{12}H_{26} = (-57,798) \times 13 + (-94,054) \times (12) + 10,210 \times 170$$

$$h^\circ C_{12}H_{26} = -751,374 - 1128648 + 1735700$$

$$h^\circ C_{12}H_{26} = -144,322 \text{ cal/Kgr-mol}$$

Donde:

$h_f(H_2O)$  Entalpia de formación del  $H_2O$

$h_f CO_2$  Entalpia de formación del  $CO_2$

$h^\circ C_{12}H_{26}$  Entalpia de formación del  $C_{12}H_{26}$

$Q_{p.c}$  Calor específico del combustible

### 3.3.5. Cálculo de la masa de Gas en el Recuperador y la Chimenea

La figura (3.8), es un esquema del volumen de control del horno, de manera que su disposición facilitó el cálculo de la cantidad de combustible y aire del horno, por razones de cálculo, se ha supuesto que la temperatura del gas a la salida por la chimenea, es la misma que la temperatura promedio del mismo, dentro del horno. Siendo estos valores (1550°C, 1650°C, 1750°C).

La temperatura del gas, a la salida del recuperador es aproximadamente 50°C mayor que la temperatura del aire calentado, es decir que para el cálculo se tendrá los siguientes valores de temperatura de gas a la salida del recuperador.

(150,250,350.....,950,y 1050) °C.

Para efecto de cálculo se hará uso de la suposición descrita en el párrafo anterior, con respecto a la ley de continuidad y de la primera ley termodinámica aplicada sobre el recuperador; con el fin de calcular la masa del gas, que entregará energía a la masa de aire a calentar. Posteriormente, en la sección (3.3.5), de acuerdo a este cálculo, se elaborará la ecuación del balance termodinámico; para ello aplicaremos la primera ley de la termodinámica. Con esta última ecuación, se obtendrá la cantidad de moles de combustible, para producir el calor necesario.

Aplicando la ley de continuidad al volumen de control, que se planteo, el cual se encuentra en estado de flujo estable. La cantidad de gas total que sale del horno está dada por la siguiente relación:

$$MG = MC + MR = MA + MO \quad (3.2)$$

Donde:

MG = Flujo de masa de gas total

MC = Flujo de masa de gas por la chimenea principal

MR = Flujo de masa de gas por el recuperador

MA = Flujo de masa de aire calentado

MO = Flujo de masa de combustible

Para el cálculo de la masa de gas por el recuperador; aplicaremos la primera ley de la termodinámica, manera tal que el balance efectuado en el recuperador, este en función de las entalpías de los productos de la reacción. El balance elaborado cumplirá \_

con la siguiente relación:

$$MR = \frac{MC \times (24 \times (\Delta h_s)_{O_2} + 90.24 \times (\Delta h_s)_{N_2}) \times MT}{A} \quad (3.3)$$

Para el caso de la reacción producida por el combustible a usarse, el valor de "A" ha sido efectuada en función de la entalpía de cada uno de los componentes del producto, para lo cual se plantea la siguiente ecuación:

$$A = \left[ \begin{array}{l} 12 \times (\Delta h_i)_{CO_2} + 13 \times (\Delta h_i)_{H_2O} + 5.5 \times (\Delta h_i)_{O_2} \\ + 90.24 \times (\Delta h_i)_{N_2} - 12 \times (\Delta h_s)_{CO_2} - 13 \times (\Delta h_s)_{H_2O} \\ - 90.24 \times (\Delta h_s)_{N_2} - 5.5 \times (\Delta h_s)_{O_2} \end{array} \right]$$

Donde:

- $C_p$  = Calor específico del aire (cal/gr-°C)
- $(\Delta h_i)_{CO_2}$  = Entalpía del  $CO_2$  a la temp. del gas (cal/gr-°C)
- $(\Delta h_i)_{H_2O}$  = Entalpía del  $H_2O$  a la temp. del gas (cal/gr-°C)
- $(\Delta h_i)_{O_2}$  = Entalpía del  $O_2$  a la temp. del gas (cal/gr-°C)
- $(\Delta h_i)_{N_2}$  = Entalpía del  $N_2$  a la temp. del gas (cal/gr-°C)
- $(\Delta h_s)_{CO_2}$  = Entalpía del  $CO_2$  a la temp. del gas a la salida del recuperador (cal/gr-°C)
- $(\Delta h_s)_{H_2O}$  = Entalpía del  $H_2O$  a la temp. del gas a la salida del recuperador (cal/gr-°C)
- $(\Delta h_s)_{N_2}$  = Entalpía del  $N_2$  a la temp. del gas a la salida del recuperador (cal/gr-°C)
- $(\Delta h_s)_{O_2}$  = Entalpía del  $O_2$  a la temp. del gas a la salida del recuperador (cal/gr-°C)

NC = Número de moles de combustible/ Hora ( N<sup>o</sup>/Hr.<sup>o</sup> )  
MT = Peso molar del gas, total ( Gr-m. )

Para facilitar el cálculo de la masa que pasa por el recuperador (gas), "MR"; en el computador. Se reformulará las ecuaciones que permiten calcular los valores de "MR" y de "A", tal como aparece a continuación:

$$MR = NC \times (24 \times O(Z) + 90.24 \times G(Z)) \times 3464 / A(Z) \quad (3.5.a)$$

Donde:

$$A(Z) = 12 \times (B-H(Z)) + 13 \times (C-X(Z)) + 90.24 \times (D-G(Z)) + 5.5 \times (R-O(Z))$$

Así mismo se elabora la Tabla (3.7), la cual nos servirá de ayuda para almacenar los datos en el computador.

TABLA (3.7)

T(aire)	O(Z)	G(Z)	X(Z)	H(Z)
150	892	874	1016	1195
250	1628	1576	1851	2240
350	2389	2292	2712	3353
450	3171	3024	3599	4523
550	3973	3770	4516	5740
650	4790	4533	5463	6997
750	5619	5310	6439	8286
850	6461	6101	7447	9603
950	7311	6904	8483	10944
1050	8170	7717	9548	12304

no; los dos últimos valores, son expresados en porcentajes del calor latente de fusión del vidrio.

Para tal efecto, regresaremos a la ecuación de balance termodinámica (3.1). Obteniéndose que el calor necesario "QN", es igual a :

$$QN = (1 + \%C) \times QL = \sum H_p N_p - \sum H_r N_r \times NC$$

Luego:

$$NC = (QN / (\sum H_p N_p - \sum H_r N_r)) \quad (3.9)$$

Donde:

$$\sum H_p N_p = \left[ \begin{array}{l} (12 \times MR/MT) \times (h_{CO_2}^{\circ} + (\Delta H_s)_{CO_2}) + (13 \times MR/MT) \times (h_{H_2O}^{\circ} + (\Delta h_s)_{H_2O}) + (90.24 \times MR/MT) \times (\Delta h_s)_{N_2} + (5.5 \times MR/MT) \times (\Delta h_s)_{O_2} \\ + (12 \times MC/MT) \times (h_{CO_2}^{\circ} + (\Delta h_i)_{CO_2}) + (13 \times MC/MT) \times (h_{H_2O}^{\circ} + (\Delta h_i)_{H_2O}) + (90.24 \times MC/MT) \times (\Delta h_i)_{N_2} + (5.5 \times MC/MT) \times (\Delta h_i)_{O_2} \end{array} \right]$$

$$\sum H_r N_r = (h_{C_{12}H_{26}}^{\circ}) + 24 \times (\Delta h_s)_{O_2} + 90.24 \times (\Delta h_s)_{N_2}$$

$$h_{CO_2}^{\circ} = \text{Entalpía de formación del } CO_2 \text{ a 1 Atm. y } 298.5^{\circ}C \text{ (cal/gr-mol)}$$

$$h_{H_2O}^{\circ} = \text{Entalpía de formación del } H_2O \text{ a 1 Atm. y } 298.5^{\circ}C \text{ (cal/gr-mol).}$$

Es importante notar, que el cálculo de la masa molar de los productos de la reacción del combustible con el aire, es la que a continuación aparece :

$$MT = M_{C_{12}H_{26}} + 24 \times M_{O_2} + 90.24 \times M_{N_2}$$

$$MT = 3464 \text{ gr/mol}$$

Para proceder el cálculo por computadora del número de moles de combustible a quemar por hora, se elaborará la tabla (3.8). Donde se establece la nomenclatura equivalente de las fórmulas elaboradas con respecto a las que aparecerán en el programa de cálculo por computadora.

TABLA 3.8

Nomenclatura en formulas .planteadas.	Nomenclatura para ser usada en la computadora.
A	A
MR	MR
MA	MA
CP	0.24
T	T(Z) - TA
$(\Delta h_i) CO_2$	B
$(\Delta h_i) H_2O$	C
$(\Delta h_i) N_2$	D
$(\Delta h_i) O_2$	R
$(\Delta h_s) CO_2$	EP
$(\Delta h_s) H_2O$	FP
$(\Delta h_s) N_2$	GP
$(\Delta h_s) O_2$	OP

Nomenclatura en formulas planteadas.	Nomenclatura para ser usada en la computadora.
MC	MC
MO	MO
NC	NC
QL	QL
QN	QN
$h_{CO_2}$	$h_{CO}$
$h_{H_2O}$	IHO

De manera similar como se elaboró la tabla (3.7); se procedera' a generar la tabla (3.9); donde aparecen los valores de las entalpias de formación del  $C_{12}H_{26}$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  a ATM y  $298.5^{\circ}C$ .

De igual manera también se generara la tabla (3.10) donde rece los valores de las entalpias del  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$  y  $N_2$  a temperas del gas dentro del horno.

TABLA 3.9  
ENTALPIAS DE FORMACION

Nomenclatura elaborada	$h_{C_{12}H_{26}}^{\circ}$	$h_{CO_2}^{\circ}$	$h_{H_2O}^{\circ}$
Nomenclatura Computadora	CH	HCO	IHO
	- 144,322	- 94,054	- 57,798

TABLA 3.10  
 ENTALPIAS DE PRODUCTOS

Nomenclatura Elaborada	$(\Delta h_i)_{CO_2}$	$(\Delta h_i)_{H_2O}$	$(\Delta h_i)_{N_2}$	$(\Delta h_i)_{O_2}$
Nomenclatura Computadora	B	C	D	R
Temperatura Gas				
1550	19361	15239	11903	12559
1650	20748	16439	12757	13456
1750	22189	17655	13613	14357

Los valores obtenidos en las tablas (3.7), (3.9), (3.10); han sido obtenidos de las tablas que aparecen en el apéndice (A.2)

3.3.6. Programa de Cálculo Termodinámico para calor

Necesario, Masa combustible, Masa de aire y otros

```

5  DIM S(10), TG(4), H(30), X(30)
10  DIM QN(10), QP(20), NC(10,10), A(10), O(30), G(30)
12  CH = -144322
14  HCO = -9405
15  IHO = -57798
17  FOR W = 1 TO 3
18  READ TG (W)
23  READ B, C, D, R
25  PRINT "TG";W;"="; "TEMPERATURA GASES-HORNO"; TG(W)
3   INPUT "C LOR DE FUSION VIDRIO QL =", QL
37  FOR K = 6 TO 10
    
```



```
40 QP(K-5)=(K/10)xQL:PRINT"QP("; K ;"=";QP(K-5);"CAL/HR"
42 QN(K-5)=(1+K/10)xQL:PRINT"QN(";K-5;"")=";QN(K-5);"CAL/HR"
43 FOR Z = 1 TO 10
45 S(Z) = 100 xZ + 50
46 GOSUB 59
47 MA = 19.38 x 170 x NC(K,Z)/1000
48 MG = 20.38 x 170 x NC(K,Z)/1000
49 MR = NC(K,Z)x(24xO(Z)+90.24xG(Z))x3464/(A(Z)x1000)
50 MC = 20.38 x NC(K,Z) x 170 / 1000 -MR
51 MO = 170 x NC(K,Z)/1000
52 PRINT"MA="; "MASA AIRE CALIENTE="; MA; "KGR/HR"
53 PRINT"MG="; "MASA DE GASES="; MG; "KGR/HR"
54 PRINT"MR="; "MASA DE GASES RECP. ="; MR; "KGR/HR"
55 PRINT"MC="; "MASA DE GASES CHIMENEA="; MC; "KGR/HR"
56 PRINT"MO="; "MASA DE COMBUST. ="; MO; "KGR/HR"
57 STOP
58 GOTO 72
59 IF (K-S) = 1 THEN 61
60 GOTO 64
61 READ O(Z), G(Z), X(Z), H(Z)
62 INPUT O(Z), G(Z), X(Z), H(Z)
63 A(Z)=12x(B-H(Z))+13x(C-X(Z))+90.24x(D-G(Z))+5.5x(R-O(Z))
64 MTR = (24xO(Z)+90.24xG(Z))x3464/A(Z)
65 MKC = 170x20.38 - MTR
66 KT = (MTR/3464)x((HCO+H(Z))x12+(IHO+X(Z))x13+90.24xG(Z)+
5.5xO(Z))
67 PG = (MKC/3464)x((HCO+B)x12+(IHO+C)x13+90.24xD+5.5xR)
68 UR = CH + 24 xO(Z) + 90.24 x G(Z)
```

```
69 NC(K,Z) = - QN(K-5)/(KT+PG-UR)
70 PRINT "NC(="; K-5;Z; ")="; NC(K,Z);"#MOLES -GR/HR Combl"
71 RETURN
72 NEXT
73 NEXT
74 NEXT
75 END
76 DATA 1550
77 DATA 19361, 15239, 15239, 11903, 12559
78 DATA 892, 874, 1016, 1195
79 DATA 1628, 1576, 1851, 2240
80 DATA 2389, 2292, 2712, 3353
81 DATA 3171, 3024, 3599, 4523
82 DATA 3973, 3770, 4516, 5740
83 DATA 4790, 4533, 5463, 6997
84 DATA 5619, 5310, 6439, 8286
85 DATA 6461, 6101 , 7447, 9603
86 DATA 7311, 6904, 8483, 10944
87 DATA 8170, 7717, 9548, 12304
88. DATA 1650
89 DATA 20748, 16439, 12757, 13456
90 DATA 892, 874, 1016, 1195
91 DATA 1628, 1576, 1851, 2240
92 DATA 2389, 2292, 2712, 3353
93 DATA 3171, 3024, 3599, 4523
94 DATA 3973, 3770, 4516, 5740
95 DATA 4790, 4533, 5463, 6997
96 DATA 5619, 5310, 6439, 8286
```

97 DATA 6461, 6101, 7447, 9603  
98 DATA 7311, 6904, 8483, 10944  
99 DATA 8170, 7717, 9548, 12304  
100 DATA 1750  
101 DATA 22189, 17655, 13613, 14357  
102 DATA 892, 874, 1016, 1195  
103 DATA 1628, 1576, 1851, 2240  
104 DATA 2389, 2292, 2712, 3353  
105 DATA 3171, 3024, 3599, 4523  
106 DATA 3973, 3770, 4516, 5740  
107 DATA 4790, 4533, 5463, 6997  
108 DATA 5619, 5310, 6439, 8286  
109 DATA 6461, 6101, 7447, 9603  
110 DATA 7311, 6904, 8483, 10944  
111 DATA 8170, 7717, 9548, 12304

\* El diagrama de flujo se encuentra desarrollado en el apéndice (A.3).

Los resultados que arroja la computadora aparece tabulados en la tablas (del 3.9.a al 3.9.o), la cantidad de resultados de estas tablas nos va ha permitir, determinar l cantidad de combustible a usar, para una determinada pérdida de calor y temperatura de greso de aire caliente los cuales se irán determinan o a medida que se ejecuta los estudio de selección de quemador y dimensionamiento térmico del horno.

Co respecto al a ali is a realizar, con la gunda ley e la termodinamica, por conveniencia del estudio, primero realizaremos '

los cálculos de pérdida de calor por las paredes, haciendo cálculos de transferencia de calor.

TABLA 3.9.a

QN = 267,259.2 Kcal/HR		TG = 1550 °C				
QP = 100,222.2 Kcal/HR		%C = 60 %				
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	738.27	2432.32	2557.83	175.37	2382.45	125.50
250	510.29	1681.22	1767.97	233.65	1534.32	86.75
350	387.79	1277.62	1343.54	277.63	1065.92	65.92
450	311.30	1025.61	1078.54	318.32	760.22	52.92
550	259.14	853.76	897.81	360.68	537.12	41.05
650	221.25	728.93	766.55	408.46	358.09	37.61
750	192.60	634.54	667.28	465.30	201.98	32.21
850	170.18	560.67	589.60	536.37	53.22	28.93
950	152.21	501.47	527.35	629.48	-102.13	25.87
1050	137.51	453.06	476.43	758.41	-281.97	23.38

\*\*

- TS = Temperatura del aire calentado ( °C )
- NC = Número de moles por hora de combustible ( N°/HR )
- MA = Masa de aire calentado por hora ( KGR/HR )
- MG = Masa de gas total por hora ( KGR/HR )
- MR = Masa de gas por recuperador ( KGR/HR )
- MC = Masa de gas que sale por chimenea ( KGR/HR )
- MO = Masa de combustible quemado por hora ( KGR/HR )

TABLA 3.9.b

QN = 283.962.9 Kcal/HR		TG = 1550 °C				
QP = 116,925.9 Kcal/HR		% = 70 %				
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	784.42	2584.33	2717.69	186.33	2531.36	133.35
250	542.19	1786.30	1878.47	248.26	1630.21	92.17
350	330.76	1089.72	1145.95	338.21	807.73	70.04
450	412.03	1357.47	1427.51	294.98	1132.54	56.23
550	275.33	907.12	953.92	383.22	570.68	46.81
650	235.08	774.50	814.46	433.98	380.48	39.96
750	204.64	674.20	708.99	444.38	214.61	34.79
850	180.81	595.81	626.45	569.89	56.55	30.79
950	161.72	532.81	560.31	668.83	-108.52	27.49
1050	146.11	481.37	506.22	805.81	-299.60	24.83

Ver \*\*

TABLA 3.9.c

TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	830.56	2736.56	2877.55	197.30	2680.26	141.19
250	574.08	1891.37	1988.97	262.86	1726.11	97.59
350	436.27	1437.32	1511.49	312.33	1199.15	74.16
450	350.21	1153.82	1213.36	358.11	855.25	59.54
550	291.53	960.48	1010.04	405.77	604.27	49.56
650	248.91	820.06	862.37	459.51	402.86	42.31
750	216.68	713.86	750.70	523.46	227.23	36.83
850	191.45	630.75	663.30	603.42	59.87	32.55
950	171.23	564.15	593.26	708.17	-114.90	29.11
1050	154.70	509.69	535.99	853.21	-317.22	26.30

Ver \*\*

TABLA 3.9.a

QN = 317,370.3 Kcal/HR		TG = 1550 °C				
QP = 150,333.3 Kcal/HR		% = 90 %				
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	876.70	2888.38	3037.42	208.25	2829.16	149.04
250	605.97	1991.45	2099.46	277.46	1822.00	103.02
350	460.50	1517.17	1595.46	329.68	1265.77	78.29
450	369.67	1217.92	1280.76	378.00	902.76	62.84
550	307.73	1013.84	1066.15	428.31	637.84	52.31
650	262.74	865.61	910.28	485.04	425.24	44.66
750	228.71	753.52	792.40	552.55	239.85	38.88
850	202.09	665.79	700.15	636.94	63.20	34.35
950	180.75	595.49	626.22	747.51	-121.29	30.73
1050	163.30	538.00	565.77	900.62	-334.84	27.76

TABLA 3.9.e

QN = 334,074 Kcal/HR		TG = 1550 °C				
QP = 167,037 Kcal/HR		% = 100 %				
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	992.84	3084.39	3197.28	219.21	2978.07	156.88
250	637.87	2101.53	2209.96	292.06	1917.90	108.44
350	484.74	1597.02	1679.43	347.03	1332.39	82.41
450	389.13	1282.02	1348.17	397.90	950.27	66.15
550	323.92	1067.20	1122.26	450.85	671.41	55.07
650	276.57	911.17	958.19	510.57	447.62	47.02
750	240.75	793.18	834.11	581.63	252.48	40.93
850	212.72	700.83	737.00	670.47	66.53	36.16
950	190.26	626.84	659.18	786.86	-127.67	32.24
1050	171.89,	566.32	595.55	948.02	-352.47	29.22

Ver \*\* \*



TABLA 3.9.f

QN = 267,259.2 Kcal/HR		TG = 1650°C				
QP = 100,222.2 Kcal/HR		% = 60 %				
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	1077.87	3551.14	3734.38	237.48	3496.89	183.24
250	652.36	2149.27	2260.17	275.73	1984.43	110.90
350	464.69	1530.98	1609.98	305.39	1304.59	79.00
450	358.99	1182.74	1243.77	334.74	909.03	61.03
550	291.36	959.91	1009.44	366.87	642.58	49.53
650	244.32	804.94	846.48	404.09	442.38	41.53
750	209.85	691.37	727.04	448.74	278.30	35.67
850	183.50	604.57	635.77	504.11	131.66	31.20
950	162.78	536.31	563.98	575.00	-11.02	27.67
1050	146.09	481.31	506.14	669.29	-163.15	24.83

TABLA 3.9.g

QN = 283,962.9 Kcal/HR		TG = 1650 °C				
QP = 116,925.9 Kcal/HR		% = 70 %				
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	1145.23	3373.09	3967.78	252.33	3715.45	194.69
250	693.13	2283.59	2401.43	292.97	2108.46	117.83
350	493.74	1626.67	1710.60	324.47	1386.13	83.94
450	381.43	1256.66	1321.51	355.66	965.85	64.84
550	309.57	1019.91	1072.53	389.80	682.74	52.63
650	259.59	855.25	899.38	429.35	470.03	44.13
750	222.96	734.58	772.48	476.79	295.69	37.90
850	194.97	642.36	675.50	535.62	139.88	33.15
950	172.96	569.83	599.23	610.93	-11.70	29.40
1050	155.22	511.39	537.77	711.12	-173.34	26.39

TABLA 3.9.h

QN = 300,666.6 Kcal/HR							TG = 1650 °C
QP = 133,629.6 Kcal/HR							% = 80 %
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO	
150	1212.60	3995.03	4201.18	267.17	3934.00	206.14	
250	733.90	2417.92	2542.69	310.20	2232.49	124.76	
350	522.78	1722.35	1811.22	343.56	1467.66	88.87	
450	403.86	1330.58	1399.24	376.58	1022.66	68.66	
550	327.78	1079.90	1135.62	412.73	722.89	55.72	
650	274.86	905.56	952.28	454.61	497.68	46.73	
750	236.08	777.79	817.92	504.84	313.09	40.13	
850	206.44	680.14	715.24	567.13	148.11	35.09	
950	183.13	603.35	634.48	646.87	-12.39	31.13	
1050	164.35	541.47	569.41	752.92	-183.53	27.94	

Ver \*\*

TABLA 3.9.i

QN = 317,370.3 Kcal/HR		TG = 1650 °C				
QP = 150,333.3 Kcal/HR		% = 90 %				
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	1279.97	4216.98	4434.57	282.01	4152.56	217.59
250	774.68	2552.25	2683.95	327.43	2356.51	131.69
350	551.82	1818.04	1911.85	362.65	1549.20	93.81
450	426.31	1404.51	1476.98	397.50	1079.47	72.47
550	345.99	1139.90	1198.71	435.65	763.06	58.82
650	290.13	955.87	1005.19	479.86	525.33	49.32
750	249.20	821.00	863.36	532.88	330.48	42.36
850	217.91	717.93	754.98	598.63	156.34	37.04
950	193.30	636.86	669.72	682.80	-13.08	32.86
1050	173.48	571.55	601.04	794.78	-193.74	29.49

Ver \*\*

TABLA 3.9.J

$Q_N = 334,074 \text{ Kcal/HR}$ <span style="float: right;"><math>TG = 1650^{\circ}\text{C}</math></span>						
$Q_P = 167,037 \text{ Kcal/HR}$ <span style="float: right;"><math>\% = 100 \%</math></span>						
TS	MC	MA	MG	MR	MC	MO
150	1347.33	4438.92	4667.97	296.86	4371.11	229.05
250	815.45	2686.58	2825.21	344.67	2480.54	138.63
350	580.87	1913.73	2012.47	381.73	1630.74	98.74
450	448.74	1478.43	1554.71	418.42	1136.29	76.28
550	364.19	1199.89	1261.80	458.58	803.22	61.91
650	305.40	1006.18	1058.09	505.12	552.98	51.92
750	262.31	864.21	908.80	560.93	347.87	44.59
850	229.38	755.72	794.71	630.14	164.57	38.99
950	203.48	670.38	704.97	718.74	-13.76	34.59
1050	182.61	601.63	632.68	836.61	-203.94	31.04

Ver x x

TABLA 3.9.k

QN = 267,254.2 Kcal/HR							TG = 1750 °C
QP = 100,222.2 Kcal/HR							% = 60 %
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO	
150	2011.86	6628.27	6970.28	413.06	6557.23	342.01	
250	907.28	2984.14	3143.38	355.86	2787.51	154.23	
350	580.97	1914.07	2012.84	352.61	1660.23	98.76	
450	424.65	1399.06	1471.26	363.63	1107.63	72.19	
550	333.17	1097.66	1154.30	382.69	771.61	56.64	
650	273.05	899.61	946.02	408.68	537.34	46.42	
750	230.70	760.06	799.28	442.09	357.20	39.22	
850	199.25	656.46	690.33	484.58	205.75	33.87	
950	175.06	576.74	606.50	538.99	67.52	29.76	
1050	155.89	513.62	540.12	610.00	-67.87	26.50	

TABLA 3.9.1

QN = 283,962.9		Kcal/ HR			TG = 1750 °C	
QP = 116,925.9		Kcal/HR			% = 70 %	
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	2137	7042.54	7405.93	438.88	6967.05	363.39
250	963.98	3175.96	3339.84	378.11	2961.73	163.88
350	617.28	2033.71	2138.64	374.64	1764.00	104.93
450	451.19	1486.51	1563.21	386.35	1176.86	76.70
550	353.99	1166.26	1226.44	406.60	819.83	60.18
650	290.12	955.83	1005.15	434.22	570.93	49.32
750	245.12	807.57	849.24	469.72	379.52	41.67
850	211.70	697.48	733.48	514.86	218.61	35.99
950	186.00	612.79	644.41	572.67	71.74	31.62
1050	165.64	545.72	573.88	648.12	-74.24	28.16

Ver \*\*

TABLA 3.9.n

QN = 300666.6 Kcal/HR				TG = 1750 °C		
QP = 133,629.6 Kcal!HR				% = 80 %		
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	2263.34	7456.80	7841.57	464.69	7376.88	384.76
250	1020.69	3362.78	3536.30	400.35	3135.95	173.52
350	653.59	2153.34	2264.45	396.68	1867.76	111.11
450	477.74	1573.75	1655.17	409.08	1246.08	81.21
550	374.81	1234.86	1298.58	430.52	868.06	63.72
650	307.19	1012.06	1064.28	459.77	604.51	52.22
750	259.54	855.07	899.20	497.35	401.85	44.12
850	224.16	738.51	776.62	545.15	231.47	38.11
950	196.93	648.84	682.32	606.36	75.96	33.48
1050	175.38	577.83	607.64	686.25	-78.61	29.81



TABLA 3.9.n

QN = 317,370.3 Kcal/HR		TG = 1750 °C				
QP = 150,333.3 Kcal/HR		% = 90 %				
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	2389.08	7871.07	8277.22	490.51	7786.71	406.14
250	1077.40	3549.60	3732.76	422.59	3310.17	183.16
350	689.91	2272.97	2390.25	418.72	1971.53	117.29
450	504.28	1661.39	1747.12	431.81	1315.31	85.72
550	395.63	1303.47	1370.73	454.44	916.29	67.26
650	324.25	1068.28	1123.41	485.31	638.10	55.12
750	273.96	902.58	949.15	524.98	244.17	46.57
850	236.61	779.54	819.76	575.44	244.33	40.22
950	207.88	684.88	720.22	640.04	80.18	35.33
1050	185.13	609.93	641.40	724.28	-82.97	31.47

Ver \*\*

TABLA 3.9.0

QN = 334,074 Kcal/HR		TG = 1750 °C				
QP = 167,037 Kcal/HR		% = 100 %				
TS	NC	MA	MG	MR	MC	MO
150	2514.82	8285.34	8712.86	516.32	8196.53	427.52
250	1134.10	3736.42	3929.22	444.83	3484.39	192.80
350	726.22	2392.60	2516.05	440.76	2075.29	123.46
450	530.82	1748.83	1839.07	454.53	1384.54	90.24
550	416.46	1372.07	1442.87	478.35	964.51	70.80
650	341.32	1124.51	1182.54	510.85	671.68	58.02
750	288.38	950.08	999.11	552.61	446.50	49.02
850	249.06	820.57	862.91	605.72	257.19	42.34
950	218.82	720.93	758.13	673.73	84.40	37.20
1050	194.87	642.03	675.16	762.50	-87.34	33.13

### 3.4 Selección del Quemador

Para el tipo de combustible a quemar que en este caso, es el petróleo, se hará la descripción de las características del petróleo. Seguidamente se mencionará los requisitos para que un quemador cumpla bien su función en los hornos de fundición de vidrio, posteriormente se hará mención de algunos tipos de quemadores, incluyendo los nacionales. Y finalmente de acuerdo a los valores obtenidos en los cálculos termodinámicos y a las descripciones realizadas se podrá hacer la selección adecuada.

#### 3.4.1 Características de los Petróleos

Los petróleos son hidrocarburos que quedan después de los productos más ligeros y más volátiles. Así mismo los petróleos tienen una mezcla de hidrocarburos parafínicos tales como el cetano ( $C_{16}H_{35}$ ) y de hidrocarburos Alifáticos-Naftaleno, lo cual conlleva a considerar a los petróleos como hidrocarburo promedio al  $C_{12}H_{26}$ .

Las propiedades de los petróleos fueron escritas en la tabla (3.6) del párrafo 3.3.3.2, los cuales proporcionan datos sobre la viscosidad al medio ambiente; temperatura de precalentamiento de bombeo y temperatura de la llama adiabática que son datos importantes para el diseño o selección de un quemador.

Como información adicional de mucha importancia se proporcionará gráficos de la densidad vs (Kcal-litro) ó (Kcal-kg) fig. (3.9).

Así mismo un gráfico de la variación de la viscosidad (Seg-Sybolt) vs Temperatura  $^{\circ}C$  ver figura (3.10)

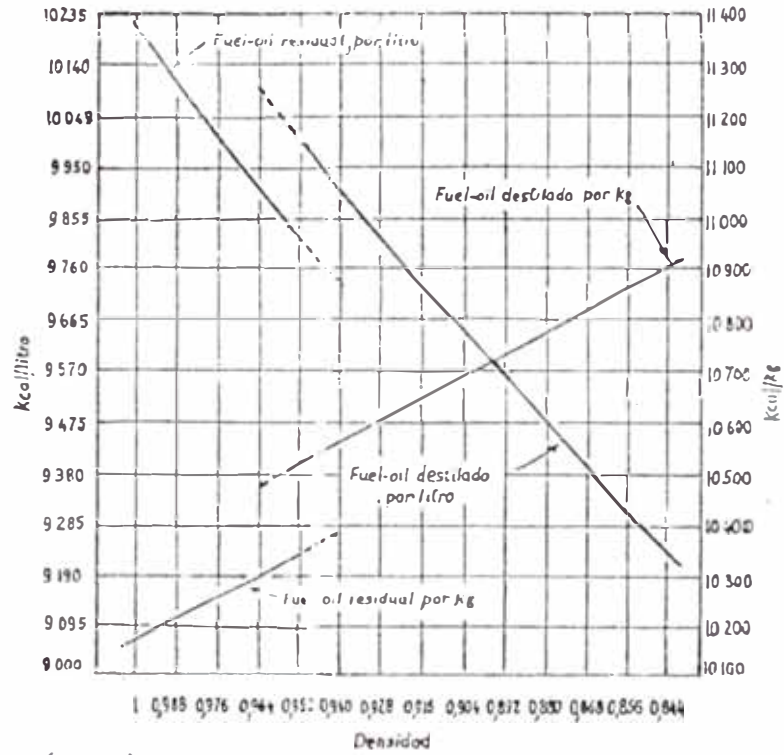


Figura (3.09) Relación aproximada entre la densidad y las Kcal/Litro.

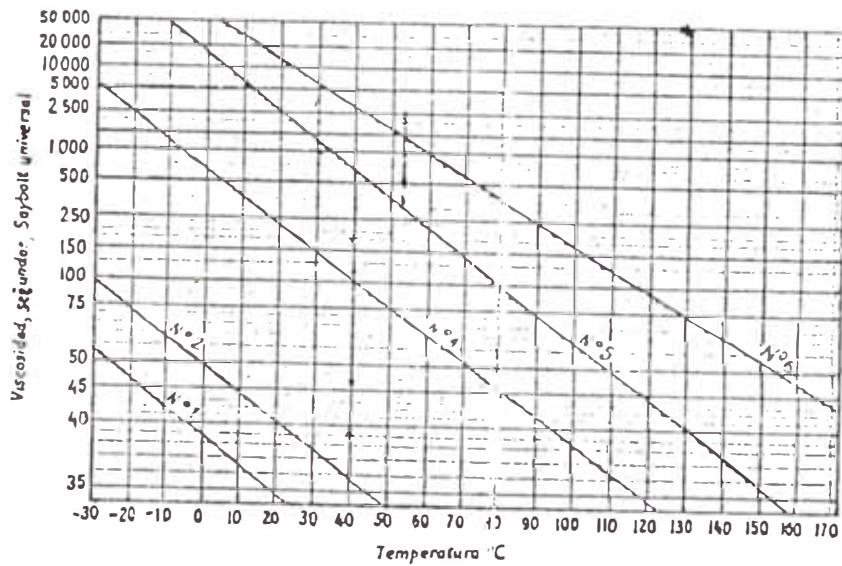


Figura (3.10) Relación típica Temperatura-Viscosidad

Tambien se proporcionará un gráfico de variación de la llama a diabática para diferentes temperaturas de aire precalentado. Ver Figura (3.11) y Figura (3.12).

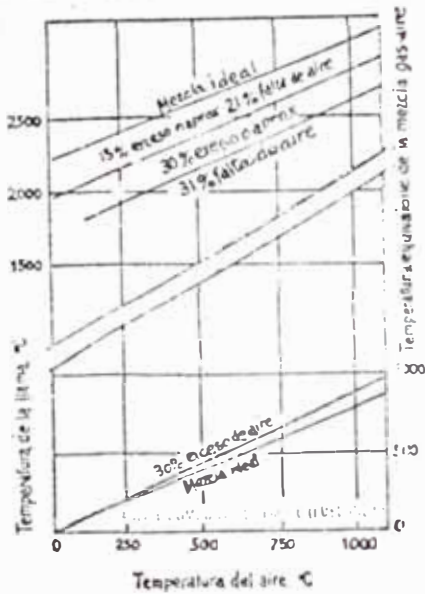


Figura (3.11) Temperatura aire

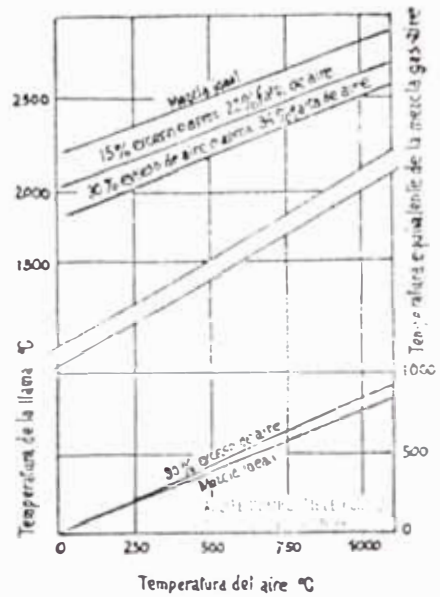


Figura (3.12) Temperatura aire para fuel 2

Estos cuatro gráficos últimos son muchos más importantes para diseño, que para selección. Sin embargo hacemos mención de ello para tener una idea más clara en la selección del quemador.

Otro aspecto importante de las características; es el grado de disociación que tienen los combustibles; ya que estos aumentan a medida que la temperatura de la llama adiabática crece. En caso del petróleo podemos hacer un cuadro que a continuación figura en la tabla (3.10).

Como podrá observarse en este último cuadro tendremos que considerar que temperatura de llama es la más conveniente para tener un

buen trabajo del combustible. Esto involucra hacer un adecuado calentamiento del aire; lo cual en los cálculos termodinámicos realizados para nuestro horno, va a permitirnos con ayuda de la tablas de temperatura de llama adiabática, determinar la temperatura de aire para el horno a diseñar que más convenga.

Debido a la disociación, hay una gran pérdida de calor, ya que los productos disociados se comportan endotérmicamente.

TABLA 3.10

% DE DISOCIACION Y TEMPERATURA DE LLAMA

Temperatura °K	Disociación %
1500	0.07
1900	1.65
2000	3.00
2500	16.00
3000	27.00
3200	65.00

#### 3.4.2 Requisitos de un buen Quemador para la Fundición de Vidrio

En esta sección haremos una pequeña reseña de subdivisión y combustión del petróleo.

##### 3.4.2.1 Requisitos Físicos

- Buenas propiedades de dirección.
- Tamaño físico pequeño.
- Normalmente de fácil diseño y montaje
- Habilitado para resistir las condiciones de operación en la

fundición de vidrio en forma muy razonable.

#### 3.4.2.2 Requisito de Operación

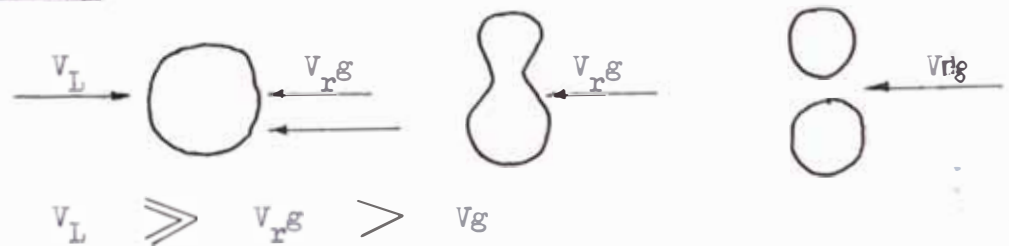
- Rápida evaporación, que se alcanza obteniendo una superficie muy grande para una cantidad de combustible.
- El quemador debe permitir alcanzar una temperatura uniforme en el horno, es decir que el combustible debe quemarse a casi lo largo del horno.
- El quemador debe proporcionarse una atmósfera controlada y uniforme.
- Otro factor importante en la vaporización del petróleo es la temperatura de la superficie de las gotas, ya que esta aumenta la tensión de vapor. La temperatura alta de la superficie de gota se produce por la alta temperatura del petróleo o del aire caliente circundante.
- Como último factor es la buena mezcla de las gotitas de petróleo con el aire. Aquí podemos hacer mención de que la combustión rápida no se produce instantemente a causa de la dimensión de las moléculas de petróleo. La molécula de petróleo aquí considerada es el  $C_{12}H_{26}$ , la cual necesita de (18.5 @ 2.3), moléculas de  $O_2$  para conseguir una combustión perfecta. La posibilidad de que una molécula de petróleo alcance a una molécula de aire con la temperatura de ignición, es casi nula. El calor incrementa la velocidad de desplazamiento y entonces las moléculas inestables se craquean en pequeñas moléculas dando de esta manera una mayor posibilidad de encontrarse con moléculas de  $O_2$ .

#### 3.4.2.3 Subdivisión

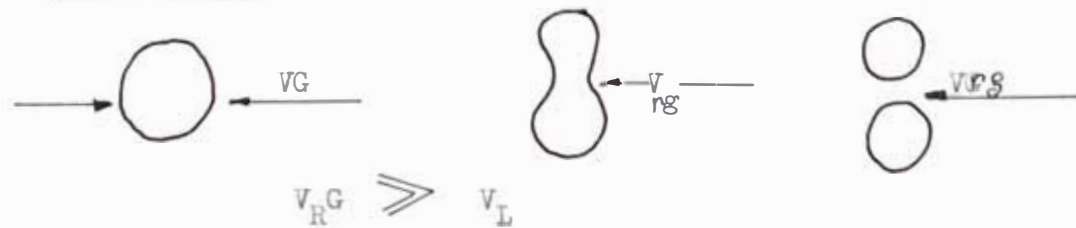
Como se menciono anteriormente la subdivisión del petróleo en partículas diminutas es un requisito previo para conseguir una combustión rápida. El proceso de producción de niebla de petróleo se conoce con el nombre de atomización, aunque incluso lagota más pequeña contenga miles de moléculas y aproximadamente 35 veces más átomos. El nombre más adecuado debería ser nebulización.

La atomización se produce al fluir una corriente muy delgada de un líquido a gran velocidad através de un gas y, reciprocamente, la atomización también se produce cuando se sopla un gas contra una corriente muy fina de liquido. Ver la figura (3.13) que aparece a continuación.

Primer Caso



Segundo Caso



Como podrá observarse en el primer, caso que es el de los quemadores, la velocidad relativa del gas ( $V_{RG} = V_L - V_G$ ) resulta ser más pequeña que la del líquido.

Mientras que en el segundo caso la velocidad relativa del gas es ( $V_{RG} = V_L + V_G$ ) que resulta mucho mayor que la velocidad de  $V_L$ .

Lo que permite realmente la subdivisión de la partículas del com



bustible es el tamaño de las moléculas del  $O_2$  y la alta velocidad que tendría el  $O_2$ .

Pero sin embargo hacer un quemador con las características del segundo caso de la figura (3-13), es un poco imposible; por lo que generalmente se opta es hacer que la dirección del flujo de aire tome una inclinación con respecto al flujo del combustible para obtener una buena subdivisión, como se pretendiera tener en ellas (1), que es imposible por la baja velocidad relativa del gas.

#### 3.4.2.4 Combustible

El petróleo atomizado alcanza la temperatura de ignición en la cámara refractaria del quemador o en el interior del horno. El esquema de la figura (3.14) explica lo que ocurre en la cámara refractaria del quemador.

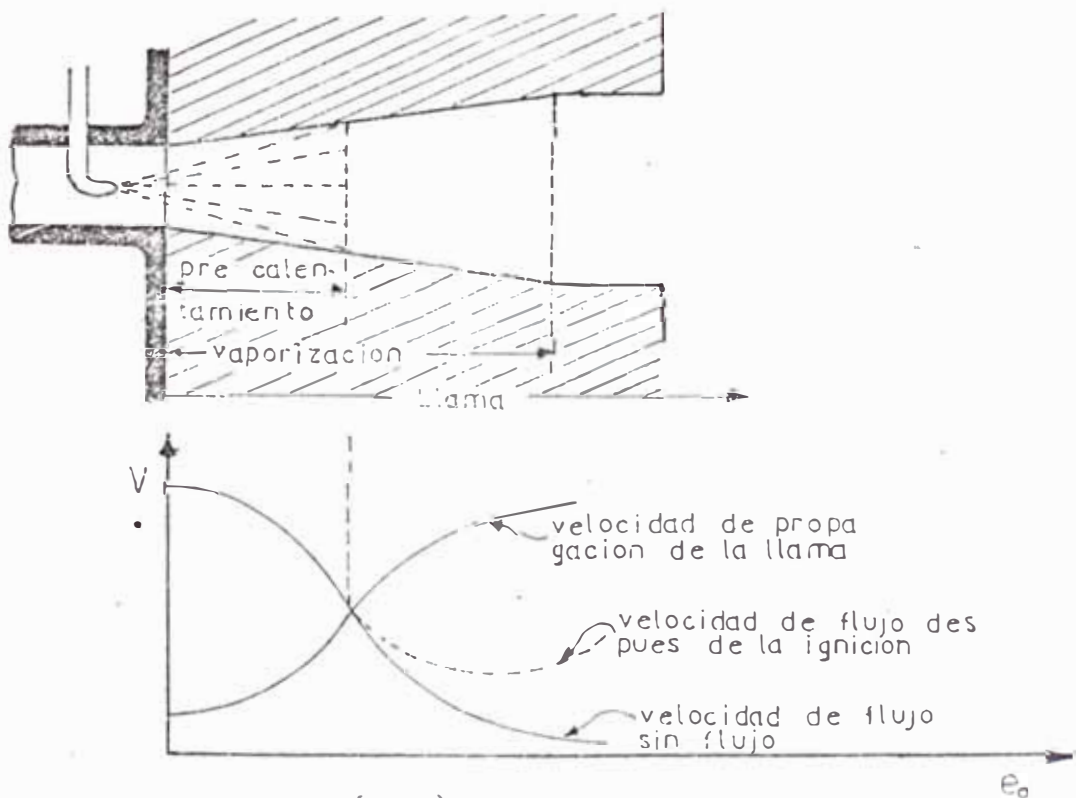
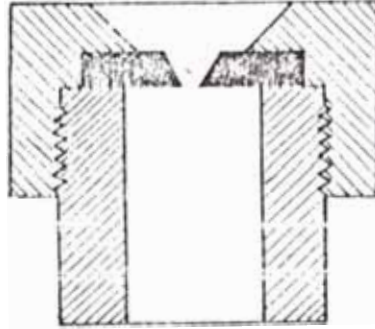


Fig.(3.14) Comportamiento de la llama de acuerdo a su longitud y velocidad.

producido por este atomizador es del tipo conico. Se puede obtener un cono más amplio dando un movimiento de rotación al petróleo, inmediatamente antes de entrar en el orificio, Ver figura (3.16).



Fig(3.15) Atomizador con un simple orificio en la placa plana.

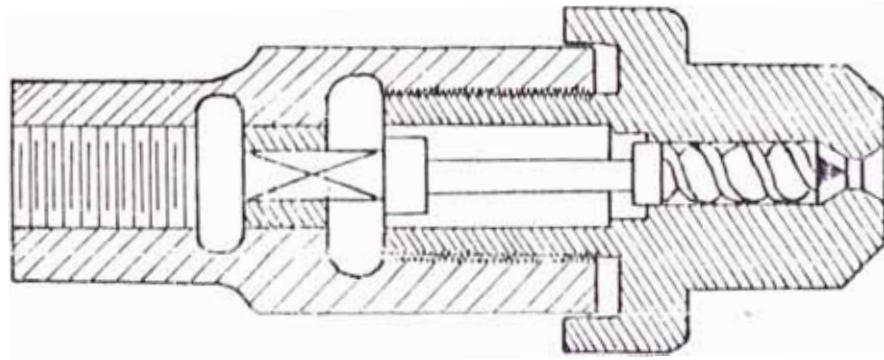


Fig (3.16) Pulverizador centrífugo a producir chorro pulverizado en forma de cono.

Las características principales de atomizadores son las siguientes:

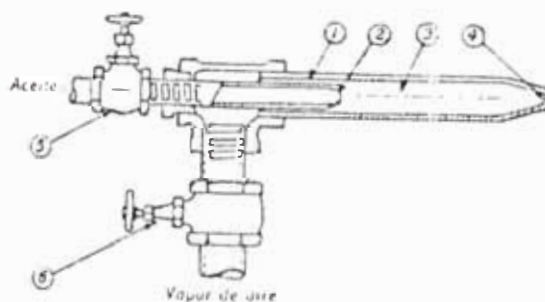
- Bajo costo de operación, desde que no se requiera un atomizador medio.

- Escasas propiedades direccionales.
- Son poco adecuados para soportar las condiciones de un horno de fundición, debido a que la reradiación produce taponamientos de carbón en el ó los orificios de este tipo de atomizador.

### 3.4.3.2 Atomización por Corrientes Rápidas

Estos atomizadores tienen como principio de funcionamiento, el método, en el cuál la velocidad relativa entre el gas (aire) y líquido (petróleo) se produce en un medio gaseoso, en este caso aire. Para impartir velocidad a los medios gaseosos atomizados se emplea dos amplias gamas de presión. Las presiones elevadas oscilan en 4.2 y 8.75 kg/cm<sup>2</sup>. Las presiones bajas entre 0.08 y 0.14 kg/cm<sup>2</sup>.

En la figura (3.17) un atomizador simple de alta presión. El aire comprimido fluye a través de una cámara anular (1) y forma una emulsión con el petróleo que circula por la tobera (2). La presión en el espacio (3) se determina por el flujo hacia adentro a través de las válvulas (5) y (6) por el flujo hacia afuera, a través de la tobera (4). Más allá de la tobera (2), se realiza una parte de la atomización cuando son diferentes la velocidad del petróleo y del aire.



Fig(3.17) Atomizador simple de alta presión.

Las velocidades de mezcla ya elevada en el espacio(3) se incrementa por la caída de presión a través de (4). Más allá de (4), la mezcla que fluye rápidamente choca con el aire de combustión que se desplaza lentamente.

La atomización, evaporación, craqueado, ignición y combustión, se efectúan en una rápida sucesión, casi simultáneamente. Estos quemadores son generalmente usados en hornos con regeneración ó recuperación.

En el mezclado y en la atomización en dos etapas de aire caliente a presión, controladas en forma evidente, se muestra en la figura (3.18). En este atomizador, usado para petróleo pesados, lo emulsiona a este en el borde de una esfera y finalmente lo atomiza con aire en dirección radial.

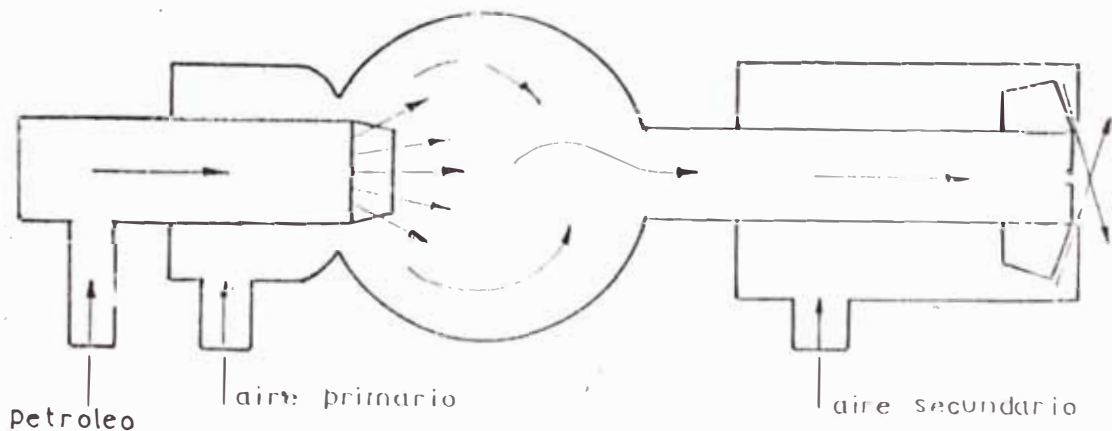


Fig (3.18) Quemador de petróleo con atomización en dos etapas por medio de aire caliente.

La presión del aire primario (mezclado es de  $4.2 @ 4.9 \text{ kg/cm}^2$ ). La presión del aire secundario de atomización, varía entre  $1.05 @ 2.8 \text{ kg/cm}^2$  dependiendo de la velocidad de calentamiento.

Los atomizadores de corriente rápida tienen las siguientes ca -

racterísticas:

- Presión de aire atomizador, generalmente entre  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  @  $5.6 \text{ kg/cm}^2$ .
- Buenas propiedades direccionales de la mezcla.
- Normalmente simple en diseño y mantenimiento.

Como alternativa de selección; APIN, muestra el siguiente diseño figura (3.19); con características de funcionamiento siguiente.

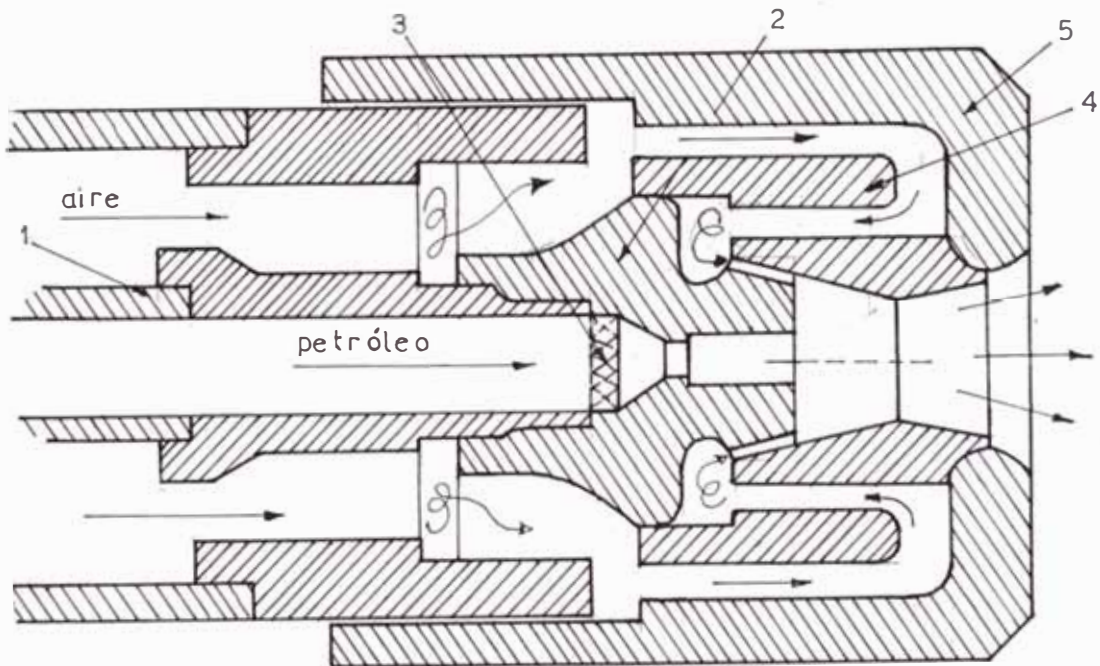


Fig. (3.19) Quemador APIN

El petróleo pasa a través del tubo de petróleo, hasta el plato de presión, el cual crea una caída de presión y distribuye el petróleo en cada una de las agujeros de alrededor en el torbillinador (2)

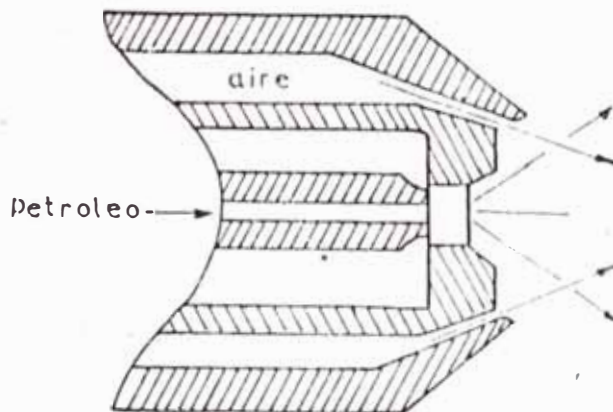
El aire de atomización pasa a lo largo de un agujero anular del barrel del quemador (5) y rodeando el frente del inyector entre la tapa boquilla y el estrangulador (4) esto provee enfriamiento interno a los componentes del inyector. El aire pasa regresando entonces a través del estrangulador dentro de un espacio entre este y el torbillinador (3) donde se expande atravesando una presión crítica ba-

jando a lo largo de unas ranuras en espiral. La alta velocidad con la cual este aire emerge desde esas ranuras, difundiendo el petróleo a través de la cara frontal del torbillinador (2) y cortando la corriente de petróleo en pequeñas partículas. La mezcla se expande otra vez, a una presión crítica, bajando a través del venturi-torneado; donde la restricción de las partículas toman lugar para asegurar una buena distribución a través del cono esparzor.

Estos atomizadores son fáciles de mantener y de montar y desmontar. Por lo que da una gran posibilidad de ser usados en los hornos de vidrio. Su mayor restricción es el de usar aire bastante caliente, ya que estos tienen componentes que son refrigerados por aire.

#### 3.4.3.3 Atomizadores a baja presión

La mayoría de los atomizadores de baja presión, siguen los principios mostrados en la fig(3.20).



Fig(3.20) Atomizador de baja presión.

El cilindro interior es ajustable, de modo que con la reducción mínima puede mantenerse manualmente la velocidad del aire en el orificio del quemador. Las características de este tipo de quemador son las siguientes:

- Bajo costo de operación
- Buenas propiedades de dirección, debido a un largo momento de

derivación.

- Son de tamaño largo, lo que hace que estén expuestos a radiación y tienen dificultades para ser manejados, para propósito, de mantenimiento.
- Introduce mucho aire frío al horno. Porque usualmente se necesita un 15% del aire total de combustión, para la atomización.

#### 3.4.4 Selección del quemador

Aquí expondremos algunas razones que nos permitirán determinar; el tipo de combustible a usar, el tipo de quemador, la temperatura del aire y la cantidad de calor necesario para fundir el vidrio, y la cantidad de calor perdido por las paredes del horno; este último expresado en rango, ya que todavía no se ha podido determinar en una forma concreta las pérdidas de calor.

El tipo de petróleo a usar, va ser el diesel N° 2, debido a que se tendría que hacer un pedido especial, si el combustible fuera el diesel N° 6, habría que diseñarse un calentador de petróleo; Así mismo, este último tipo de petróleo, contiene mucho azufre lo cual es perjudicial para la fundición de vidrio. Y otro de los motivos es la fabricación de estos quemadores para petroleos pesados, en el país no han sido plenamente desarrollados.

El tipo de quemador a usar, más recomendable es, el de media presión, es decir los de corriente rápida; ya que se adaptan mejor a los requisitos físicos y de operación en los hornos para fundir el vidrio.

De acuerdo a la tabla (3.10), donde se muestra la temperatura de la llama adiabática vs, la disociación, eligiéremos una temperatu-

ra de llama (2,000 °C a 2,300 °C), donde la disociación es aproximadamente, tal como se muestra en la tabla (3.11).

TABLA 3.11

Temperatura °C	Disociación
2,000	3 %
2,200	8 %

De acuerdo a esta tabla y a la figura (3.12), dada en la sección 3.4.1; observamos que, para una llama adiabática a temperatura de 2,000 °C y para un exeso de aire en 30%, el aire que se tendrá que introducir en el horno, tendrá que tener una temperatura de 250 °C; y para una temperatura de llama adiabática de 2,200°C, tendría-se que introducir el aire al horno a una temperatura de 500°C. Lógicamente, para seleccionarse la temperatura de aire, y la temperatura de la llama adiabática; nos inclinaremos a usar los últimos valores de la tabla (3.11). Ya que a esas condiciones, obtenemos un mayor ahorro de combustible, con un porcentaje de disociación relativamente pequeña del CO<sub>2</sub>.

Por lo anteriormente expuesto haremos una tabla de resumen, tabla (3.12); donde se proporcionará las características de funcionamiento y el tipo de inyector a usar en este horno a diseñar.

### 3.5 Dimensionamiento Termico del Horno

En esta sección antes de dimensionar el horno se describirá las condiciones del horno seleccionado y sus partes, para posteriormente hacer los cálculos en base a un programa en Lenguaje Basic. Y de esta manera obtener los posibles hornos, que puedan fundir la



cantidad requerida de vidrio.

3.5.1 Horno Seleccionado

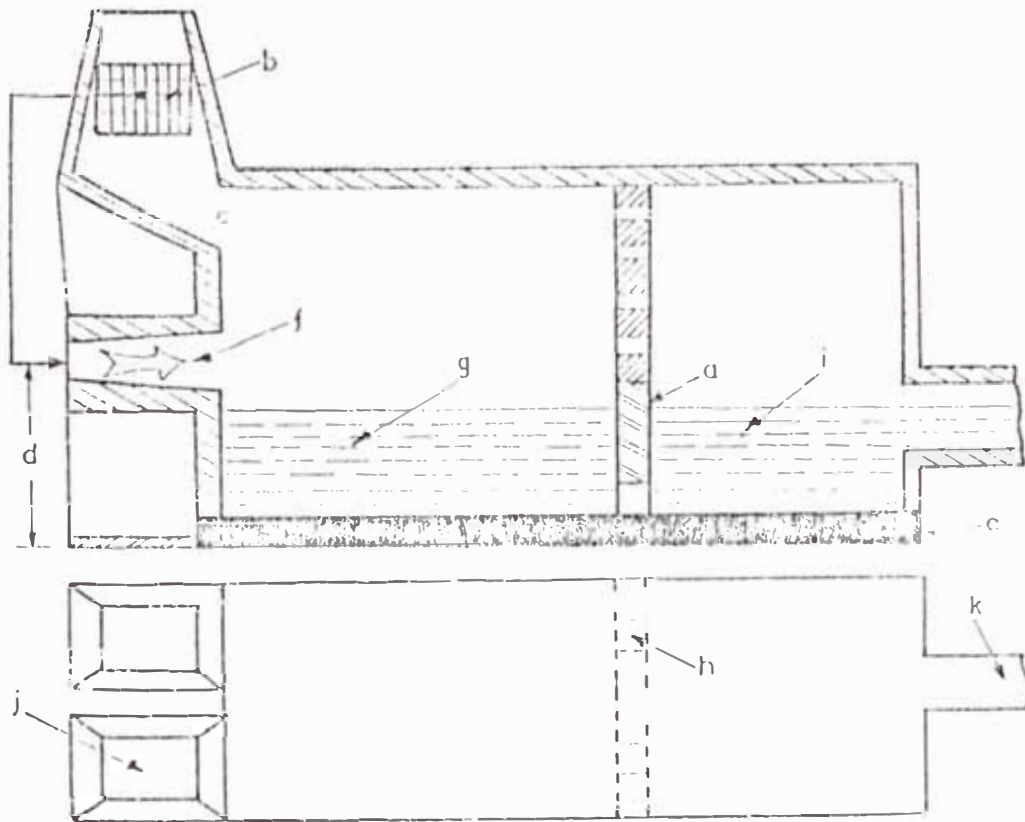
- Horno tipo cuba.
- Con sistema de Calentamiento de aire por recuperación
- Quemador a petróleo a media presión.
- Llama de longitud media.
- Temperatura de fusión del vidrio a 1450°C.
- Temperatura de aire de entrada a 500°C.
- Número de quemadores; dos con inversión de llama.
- Dos chimeneas.
- Dos recuperadores.
- Tres alimentadores.
- Con puente y pantalla.

TABLA 3.12

Descripción	Características	Unidad
Tipo de Petróleo	Diésel N° 2	Gal
Temperatura de llama	2,200	°C
Exeso de aire	30%	%
Temperatura de aire	500	°C
Viscosidad Petróleo	36	Saybol-seg
Flujo Combustible	17 a 20	GL/HR
Calor Perdido	100,222-167,037	Kcal/HR
Calor Necesario	267,254.2-334,074	Kcal/HR
Tipo de quemador	APIN APJ-3/AIRTEC QP-6M	EA *

\* Tipo de quemadores determinado por cálculo en sección 3.5.3.8

### 3.5.2 Esquema del Horno a Diseñar



#### 3.5.2.1 Descripción de las Partes

- a.- Puente
- b.- Recuperador
- c.- Toma de gases del recuperador
- d.- Altura del quemador
- e.- Solera
- f.- Hogar
- g.- Zona de vidrio de fundición
- h.- Garganta
- i.- Zona de vidrio fundido en trabajo
- j.- Chimenea
- k.- Alimentador

#### 3.5.2.2 Características de Funcionamiento

- Temperatura de la llama ( $2200^{\circ}\text{C}$ )

- Temperatura de la fusión congruente del vidrio  $1400^{\circ}\text{C}$
- Petróleo Diesel # 2
- Temperatura del aire al ingreso del quemador  $500^{\circ}\text{C}$
- % aproximado de  $\text{CO}_2$  \* en gases = 15.24 %
- % aproximado de  $\text{H}_2\text{O}$  \* en gases = 6.75 %
- % aproximado de  $\text{O}_2$  \* en gases = 5.08.%
- % aproximado de  $\text{N}_2$  \* en gases = 72.95 %

### 3.5.3 Factores y Simplificaciones a Considerar para el Cálculo de Dimensionamiento Térmico

- Para un volumen óptimo de horno, determinar el área de paredes y techo de mayor reradicación a la superficie de vidrio a fundir.

- Para facilitar los cálculos se considera la temperatura de los gases uniformemente variable y estable en cada punto.

- La configuración de la trayectoria del gas se va considerar como placa plana gris.

- Presión de los gases dentro del horno igual o ligeramente mayor que la presión atmosférica con la finalidad de que no hay fuga por las ventanas de enforaje; para esto se deberá hacer un cálculo adecuado de diseño de la chimenea.

- El vidrio fundido tanto en las zonas de fundición como en la zona de vidrio de trabajo realizan movimientos convectivos, esto es debido a que la densidad varía con la temperatura, aproximadamente como se indica en la tabla (3.13).

De acuerdo a lo anteriormente mencionado se supondrá que el vidrio sólido tendrá una transmisión netamente convectiva hasta alcanzar los  $1000^{\circ}\text{C}$  y que a partir de esta temperatura todo el vidrio de

la zona de fundición se le hará un tratamiento de transferencia de calor por radiación.

\* A continuación se elaborará las figuras (3.21) y (3.22). Donde se presenta el horno mostrado las idealizaciones planteadas y el circuito equivalente de transferencia de calor en el horno respectivamente.

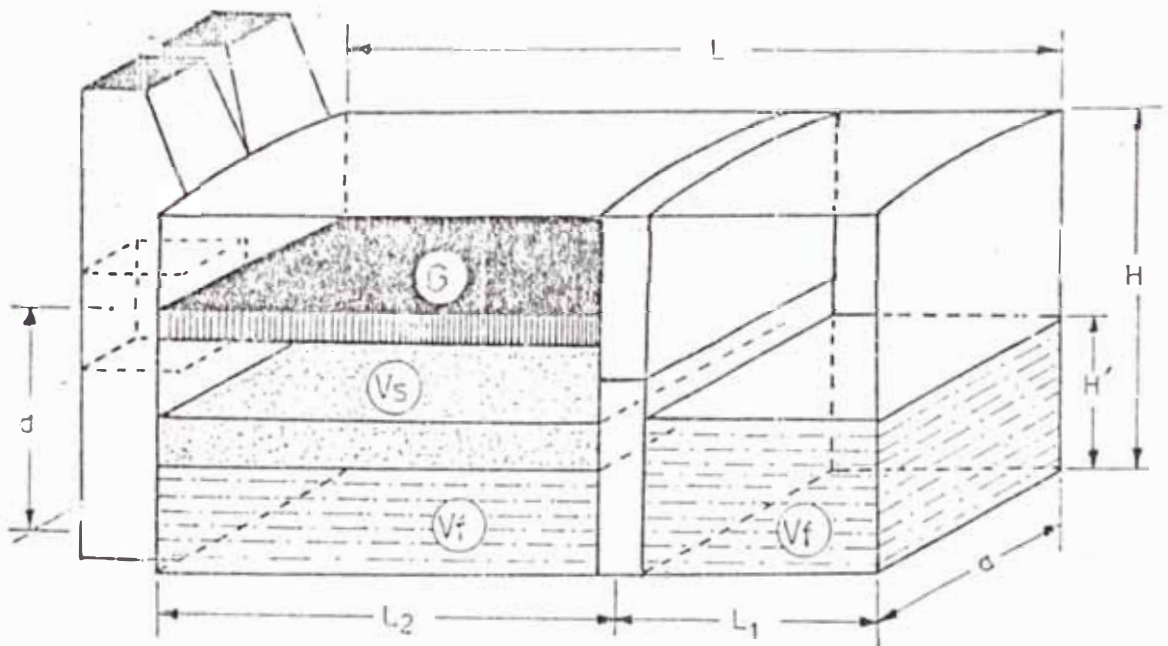


Fig (3.21)

### 3.5.3.1 Nomenclatura

- $H$  = Altura total del horno
- $H'$  = Altura del vidrio fundido
- $L$  = Longitud total del horno
- $G$  = Trayectoria de los gases
- $a$  = Altura del quemador y gas idealizado
- $L_1$  = Longitud de la zona del vidrio a fundir
- $L_2$  = Longitud del vidrio fundido para trabajo
- $a$  = Ancho del horno
- $V_s$  = Vidrio Sólido

- Vf = Vidrio Fundido a 1450 °C

3.5.3.2 Circuito Equivalente

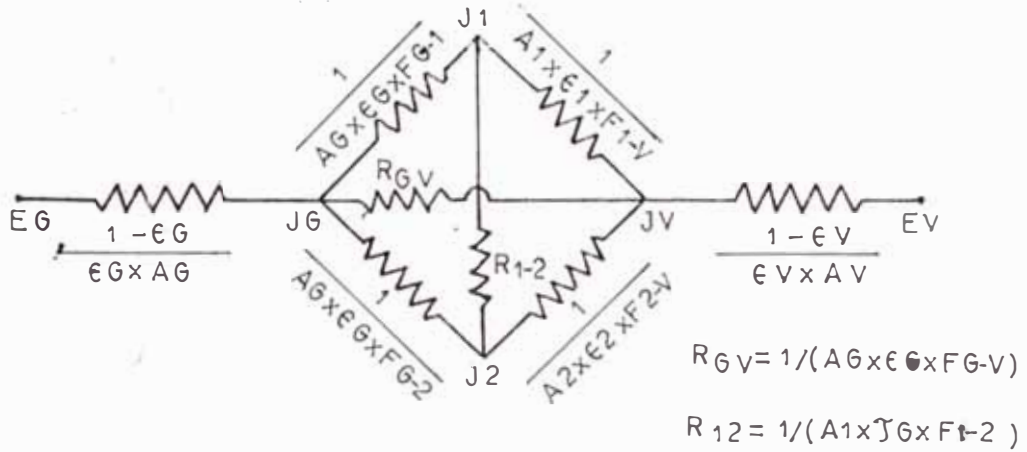


Fig (3.22)

En la figura anterior se observara lo siguiente con respecto a la transmisión de calor.

- La emisión de radiación de los gases, no se puede considerar como una transmisión de cuerpo gris y menos como de cuerpo negro, ' debido a que tiene una cierta transparencia a ciertos tipos de ondas tal como se muestra en la figura (3.23)

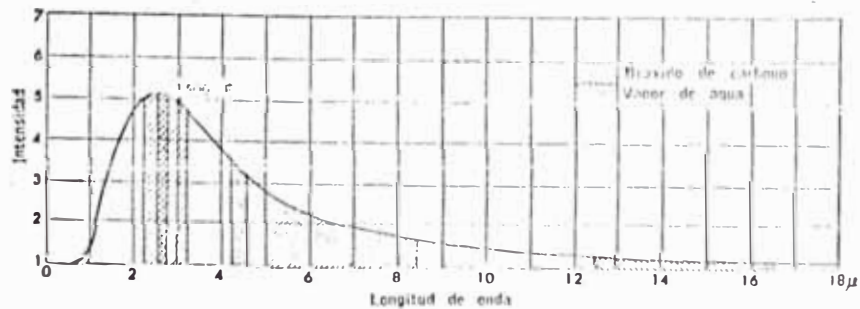


Fig (3.23)

Motivo por el cuál la idealización mostrada en la figura (3.21) donde la representación de la transmisión de calor por radiación de este horno idealizado, esta dado por el circuito eléctrico equivalente, tal como se muestra en la figura (3.22).

Donde:

$E_g$  = Poder de radiación como cuerpo negro del gas

$J_G$  = Poder de radiasidad del gas

$J_1$  = Poder de radiosidad del refractario superior

$J_2$  = Poder de radiosidad del refractario inferior

$A_G$  = Area idealizada del gas ( $CO_2$  % y  $H_2O$  %)

$\epsilon_G$  = Promedio ponderado de emisividad del gas  
( $CO_2$  % y  $H_2O$  %)

$A_1$  = Area del refractario superior

$A_2$  = Area del refractario inferior

$A_v$  = Area del vidrio

$\epsilon_1$  = Emisidad del refractario superior

$\epsilon_2$  = Emisidad del refractario inferior

$\epsilon_v$  = Emisividad del vidrio

$\tau_G$  = Transmisividad del gas

$F_{G-1}$  = Factor de forma desde el gas a 1

$F_{G-2}$  = Factor de forma desde el gas a 2

$F_{1-v}$  = Factor de forma desde el refractario 1-al vidrio

$F_{2-v}$  = Factor de forma desde el refractario 2 al vidrio

### 3.5.3.3 Datos para el Cálculo del

#### Dimensionamiento del Horno

Los datos que se proporcionan en esta sección es con la finalidad de tener información obtenida en cálculos anteriores tales como

% molar de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  en la combustión que a través de estos datos se podrá obtener la emisividad, promedio a determinadas temperaturas con el fin de evaluar la radiación. Para ello nos ayudaremos con los gráficos de emisividad de vapor  $\text{H}_2\text{O}$  vs Temp, emisividad de  $\text{CO}_2$  vs Temp, factor CP para corregir emisividad es vs (presión total + presión parcial)/2, este último en atmósferas, tanto del  $\text{CO}_2$  como del  $\text{H}_2\text{O}$ . Ver gráficos en las figuras (3.24); (3.25); (3.26); (3.27)

Así mismo, se proporcionará la presión atmosférica promedio del medio ambiente en la localidad de Huancayo y las diferentes temperaturas con las cuales ha sido calculado el consumo de combustible. Esto nos permitirá obtener una temperatura adecuada para la rapidez en la transmisión de calor.

A continuación, se proporcionará los datos que se mencionan y influyen en el cálculo del dimensionamiento teórico del horno.

$$\% \text{ Molar del } \text{CO}_2 = 9.94 \%$$

$$\% \text{ Molar del } \text{H}_2\text{O} = 10.81 \%$$

$$\text{Presión atmosférica} = 0.71 \text{ Atmosfera}$$

$$T_1 = \text{Temperatura promedio de gas} = 1550^\circ\text{C} = 2882^\circ\text{F} \quad **$$

$$T_2 = \text{Temperatura promedio de gas} = 1650^\circ\text{C} = 3002^\circ\text{F} \quad **$$

$$T_3 = \text{Temperatura promedio de gas} = 1750^\circ\text{C} = 3182^\circ\text{F} \quad **$$

\*\* Estas temperaturas se refieren a las empleadas en el cálculo de combustible. Ver sección (3.3.4.2) y (3.3.4.3)

De acuerdo a esta información y las gráficas mencionadas elaboraremos la tabla (3.14).

$$P_{\text{CO}_2} = 0.0994 * (Q_{71}) = 0.070574 \text{ presión parcial del } \text{CO}_2$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.1081 * (Q_{71}) = 0.076751 \text{ presión parcial del } \text{H}_2\text{O}$$

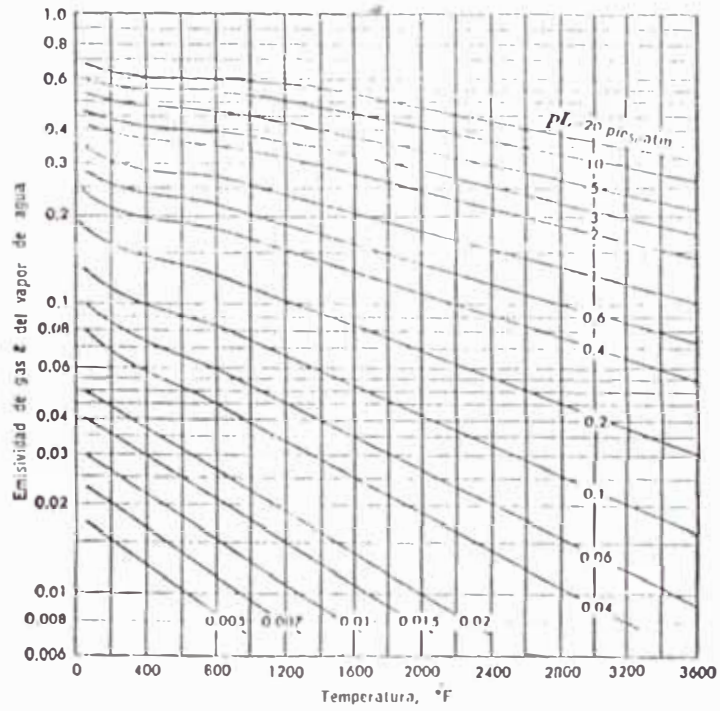


Fig (3.24) Emisividad del vapor de  $H_2O$  a 1 atmósfera de presión total y 0 de presión parcial.

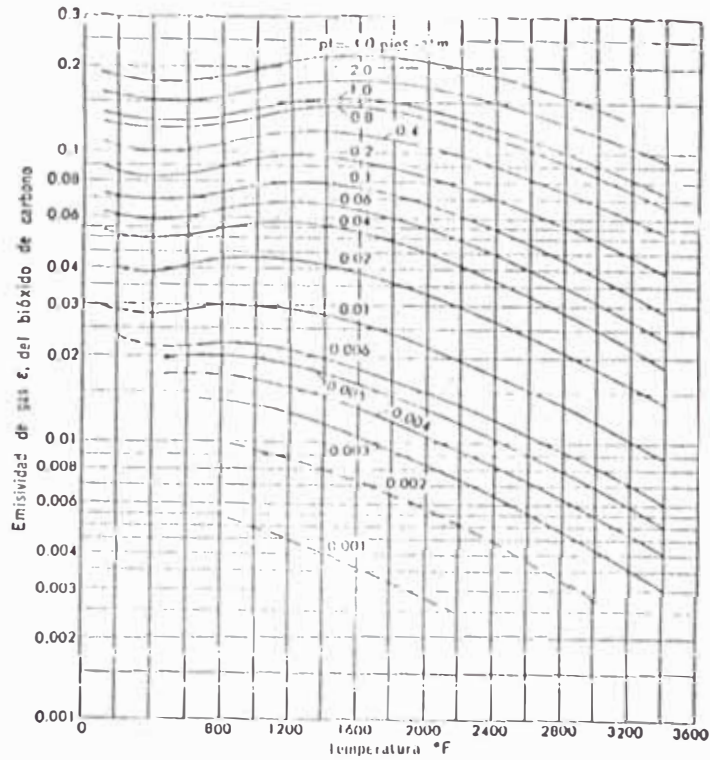


Fig (3.25) Emisividad del  $CO_2$  a 1 atmósfera de presión total y 0 de presión parcial.



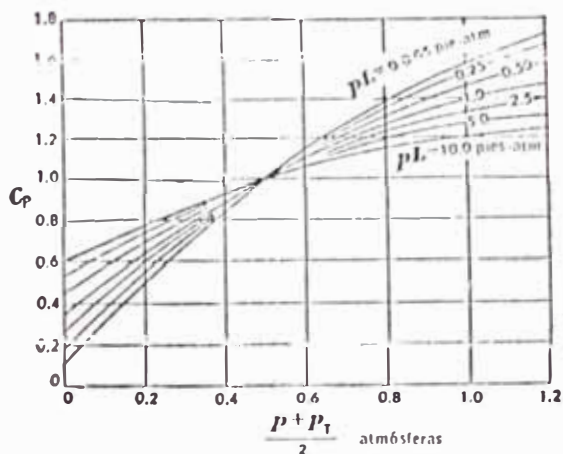


Fig (3.26) Factor  $C_p$  para corregir la emisividad del vapor a valores  $P$  y  $P_T$  diferentes de 0 y 1 atmósfera.

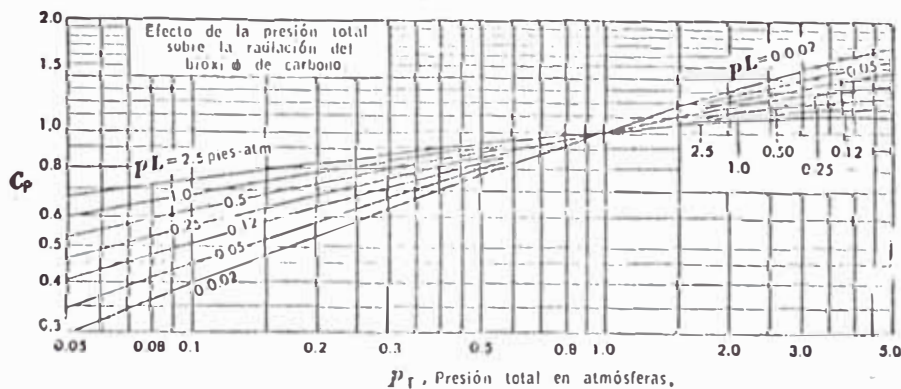


Fig (3.27) Factor  $C_p$  para corregir la emisividad del  $CO_2$  a valores  $P$  y  $P_T$  diferentes de 0 y 1 atmósfera.

$F = 2/3$  Factor para determinar la longitud equivalente e gases.

$C_p =$  Factor de emisividad del gas.

TABLA 3.14  
 EMISIVIDAD DEL CO<sub>2</sub> Y H<sub>2</sub>O A PRESION PARCIAL P · Y  
 A DISTANCIA L DEL GAS AL VIDRIO A FUNDIR

	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
L ·	3xF	3xF	4xF	4xF	5xF	5xF	6xF	6xF	6xF	6xF
TEMP GAS °F/°C	P(3xF) e xCP	P(3xF) e xCP	P(4xF) e xCP	P(4xF) e xCP	P(5xF) e xCP	P(5xF) e xCP	P(6xF) e xCP	P(6xF) e xCP	P(6xF) e xCP	P(6xF) e xCP
2822	0.14148	0.153502	0.188197	0.204669	0.23525	0.25584	0.28229	0.30700	0.30700	0.0548
1550	0.0400	0.0284	0.04293	0.0382	0.0492	0.0501	0.0546	0.0548	0.0548	0.0548
3002	0.14148	0.153502	0.188197	0.204669	0.23525	0.25584	0.28229	0.30700	0.30700	0.0484
1650	0.0360	0.0259	0.0389	0.0349	0.0451	0.0435	0.0504	0.0504	0.0504	0.0484
3182	0.14148	0.153502	0.188197	0.204669	0.23525	0.25584	0.28229	0.30700	0.30700	0.0440
1750	0.0304	0.0219	0.0318	0.0308	0.0394	0.0392	0.0437	0.0440	0.0440	0.0572
2642	0.14148	0.153502	0.188197	0.204669	0.23525	0.25584	0.28229	0.30700	0.30700	0.0572
1450	0.0460	0.0298	0.04682	0.03569	0.0516	0.0516	0.06048	0.06048	0.06048	0.0572
(PA + P)/2	0.390287	0.3933755	0.390287	0.3933755	0.390287	0.3933755	0.390287	0.3933755	0.390287	0.3933755
CP	0.80	0.81	0.81	0.83	0.82	0.87	0.84	0.88	0.88	0.88

3.5.3.4 Valores de Emisividad de los Refractarios y Vidrio

Estos valores tanto de los refractarios como del vidrio han sido obtenidos de ref. (Kreit-227-230). Para refractario usamos la figura (3.28) y tabla (3.15) y para el vidrio la tabla (3.16).

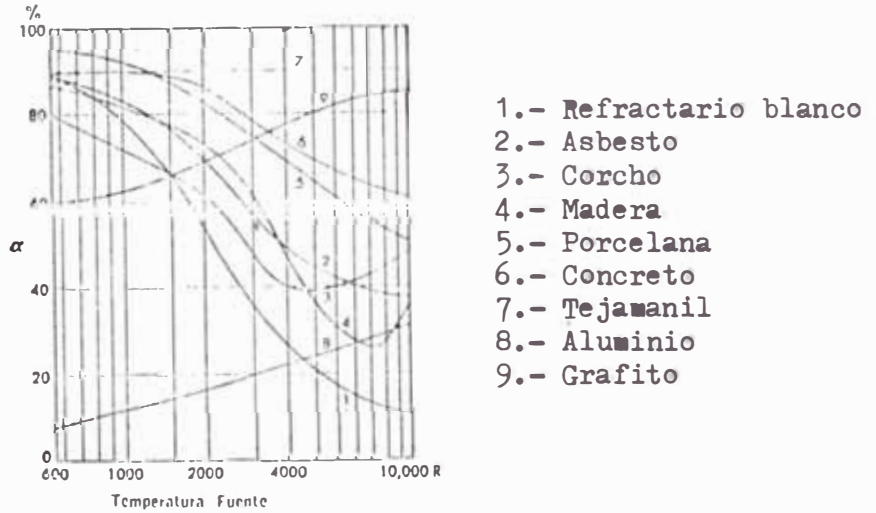


Fig (3.28) Emisividad del Refractario

TABLA 3.15

EMISIVIDAD REFRACTARIO

Temp (°F)	2500	2800	3000	3200
ε	0.35	0.32	0.30	0.23

TABLA 3.16

EMISIVIDAD DEL VIDRIO

Temp (°F)	100	500	1500	2000	2500	3000
ε <sub>v</sub>	0.90	0.90	0.90	0.89	0.88	0.87

3.5.3.5 Cálculo de las Dimensiones  
de la Sección de Fusión

Las consideraciones a tener en cuenta son las siguientes:

- El cálculo de la zona de fusión se hará independiente a la zona de trabajo.
- El valor del largo de la zona de fusión es 1.5 veces el ancho. Y cumple la siguiente relación experimental. Ver referencia R<sub>2</sub>

$$a = \sqrt{\frac{A_f}{1.5}}$$

DONDE:

a = ancho

A<sub>f</sub> = Area de fusión

- La determinación de la altura de la cámara de combustión respecto al nivel del vidrio fundido. Se determinará donde mejor el gas transmite calor; para ello se ubicará la cámara de combustión, en varios puntos; tal como se muestra a continuación.

$$a = 3/8H, 1/2H, 5/8H, 3/4H, 7/8H$$

- El circuito equivalente de la fig.(3.22); no es muy adecuado para la aplicación del gráfico de factores de forma, tal como aparece en la fig. (3.29).

Por tal motivo primero se considerará al circuito como si hubiera una radiación entre los gases, vidrio fundido y el techo del horno; tal como se muestra a continuación las fig. (3.30) y fig. (3.31)

Esto nos llevara hallar el producto factor forma x Area de gas como si el gas estuviera concentrado en el techo. Con tal motivo

usamos la curva #1 de la figura (3.29). Y la formula siguiente.

$$A F_{g-v} = 1 / (1/A_g \times (1/\epsilon_g - 1) + 1/A_v \times (1/\epsilon_v - 1) + 1/A_g \times F_{g-v})$$

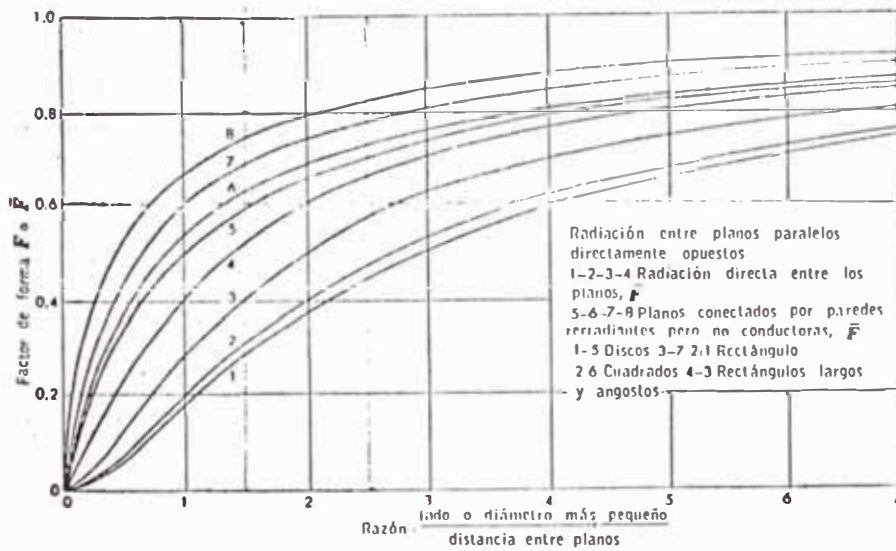


Fig. (3.29) Factores de Forma.

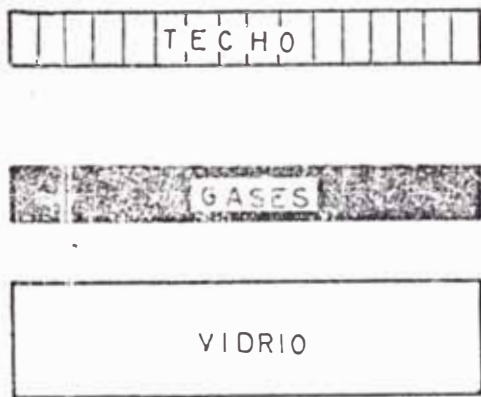


Fig.(3.30)

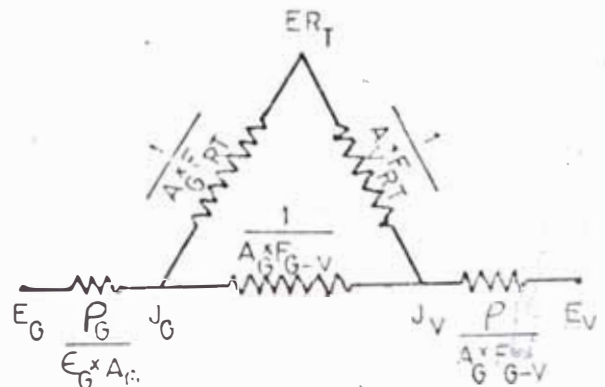


Fig.(3.31)

Con este artificio el esquema y la figura anterior se transformaran en el siguiente esquema y circuito. Ver fig.(3.32) y fig(3.33)

Esto también conlleva a hallar el producto Area-Factor de Forma (Area de Gas), con el gas pegado al techo y rodeado de refractarios.

Para efecto de cálculo usaremos la curva #2 de la figura, (3.29) y la siguiente formula.

$$\overline{A_g F_{g-v}} = A_g / (1/\epsilon_g - 1) + (1/\rho_{g-v} - 1) + (1/\overline{F_{g-v}})$$



Fig.(3.32)

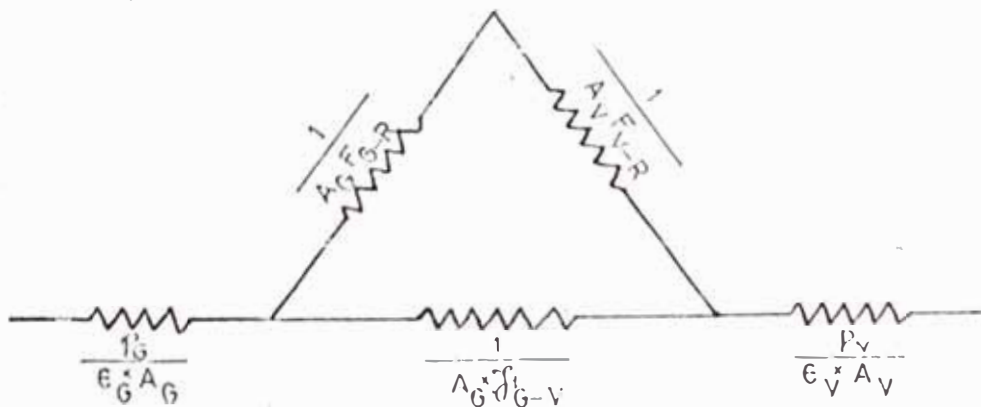


Fig.(3.33)

A continuación generaremos tablas de los factores de forma que serán introducidos al computador para el cálculo del área requerida para la transmisión de calor, que más se ajuste a nuestra necesidad.

Ver Tablas (3.17) y tabla (3.18).

TABLA 3.17  
FACTORES DE FORMA ENTRE PLANOS PARALELOS

H	3'(0.91)				4'(1.22)				5'(1.53)				6'(1.83)							
d/a	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$				
5	0.70	0.62	0.55	0.46	0.42	0.62	0.55	0.45	0.39	0.34	0.55	0.45	0.36	0.30	0.27	0.47	0.38	0.30	0.24	0.22
6	0.74	0.67	0.61	0.57	0.48	0.68	0.60	0.52	0.45	0.40	0.60	0.52	0.43	0.36	0.31	0.54	0.44	0.37	0.30	0.24
7	0.81	0.71	0.65	0.61	0.55	0.71	0.63	0.58	0.50	0.45	0.63	0.58	0.47	0.42	0.36	0.60	0.49	0.42	0.37	0.30
8	0.83	0.73	0.69	0.64	0.60	0.74	0.68	0.61	0.55	0.50	0.68	0.61	0.54	0.46	0.43	0.63	0.55	0.46	0.42	0.37
9	0.86	0.77	0.72	0.67	0.62	0.76	0.70	0.64	0.61	0.55	0.72	0.64	0.59	0.52	0.45	0.68	0.60	0.52	0.45	0.41

TABLA 3.18

FACTOR DE FORMA ENTRE PLANOS PARALELOS  
RODEADOS DE REFRACTARIO

$\frac{a}{H}$	3	4	5	6
5	0.63	0.62	0.60	0.58
6	0.73	0.68	0.62	0.60
7	0.76	0.71	0.68	0.62
8	0.79	0.74	0.71	0.66
9	0.81	0.76	0.73	0.68

3.53.6 Determinación de Perdidas

de Calor por Paredes

Para tal, motivo se hará uso de gráficos, fig.(3.34), de pérdida de calor por  $M^2$  de pared por hora.

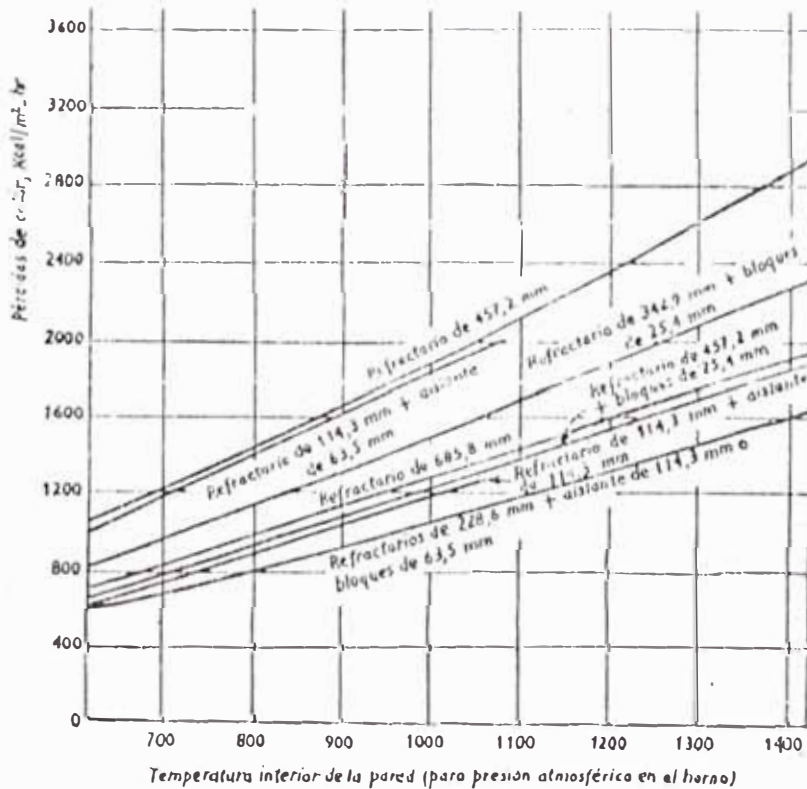


Fig. (3.34)



Con esta gráfica determinaremos las pérdidas de calor que ocurrirán para las diferentes medidas de horno, que se plantearon en las tablas (3.17) y (3.18).

Los valores de las diferentes áreas y su respectivo calor perdido por área total aparece en la tabla (3.19)

TABLA 3.19  
AREA TOTAL DEL HORNO Y EL CALOR PERDIDO

H a					m <sup>2</sup> Kcal/Hr
	3 Pies 0.91 m	4 Pies 1.22 m	5 Pies 1.53 m	6 Pies 1.83 m	
ART QP					
5 Pies 1.53 m	21.6342 35 696	24.0057 39 609	26.3772 43 522	28.6722 47 309	
6 Pies 1.83 m	27.5232 45 413	30.3597 50 093	33.1962 54 773	35.9412 59 303	
7 Pies 2.14 m	34.1758 56 390	37.4928 61 863	40.8098 67 336	44.0198 72 632	
8 Pies 2.44 m	41.1628 67 918	44.9448 74 159	48.7268 80 399	52.3868 86 438	
9 Pies 2.74 m	48.6898 80 338	52.9368 87 345	57.1838 94 353	61.2933 101 134	

Donde:

a = ancho del horno (m)

(1-H) = altura del horno (m)

$$AR_T = 5 \times a \times (1+H) + 3x(a)^2 \quad (\text{Area total del horno}) \text{ m}^2.$$

$$Q_P = 1650 \times AR_T \quad (\text{Calor perdido por paredes}) \text{ para el tipo de la}$$

drillo refractario y aislante. Kcal/HR.

3.5.3.7 Programa de Cálculo en Computadora de  
la rapidez de Calor a Transmitir

Antes de plantear el programa en BASIC elaboramos la nomenclatura equivalente de los terminos que aparecen en las formulas elaboradas con respecto a los terminos usados en la computadora.

<u>Calculos</u>		<u>Computadora</u>
$A_G \times F_{G-V}$	Factor Forma Global	FVG(T)
$A_G$	Area de Gas	AR(K)
$E_G$	Emisividad del Gas	ET(J)
$E_V$	Emisividad de Vidrio	EV
$A_G \times F_{G-V}$	Factor de Forma Global	AFG
$F_{G-V}$	Factor Forma	FA(T)
$F_{G-V}$	Factor Forma	FF(K)
$T_G$	Temperatura Gas	TE(J)
$T_V$	Temperatura del Vidrio Fundido	TK

1 DIM TE(3), ECO(12), EHO(12), FF(10), AR(10), FVG(10), ACO(10)

2 DIM ET(12), Q(5,5), QP(12), H(12), FA(12), AHO(10), AT(10)

3 INPUT "EV="; EV

4 INPUT "TK="; TK

5 FOR I= 4 TO 3

6 READ TE(I)

7 FOR J= 1 TO 4

```
8 READ ECO(J), EHO(J), ACO(J), AHO(J)
9 ET(J) = ECO(J) + EHO(J)
10 AT(J) = ACO(J) + AHO(J)
11 FOR K = 1 TO 5
12 READ FF(K), QP(K), H(K)
13 AR(K) = 1.5 x (H(K) ↑ 2)
14 T = 0
15 T = T + 1
16 IF T > 5 THEN 28
17 GOSUB 24
18 AFG = AR(K)/((1/ET(J)-1)+(1/FVG(T)-1)+1/FF(K))
19 Q(K,T) = AFG x 4.8813 x ((TE(I)/100) ↑ 4 - (TK/100) ↑ 4) - QP(K)
20 IF ABS(167037 - Q(K,T)) > 11000 OR Q(K,T) < 167037 THEN 23
21 PRINT "I="; I; SPC(3); "J="; J; SPC(3); "K="; K; SPC(3); "T="; T
22 PRINT "Q("; K; T; ")="; Q(K,T)
23 GOTO 15
24 READ FA(T)
25 FVG(T) = AR(K)/((1/ET(J)-1) + (1/EV-1) + 1/FA(T))
26 RETURN
28 NEXT
29 NEXT
30 NEXT
31 END
32 DATA 1823
33 DATA 0.0400, 0.0284, 0.0460, 0.0298
34 DATA 0.63, 35696, 1.53
35 DATA 0.70, 0.62, 0.55, 0.46, 0.42
36 DATA 0.73, 45413, 1.83
```

37 DATA 0.74,0.67,0.61,0.57,0.48  
38 DATA 0.76,56390,2.14  
39 DATA 0.81,0.71,0.65,0.61,0.55  
40 DATA 0.79,67918,2.44  
41 DATA 0.83,0.73,0.69,0.64,0.60  
42 DATA 0.81,80338,2.74  
43 DATA 0.86,0.77,0.72,0.67,0.62  
44 DATA 0.04293,0.0382,0.04682,0.03569  
45 DATA 0.62,39609,1.53  
46 DATA 0.62,0.55,0.45,0.39,0.34  
47 DATA 0.68,50093,1.83  
48 DATA 0.68,0.60,0.52,0.45,0.40  
49 DATA 0.71,61863,2.14  
50 DATA 0.71,0.63,0.58,0.50,0.45  
51 DATA 0.74,74159,2.44  
52 DATA 0.74,0.68,0.61,0.55,0.50  
53 DATA 0.76,87345,2.74  
54 DATA 0.76,0.70,0.64,0.61,0.55  
55 DATA 0.0492,0.501,0.05576,0.05916  
56 DATA 0.60,43522,1.53  
57 DATA 0.55,0.45,0.36,0.30,0.27  
58 DATA 0.62,54773,1.83  
59 DATA 0.60,0.52,0.43,0.36,0.31  
60 DATA 0.68,67336,2.14  
61 DATA 0.63,0.58,0.47,0.42,0.36  
62 DATA 0.71,80399,2.44  
63 DATA 0.68,0.61,0.54,0.46,0.43  
64 DATA 0.73,94353,2.74

65 DATA 0.72,0.64,0.59,0.52,0.45

66 DATA 0.0546,0.0548,0.06048,0.0572

67 DATA 0.58,47309,1.53

68 DATA 0.47,0.38,0.30,0.24,0.22

69 DATA 0.60,59303,1.83

70 DATA 0.54,0.44,0.37,0.30,0.24

71 DATA 0.62,72632,2.14

72 DATA 0.60,049,0.42,0.37,0.30

73 DATA 0.66,06438,2.44

74 DATA 0.63,0.55,0.46,0.42,0.37

75 DATA 0.68,101134,2.74

76 DATA 0.68,0.60,0.52,0.45,0.41

77 DATA 1923

78 DATA 0.0360,0.0259,0.0460,0.0298

79 DATA 0.63,35693,1.53

80 DATA 0.70,0.62,0.55,0.46,0.42

81 DATA 0.73,45413,1.83

82 DATA 0.74,0.67,0.61,0.57,0.48

83 DATA 0.76,56390,2.14

84 DATA 0.81,0.71,0.65,0.61,0.55

85 DATA 0.79,67918,2.44

86 DATA 0.83,0.73,0.69,0.64,0.60

87 DATA 0.81,80338,2.74

88 DATA 0.86,0.77,0.72,0.67,0.62

89 DATA 0.0389,0.0349,0.04682,0.03569

90 DATA 0.62,39609,1.53

91 DATA 0.62,0.55,0.45,0.39,0.34

92 DATA 0.68,50093,1.83

93 DATA .68, .60, .52, .45, .4  
94 DATA .71,61863,2.14  
95 DATA .71, .63, 58, .50, .45  
96 DATA 0.74,74159,2.4  
97 DAT .74,0.68, .61,0.55, .5  
9 DATA 0.76,87345,2.74  
99 DATA 0.76, .7 , .6 ,0.61,0.55  
1 0 DATA 0. 451, .0435, .5576,0. 5916  
11 .68,43522,1.53  
12 0.55,0.45,0.36, .30, .27  
13 D TA 0.62,54773,1.83  
14 DAT .6 , .52, .43,0.36,0.31  
150 D TA .68,67336,2.14  
16 DATA .63,0.58, . 7, .42, .36  
17 DATA .71,80399,2.44  
18 DATA .68, .61,0.54,0.46, . 3  
19 D TA .73,94353,2.74  
2 0 DATA .72, .64,0.59,0.52,0.45  
21 DATA 0.0504, .0484,0. 6 48,0.0572  
22 DAT .58,473 9,1.53  
23 DATA 0.47, .38, .3 , .24,0.22  
24 DATA .6 ,59303,1.83  
250 DAT .54, .44, .37, .30, .24  
26 DATA 0.62,72632,2.14  
270 D TA .6 ,0. 9, .42, .37,0.30  
28 DATA 0.66,86438,2.44  
29 DATA .63, .55,0.46,0.42,0.37  
3 0 D TA .68,101134,2.74

- 310 DATA 0.68,0.60,0.52,0.45,0.41
- 320 DATA 2023
- 330 DATA 0.0304,0.0219,0.0460,0.0298
- 340 DATA 0.63,35696,1.53
- 350 DATA 0.70,0.62,0.55,0.46,0.42
- 360 DATA 0.73,45413,1.83
- 370 DATA 0.74,0.67,0.61,0.57,0.48
- 380 DATA 0.76,56390,2.14
- 390 DATA 0.81,0.71,0.65,0.61,0.55
- 400 DATA 0.79,67918,2.44
- 410 DATA 0.83,0.73,0.69,0.64,0.60
- 420 DATA 0.81,80338,2.74
- 430 DATA 0.86,0.77,0.72,0.67,0.62
- 440 DATA 0.0318,0.0308,0.04682,0.03569
- 450 DATA 0.62,39609,1.53
- 460 DATA 0.62,0.55,0.45,0.39,0.34
- 470 DATA 0.68,50093,1.83
- 480 DATA 0.68,0.60,0.52,0.45,0.40
- 490 DATA 0.71,61863,2.14
- 500 DATA 0.71,0.63,0.58,0.50,0.45
- 510 DATA 0.74,74159,2.44
- 520 DATA 0.74,0.68,0.61,0.55,0.50
- 530 DATA 0.76,87345,2.74
- 540 DATA 0.76,0.70,0.64,0.61,0.55
- 550 DATA 0.0394,0.0392,0.05576,0.05916
- 560 DATA 0.60,43522,1.53
- 570 DATA 0.55,0.45,0.36,0.30,0.37
- 580 DATA 0.62,54773,1.83
- 590 DATA 0.60,0.52,0.43,0.36,0.31

600 DATA 0.68,67336,2.14  
610 DATA 0.63,0.58,0.47,0.42,0.36  
620 DATA 0.71,80399,2.44  
630 DATA 0.68,0.61,0.54,0.46,0.43  
640 DATA 0.73,94353,2.74  
650 DATA 0.72,0.64,0.59,0.52,0.45  
660 DATA 0.0437,0.0440,0.06048,0.0572  
670 DATA 0.58,47309,1.53  
680 DATA 0.47,0.38,0.30,0.24,0.22  
690 DATA 0.60,59303,1.83  
700 DATA 0.54,0.44,0.37,0.30,0.24  
710 DATA 0.62,72632,2.14  
720 DATA 0.60,0.49,0.42,0.37,0.30  
730 DATA 0.66,86438,2.44  
740 DATA 0.63,0.55,0.46,0.42,0.37  
750 DATA 0.68,101134,2.74  
760 DATA 0.68,0.60,0.52,0.45,0.41

\* Diagrama de flujo ver en apendice (A-4).

Valores de Entrada

EV = 0.89

TK = 1723

Valores de Salida

Tipo Horna

2 - 4 - 5 - 5

Calor Producido (Kcal/HR)

178647



Tipo Horno	Calor Producido (Kcal/HR)
2 - 4 - 5 - 4	179154
2 - 4 - 5 - 3	179154
3 - 3 - 5 - 2	178938
3 - 3 - 5 - 3	178697
3 - 3 - 5 - 4	178281
3 - 3 - 5 - 5	177738
3 - 4 - 4 - 1	177733
3 - 4 - 4 - 2	177177
3 - 4 - 4 - 3	176326
3 - 4 - 4 - 4	175834
3 - 4 - 4 - 5	175072

3.5.3.8 Cálculo del Dimensionamiento  
de la Zona de Trabajo

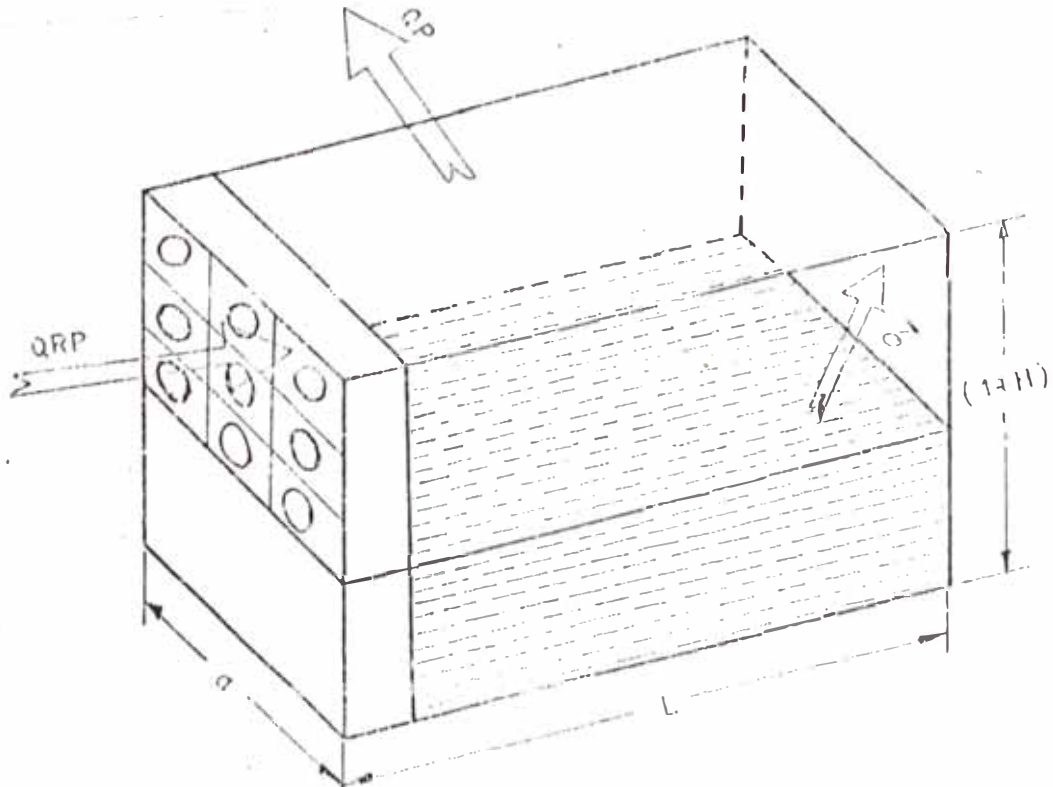


Fig. (3.35)

### 3.5.3.9 Condiciones de Operación

- En la zona de trabajo el vidrio debe conservarse en unos 1250°C, para poder ser manufacturado.

- Para conseguir la condición anterior, el vidrio fundido debe entregar calor a las paredes del horno y del mismo modo, parte del calor radiado en la zona de fusión atraviesa la pared de sombra. El cual entrega calor al vidrio y a las paredes del horno.

### 3.5.3.10 Cálculo del Calor que Atraviesa

#### la Pared Pantalla

Como puede observarse en la figura (3.35), parte del calor que se radía en la cámara de fusión atraviesa a la cámara de trabajo, a través de la pared de sombra; para efecto de cálculo se considera a la zona de fusión como una fuente de calor y ello conlleva a deducir la fórmula siguiente. La misma que representa el calor radiante que atraviesa a la cámara de trabajo.

$$QRP = \frac{(QR + QP) \times H \times R}{5 \times H + 3 \times a - H - R}$$

Donde:

QR = Calor radiado en la zona de fusión ( Kcal/HR )

QP = Calor perdido por las paredes en la zona de trabajo(Kcal/HR)

a = Ancho del Horno (m)

H = Altura del Horno (m)

R = Factor de área de la pared de sombra

QRP= Calor radiante que ingresa a la zona de trabajo (Kcal/HR)

3.5.3.11 Cálculo de la Longitud

Para efecto de esto solo nos limitaremos hacer un balance del calor entregado por el vidrio fundido y la radiación emitida de la zona de fusión, con el calor perdido por las paredes. Para este fin se hace uso de la figura (3.34), donde se aprecia el calor perdido en Kcal per m<sup>2</sup> - HR; vs temperatura de la zona de trabajo.

Hecha las evaluaciones de balance termico nos queda la fórmula siguiente; que determina la longitud de la zona de trabajo.

$$L = \frac{m \times C_p \times T + QRP}{Q} - (1 + H) \times a \times \frac{1}{2 \times (1 + H) \times a} \quad (\beta)$$

Donde :

- m = Flujo de masa ( Kg/HR )
- C<sub>p</sub> = Calor especifico ( Kcal/Kg-HR-°C )
- Q = Calor perdido per m<sup>2</sup> de pared ( Kcal/HR-m<sup>2</sup> )
- QRP = Calor radiado por cámara de fusión ( Kcal/HR )
- H = Altura de cámara de gases ( m )
- a = Ancho del horno ( m )
- L = Longitud del horno ( m )

De acuerdo al horno seleccionado tenemos las siguientes dimensiones y características. Para ello observar la tabla (3.20).

Aplicando las formulas  $\alpha$  y  $\beta$  y los datos proporcionados en la tabla en mención, obtenemos los siguientes resultados.

$$QRP = \frac{(178,938 + 94,353) \times 1.53 \times 0.45}{5 \times 1.53 + 3 \times 2.74} = 11,856 \frac{\text{Kcal}}{\text{HR}}$$

TABLA 3.20

CARACTERISTICAS DEL HORNO SELECCIONADO

	°C	Kcal/HR	Kcal/HR	m	m
Tipo Horno	Temp. Gas	QR	QP	H	a
3-3-5-2	1750.	178,938	94,353	1.53	2.74

Para el cálculo de la longitud de la cámara de trabajo; (L); también se hará uso de los valores de la figura (3.34).

$$L = \frac{345 \times 0.3329 \times 200 + 11,856}{0} - 2.53 \times 2.74 \times \frac{1}{2 \times (1 + 2.74 + 1.53)}$$

Luego:

$$L = 1.70 \text{ m}$$

3.5.3.12 Esquema del Dimensionamiento del horno

Las dimensiones que se muestra en este esquema aparece en la figura (3.36), siendo estas dimensiones las interiores del horno.

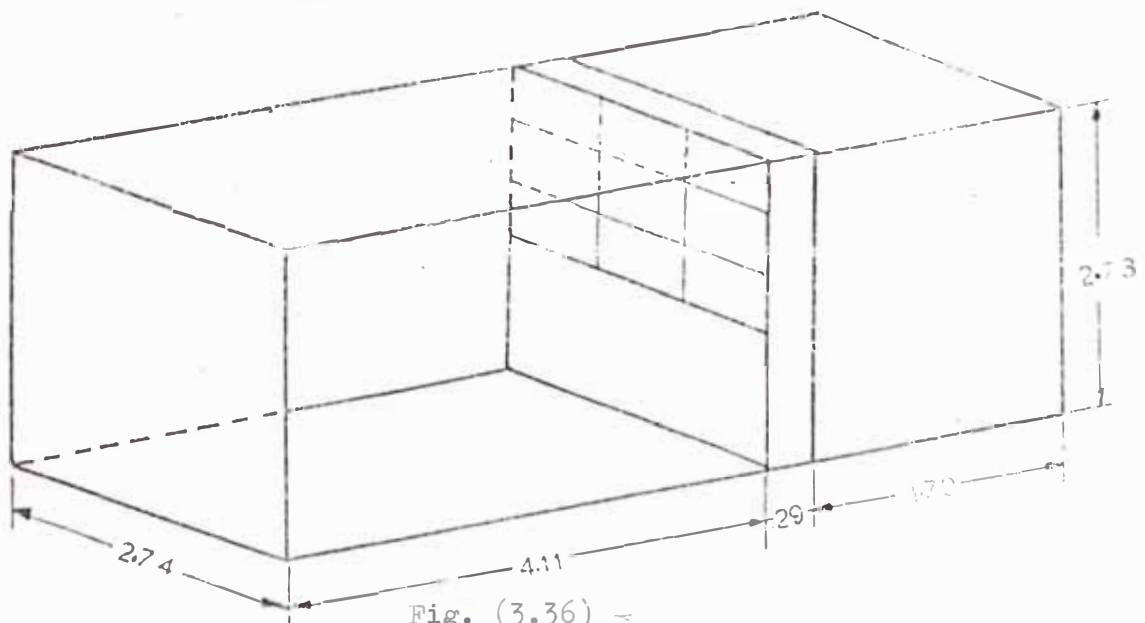


Fig. (3.36)

### 3.5.4 Mecanismo de Fundición del Vidrio

En la cámara de fusión, cuando se alimenta al horno con los elementos vitrificantes, formadores, fundentes y otros; estos componentes por tener una mayor densidad que el vidrio fundido, penetran en este absorbiendo calor y adhiriendo parte de masa que es enfriado por la masa del vidrio a fundir. Quienes a su vez a medida que penetran en el vidrio fundido van ganando temperatura, y así mismo en función de esta disminuyendo la densidad; lo cual le permite reflotar hasta obtener una temperatura aproximada de  $1450^{\circ}\text{C}$ . La estabilidad de temperatura y por ende de energía acumulada, de la zona en fundición viene proporcionada por la transmisión de calor realizada por los componentes formados del gas del petróleo quemado, QGV.

Para poder observar este fenómeno ver el esquema que se encuentra a continuación, figura (3.37). El cual nos muestra en una forma bastante objetiva, como varía las condiciones del cuerpo de acuerdo al recorrido dentro del fundido.

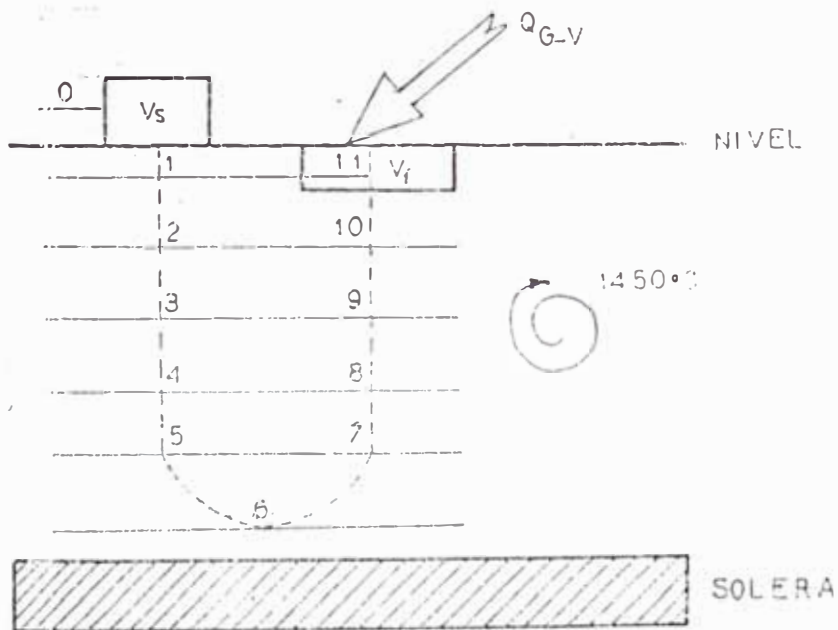


Fig. (3.37) Trayectoria Idealizada de una partícula.

### 3.5.4.1 Determinación de la Altura de la Zona de Fusión

Este cálculo será realizado con métodos aproximados de acuerdo a datos experimentales, obtenidos de las tablas y ecuaciones, que se encuentran en las referencias (R-2), (R-3). Para ello ver el apéndice (A-5).

Con la finalidad de hacer estos cálculos, se planteará a continuación fórmulas que nos permita hacer uno del cálculo numérico, con el fin de determinar la altura, el recorrido y el tiempo que demorarán las partículas en fundirse.

### 3.5.4.2 Incremento de Masa Condensación

Es la cantidad de masa de fundido que debe adherirse a la partícula de vidrio que debe fundirse.

$$\Delta m_{i+1} = \frac{m_i \times ((CP_{i+1} + CP_i)/2) \times (T_{i+1} - T_i)}{(CP_{1450} + CP_{i+1})/2 \times (1450 - T_{i+1})}$$

### 3.5.4.3 Cálculo del Tiempo de la Transmisión de Calor

Para efecto de esto, se considerará que la partícula a calentar, es sometida a una transmisión de calor por conducción; en el intercambio de calor con la partícula tal como se observa en la figura (3.30)

$$W - V \times \rho \times g - 4 \times \mu \times A \times \frac{dU}{dX} = - M \times \frac{dU}{dt}$$

El mecanismo planteado nos con lleva a la siguiente fórmula puntual.

$$(\Delta X_{i+1})^2 = \left[ \begin{array}{l} - \left[ (1 - \rho_v / \bar{\rho}) \times 2 \times 980 \times \Delta \theta_{i+1}^2 - (8 \times \mu / \bar{\rho} \times \bar{L}) \times \Delta \theta_{i+1} \right] \times \Delta X_{i+1} \\ - (8 \times \mu / \bar{\rho} \times \bar{L}) \times U_i \times (\Delta \theta_{i+1})^2 - (U_{(i)})^2 \times (\Delta \theta_{i+1})^2 \end{array} \right]$$

Empleando para ello la computadora y correlacionando las información obtenida por los tres fórmulas anteriores hallaremos distancia recorrida por la partícula, hasta que esta quede supuestamente fundida.

### 3.5.4.5 Nomenclatura de las Ecuaciones

- $\Delta m_{i+1}$  = Incremento de masa de deposición del fundido en el punto i+1 (gr)
- $m_i$  = Masa de la partícula en el punto i (gr)
- $CP_{i+1}$  = Calor específico en el punto i+1 (cal/gr-°C)
- $CP_i$  = Calor específico en el punto i (cal/gr-°C)
- $T_{i+1}$  = Temperatura en el punto i+1 (°C)
- $T_i$  = Temperatura en el punto i (°C)
- $CP(1450)$  = Calor específico a temperatura de 1450°C (°C)
- $\Delta \theta_{i+1}$  = Tiempo en el punto i+1
- $\bar{\rho}$  = Densidad promedio en el punto i+1 (gr/cm<sup>3</sup>)
- $\rho_v$  = Densidad del vidrio a 1450° (gr/cm<sup>3</sup>)
- $K_{i+1}$  = Conductividad térmica (cal/seg-cm-°C)
- $A_{i+1}$  = Área en el punto i (cm<sup>2</sup>)

- $A_i$  = Area en el punto  $i$  (cm<sup>2</sup>)  
 $B_{i+1}$  = Distancia de nudo a nudo en el punto  $i+1$  (cm)  
 $L_i = \left( \frac{\rho_i}{u_i} \right)^{1/3}$  Tamaño longitudinal de la partícula (cm)  
 $L_{i+1} = \left( \frac{\rho_{i+1}}{u_i + u_{i+1}} \right)^{1/3}$  Tamaño longitudinal de la partícula (cm)  
 $\rho_{i+1}$  = Densidad en el punto  $i+1$  (gr/cm<sup>3</sup>)  
 $\rho_i$  = Densidad en el punto  $i$  (gr/cm<sup>3</sup>)  
 $\mu$  = Viscosidad a 1450°C (gr/cm<sup>2</sup>seg)  
 $U_i$  = Velocidad en el punto  $i$  (cm/seg)  
 $\Delta X_{i+1}$  = Distancia avanzada desde el punto  $i$  a  $i+1$  (cm)  
 $\Delta \theta_i$  = Tiempo de transmisión de calor (seg)  
 $K_{1450}$  = Conductividad térmica a 1450°C (cal/seg-cm-°C)

El tamaño del grano recomendado es 0.5  $\mu$ m. promedio de acuerdo a la referencia (R-2,; pero sin embargo la fundición de una partícula no se efectúa individualmente, motivo por el cual si queremos hacer un análisis se hará la suposición de que ésta va acompañada de otras, es decir para efecto de cálculo, se considera que ésta es de 1.5  $\mu$ m por lado ya que ésta es rodeada por otras del tamaño promedio.

#### 3.5.4.6. Programa en Basic para Cálculo del Espacio y tiempo recorrido por la partícula a fundir

Antes de proceder la elaboración del programa, se proporcionará la nomenclatura de equivalencia de los términos de las fórmulas de los cálculos elaborados; respecto a los términos a usar en los cálculos a efectuar en la computadora.



- NOMENCLATURA DE EQUIVALENCIA

Término de Fórmulas

Término Computadora

$\Delta^m_{i+1}$	DM (I)
$m_i$	-M(I-1)
$CP_{i+1}$	CP (I)
$T_{i+1}$	T (I)
$CP_i$	CP(I-1)
$T_i$	T(I-1)
$CP_{1450}$	CT
$\Delta\theta_{i+1}$	DT(I-1)
$K_{i+1}$	K (I)
$K_{1450}$	K
$A_i$	A(I-1)
$A_{i+1}$	A(I)
$B_i$	B(I)
$Li$	L(I-1)
$L_{i+1}$	L(I)
$P_{i+1}$	R(I)
$P_i$	R(I-1)
$P_{1450}$	RK
$K_i$	K(I-1)
$\mu$	W
$U_i$	U(I)
$\Delta X_{i+1}$	DX(I)
$\Delta\theta_i$	DT(I)

```
.1 PRINT " ♥ "
5 DIM DX(16); U(16); T(2 ); M(16); L(16); R(16); A(16); G(16); F(16)
    C(16); AP(16)
6 DIM RM(15),K(16),DM(16),DT(16),CP(16),B(16),FD(16),ZN(16),PD(16)
7 DIM UT(16),LK(16),AZ(16),BZ(16),RP(16)
8 INPUT "RK="; RK
1  FOR I = 1 TO 15
13 GOSUB 55
14 YN = 1
15 D = AZ(I) ↑ 2 + 4 x YN x BZ(I)
16 Z = SGN(D) + 2
17 ON Z GOTO 18,2 ,22
18 PRINT " IMAGINARIO "
19 GOTO 21
2  DX(I) = + AZ(I)/2 x YN
21 GOTO 25
22 DX(I) = (+AZ(I) + 5QR(D))/(2 x YN)
25 U(I) = DX(I)/DT(I) = "
3  PRINT TAB(2); "DX(";I;")=";DX(I);TAB(19);"U(";I;")=";U(I)
35 Y = Y1 + DX(I)
4  Y1 = Y0
45 PRINT TAB(2);"Y0=";Y0;TAB(19);"ZNC(";I;")=";ZN(I)
48 STOP
49 PRINT " ♥ "
5  GOTO 2 0
55 IF (I-1) < > 0 THEN 125
58 READ T(I-1), M(I-1), R(I-1),W
60 K(I-1)=(1.47+ .01489xT(I-1))x4.3/3600
```

62 PRINT TAB(2);"T(";I-1;"="";T(I-1);TAB(19);"M(";I-1;"="";M(I-1)

65 PRINT TAB(2);"R(";I-1;"="";R(I-1); TAB(19);"W="";W

70 L(I-1) = (M(I-1)/R(I-1))  $\uparrow$  (1/3)

75 A(I-1) = (M(I-1)/R(I-1))  $\uparrow$  (2/3)

80 GOSUB 100

85 CP(I-1)=(0.00146xT(I-1)  $\uparrow$  2xP+2xPxT(I-1)+0)/(0.00146xT(I-1)+1)  $\uparrow$  2

87 CT=(0.00146x1723  $\uparrow$  2xP+2xPx1723+0)/(0.00146x1723+1)  $\uparrow$  2

90 PRINT TAB(2);"CPC";I-1;"="";CP(I-1);TAB(19);"K(";I-1;"="";K(I-1)

95 GOTO 125

100 FOR S = 1 TO 6

105 READ G(S), F(S), C(S)

110 P = P + G(S) x F(S)

115 Q=0 + G(S) x C(S)

118 NEXT

120 RETURN

125 READ T(I), R(I)

130 GOSUB 171

132 FD(I) = (M(I-1)x(CP(I)+CP(I-1))x(T(I)-T(I-1)))/2)

135 DM(I) = FD(I)/((CT+CP(I))x(1723-T(I)))/2)

140 B(I) = DM(I)/(12xR(I))x(R(I-1)/M(I-1))  $\uparrow$  (2/3)+(M(I-1)/R(I-1))  
 $\uparrow$  (1/3)/2

145 M(I) = M(I-1) + DM(I)

150 A(I) = (M(I)/R(I))  $\uparrow$  (2/3)

154 L(I) = (M(I)/R(I))  $\uparrow$  (1/3)

155 LP(I) = (L(I) + L(I-1))/2

156 RP(I) = (R(I) + R(I-1))/2

157 DT(I) = FD(I)x(B(I))/(6x(K(I)+K(I-1)) $\sqrt$ 2 x A(I-1)x(1723-T(I)))

158 PD(I) = 8xWxD(T(I))/(RP(I)xLP(I))

```
159 RM(I) = 1960 x(RP(I) - RK)/RP(I) x DT(I) ↑ 2
161 Z1 = ZN(I-1)
162 ZN(I) = Z1+DT(I)
164 PRINT TAB(2);"T(";I;")=";T(I);TAB(19);"M(";I;")=";M(J)
165 PRINT TAB(2);"R(";I;")=";R(I)
166 PRINT TAB(2);"B(";I;")=";B(I);TAB(19);"L(";I;")=";L(I)
167 PRINT TAB(1);"DT(";I;")=";DT(I);TAB(18);"CP(";I;")=";CP(I)
168 PRINT TAB(2);"A(";I;")=";A(I);TAB(18);"DM(";I;")=";DM(I)
169 PRINT TAB(2);"K(";I;")=";K(I)
170 GOTO 175
171 K(I) = (1.047+0.001489xT(I))/2x8.6/3600
172 CP(I) = ((0.00146xT(I) ↑ 2)xP+2xT(I)xP+0)/(0.00146xT(I)+1) ↑ 2
174 RETURN
175 IF(I-1) < > 0 THEN 178
176 UT (I) = 0
177 GOTO 179
178 UT(I) = .DX(I-1)xDT(I)/DT(I-1)
179 LK(I) = 8xWxUT(I)xDT(I)/(RP(I)xLP(I))
180 AZ(I) = (RM(I) - PD(I))
185 BZ(I) = (LK(I) + UT(I) ↑ 2 )
190 RETURN
200 NEXT
210 END
220 DATA 277,0.00247,2.47,0.36
230 DATA 0.71, 0.000468, 0.1657
240 DATA 0.02, 0.000453, 0.1755
250 DATA 0.14, 0.000829, 0.2229
260 DATA 0.02, 0.000514, 0.2142
```

270 DATA 0.02, 0.000445, 0.1756  
280 DATA 0.09, 0.000410, 0.1709  
285 REM T(I) R(I)  
290 DATA 373, 2.4426  
300 DATA 473, 2.4152  
310 DATA 573, 2.3878  
320 DATA 673, 2.3604  
330 DATA 773, 2.3330  
340 DATA 873, 2.3056  
350 DATA 973, 2.2782  
360 DATA 1073, 2.2508  
370 DATA 1173, 2.2234  
380 DATA 1273, 2.1960  
390 DATA 1373, 2.1970  
400 DATA 1473, 2.1975  
410 DATA 1573, 2.1980  
420 DATA 1673, 2.1986

\* El diagrama de flujo se encuentra elaborado en el apéndice A-6

Valor De Entrada

RK = 2.1992

Densidad del vidrio@1450 °C (gr/cm<sup>3</sup>)

Valores de Salida

H(I) = 0.98

Altura recorrida por la partícula hasta su fusión (m)

YO = 6.28

Tiempo que tarda en fundir el vidrio. en (seg).

Este circuito implica hacer evaluaciones de coeficientes de transmisión de calor de los gases dentro del horno, la resistencia conductiva del horno dimensionado previamente, y la transmisión de calor por convección al aire en los alrededores del horno.

En esta sección también determinaremos la cantidad de energía que se llevan los gases al exterior. Lo mismo que se desarrollara el diagrama de SANKEY, con toda la información y evaluación proporcionada hasta ese momento; lo cual también nos servirá para determinar la eficiencia del horno.

### 3.6.1 Cálculo del Coeficiente de Transmisión de Calor por Convección dentro del Horno

El coeficiente de transmisión por convección, para un flujo turbulento dentro del horno, tiene la siguiente ecuación (3.11),.

$$h_{cg} = 0.023 \times V^{0.8} \times D^{-0.2} \times R \times (4/\rho)^{-0.8} \quad (3.11)$$

Donde:

- D = Diametro Hidraulico (Pie)
- V = Velocidad (Pie/Seg)
- R = Conductividad Térmica (BTU/HR-Pie-°F)
- $\mu$  = Viscosidad Absoluta (Lb<sub>m</sub>/Pie-Seg)
- $\rho$  = Densidad (Lb<sub>m</sub>/Pie<sup>3</sup>)
- $h_{cg}$  = Coeficiente de Convección de los gases (BTU/Pie<sup>2</sup>-HR-°F)

Así mismo el diametro hidraulico y la velocidad de los gases esta dada por las siguientes ecuaciones (3.12), (3.13). También ver figura (3.40).

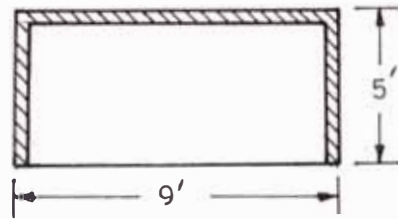


Fig.(3.40) Muestra la sección del horno.

$$D = 4 \times \frac{\text{AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL FLUJO}}{\text{PERIMETRO MOJADO}} \quad (3.12)$$

$$V = Z \times \frac{m \times R \times T}{P \times A} \quad (3.13)$$

Con el fin de efectuar el cálculo de la expresión de  $h_{cg}$ , se elaboró la tabla (3.22), para tal efecto nos ayudaremos con las fig.(3.41 y (3.42) y la tabla N° (A<sub>3</sub>) y la referencia (R-3).

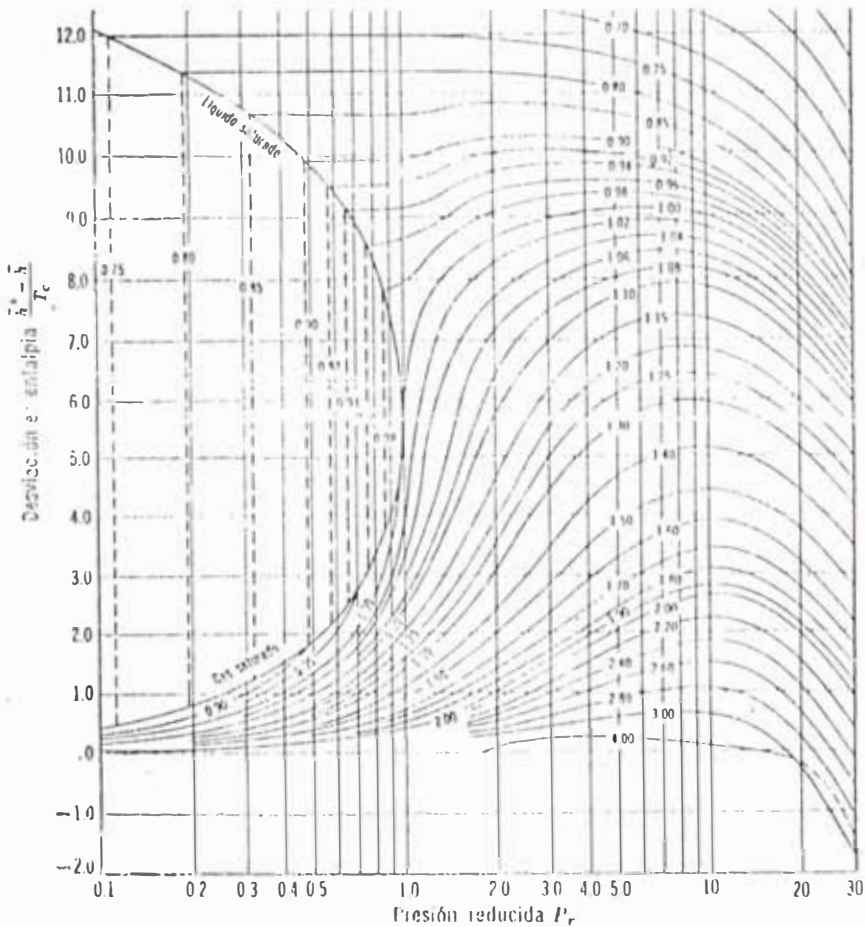


Fig. (3.41)

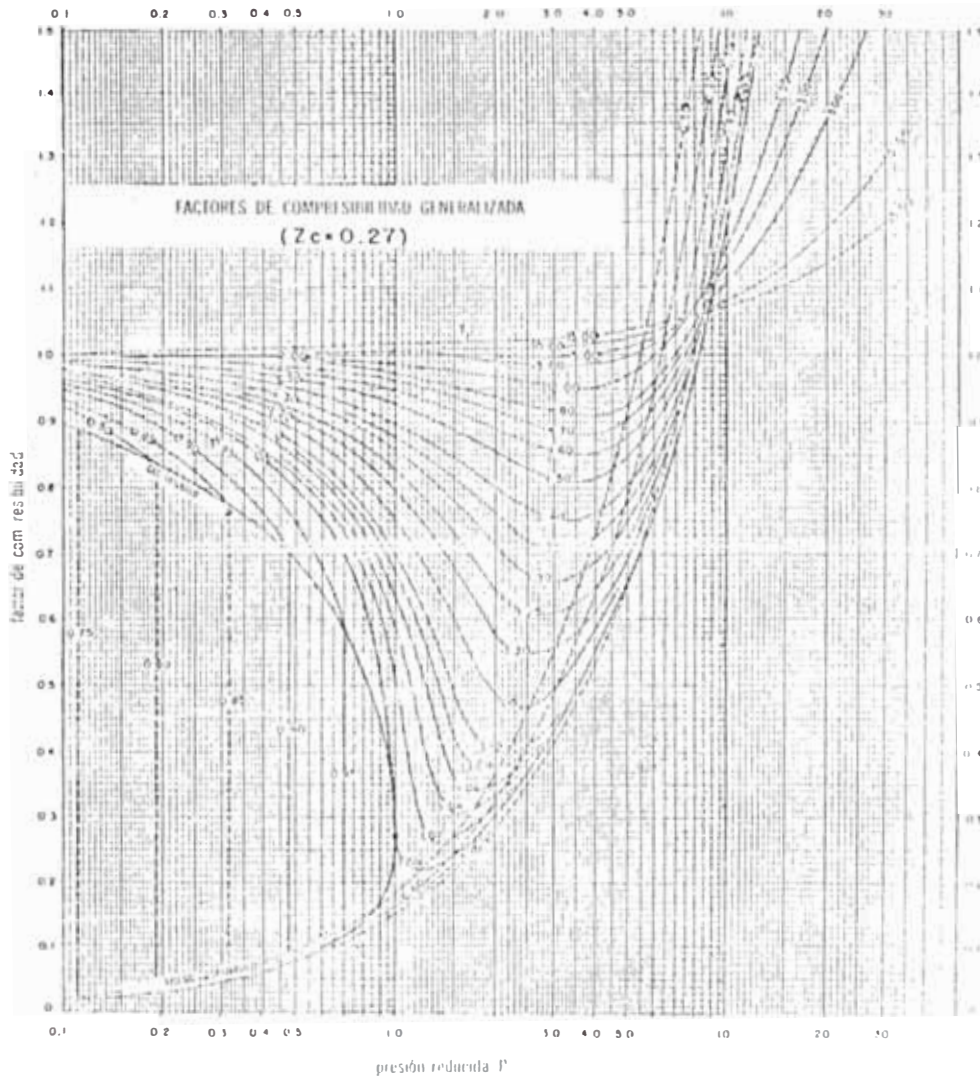


Fig.(3.42)

En la cual aparecieran los siguientes valores  $N^{\circ}$  M les/HR de cada componente del gas, y sus respectivos %, la presión es relativa, factor de compresibilidad Z, desviación e entalpia generalizada  $h^* - h/T$  de los diferentes componentes ya que esto nos indicará el comportamiento de los gases e los cálculos de el coeficiente.

### 3.6.2 Cálculo del Coeficiente de Convección para la parte Exterior del Horco ( $h_c$ )

Para este fin se considerará que la temperatura del medio ambien-



TABLA 3.22

Elemento	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
%	10.76	9.94	4.55	74.75
K	0.114	0.061	0.0465	0.0423
	4.00	3.92	3.32	2.80
	0.0070	0.0175	0.0224	0.0197
Nº Moles/HR	9,185.28	8,478.72	3,886.98	63,802.36
T <sub>r</sub>	3226	6652	13,0725	16,0369
P <sub>r</sub>	0.0003697	0.001022	0.000681	0.016735

Elemento	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
%	10.76	9.94	4.55	74.75
Z	1	1	1	1
h <sup>#</sup> -h/T	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P <sub>p</sub> Atmosf.	0.0807	0.07455	0.034125	0.560625
V Pie/seg	4.07	4.06	1.7177	28.2019
DH Pie	6.4286	6.4286	6.4286	6.4286
h <sub>cg</sub> BTU/HR-Pie <sup>2</sup> -°F	0.3460	0.3910	0.2080	1.8390

Para elaborar esta tabla se ha tenido que emplear los siguientes valores, previamente conocidos en cálculo anteriores:

- R (Constante universal de los gases) =  $1545 \frac{\text{Lbf-Pie}}{\text{Lbm-}^\circ\text{R}}$
- Nº Moles C<sub>12</sub> H<sub>26</sub> = 766.56 Moles/HR
- PA (Presión atmosférica) = 0.75 ATM.a 3,000 m5n.m
- TC (Temperatura del Gas) = 1750°C - 3182°F

Así mismo en esta tabla aparece términos tales como:

- \* h<sub>cg</sub> = 2.734 (BTU/HR-Pie<sup>2</sup>-°F)
- P<sub>r</sub> (Presión Relativa) = P/PC
- T<sub>r</sub> (Temperatura Relativa) = T/TC
- Z Compresibilidad de los gases
- (h<sup>#</sup>-h)/T = Desviación de Entalpia

te del local, en zonas aproximadas al horno no debe ser mayor a  $45^{\circ}\text{C}$  y/o  $113^{\circ}\text{F}$ . Para el enfriamiento superficial del horno se tratará de aprovechar el movimiento convectivo libre del aire. Para tal motivo, se aplicara las siguientes fórmulas:

$$L = 1 / ( 1/L_V + 1/L_H ) \quad (3.14)$$

Donde:

L = Longitud Equivalente

$L_V$  = Altura

$L_H$  = Longitud Horizontal Promedio

#### Convección Natural Laminar

Para un dominio de número de Grashof, desde  $10^5$  a  $2 \times 10^7$ ; se aplica la siguiente fórmula

$$h_e = 0.30 \times \frac{k}{L} \times (Gr_L \times Pr)^{1/4}$$

#### Convección Natural Turbulenta

Ocurre el dominio del número de Grashof, desde  $2 \times 10^7$  a  $3 \times 10^{10}$  y por ello se aplica la siguiente fórmula:

$$h_e = 0.51 \times \frac{k}{L} \times (Gr_L \times Pr)^{1/4}$$

Estas fórmulas son aplicables a superficies planas horizontales, pero sin embargo lo haremos extensivo a placas verticales (paredes del horno). Con el fin de simplificar cálculos, ya que este tipo de rela

ciones proporcionan valores semejantes a las de las placas verticales. Per tal motivo estas fórmulas usarán la longitud equivalente  $L$ , de acuerdo a la fórmula (3.14).

Con el fin de determinar el coeficiente convectivo de las paredes y techos del horno, se ha generado la tabla (3.23), donde aparece una serie de valores de  $h_c$ , para diferentes temperaturas promedio  $(T_s + T_\infty)/2$ ; donde  $T_s$  es igual a temperatura exterior de la superficie del horno y  $T_\infty$  temperatura del medio ambiente en las proximidades del horno.

La tabla anterior es sólo aplicable a paredes y techo. Para el cálculo del coeficiente convectivo del piso, se elaborará la tabla (3.24); que es muy similar a la anterior con las siguientes variaciones,  $T_\infty = 70^\circ\text{C} - 158^\circ\text{F}$  y  $T_s$  mayor que el de la tabla anterior.

### 3.6.3. Determinación de la conductividad Térmica de los Materiales Refractarios y Aislantes

Para este fin se hará uso de la figura (3.44); el cual proporcionará información, sobre la conductividad térmica de los ladrillos refractarios y de los aislantes. Y para obtener valores de conductividad del recubrimiento del piso y paredes de la cuba, emplearemos la misma figura.

A continuación se desarrollará la tabla (3.25); la cual muestra, el lugar donde se coloca el material refractario, el tipo de material, las diferentes y posibles temperaturas promedio, y los respectivos valores de conductividad para cada temperatura promedio y material.

TABLA 3.23

R	T	Ts	L	$(T_s+T)/2$	Ts-T	PR	g	Gr	hea
BTU/HR-Pie <sup>2</sup> -°F	°F	°F	Pie	°F	°F		x 10 <sup>6</sup>	10 <sup>9</sup>	BTU/Pie <sup>2</sup> -HR °F
.01846	113	400	1.820	256.5	287	0.715	0.62264	1.07729	0.91246
.01799	113	350	1.820	231.5	237	0.715	0.72414	1.034629	0.88029
.01751	113	300	1.820	206.5	187	0.715	0.82564	0.9307788	0.83445
.01704	113	250	1.820	181.5	137	0.715	1.0138	0.837311	0.79084

TABLA 3.24

R	T	Ts	L	$(T_s+T)/2$	Ts-T	PR	g	Gr	hea
BTU/HR-Pie <sup>2</sup> -°F	°F	°F	Pie	°F	°F		x 10 <sup>6</sup>	10 <sup>8</sup>	BTU/Pie <sup>2</sup> -HR °F
.01985	158	500	1.820	329	342	0.704	0.39006	8.04214	0.908487
.01937	158	450	1.820	304	292	0.709	0.43656	7.684948	0.878059
.01890	158	400	1.820	279	242	0.712	0.52926	7.72144	0.858674
.01843	158	350	1.820	254	192	0.715	0.63076	7.30095	0.826549
.01795	158	300	1.820	229	142	0.717	0.73226	6.26856	0.775458

TABLA 3.25

TIPO	PARTES DEL HORNO	TIPO DE MATERIAL REFRACTARIO.	TEMPERATURA PROMEDIO °R/°K	CONDUCTIVIDAD (BTU/HR-PIE-°F) /Kcal/Hr-m-°C
Ti=1730 1650 1600 Ti <input type="checkbox"/> Te Te=300	PAREDES Y TECHO	CILICO ALUMINOSO REPSA ANCHOR	2292	1.20
			1278	1.785
			2229	1.20
			1248	1.785
Ti=1400 1350 1300 Ti <input type="checkbox"/> Te Te=300	CHIMENEA	CROMITA MAGNESITA REPSA NUCON 50	2022	2.20
			1123	3.273
			1977	2.20
			1098	3.273
Te=300 Ti <input type="checkbox"/> Te Ti=1200 1050 1000	PISO EXTERIOR	SILICO ALUMINOSO REPSA ANCHOR	1842	1.02
			1023	1.517
			1797	1.02
			998	1.517
Tv=1450 Tv <input type="checkbox"/> Ti Ti=1000 950 900	PISO INTERIOR CUBA	CARBURO DE SILICIO O ZIRCONIO DE SILICIO	2697	10.5
			1498	15.624
			2652	10.5
			1473	15.624
Tv=1450 Tv <input type="checkbox"/> Ti Ti=1200 1150 1000	PARED INTERIOR DE LA CUBA	CARBURO DE SILICIO O ZINCONIO	2697	10.5
			1498	15.624
			2652	10.5
			1473	15.624
Te=300 Te <input type="checkbox"/> TE TE=250 200 150	AISLANTE	TIERRAS DIATOMEAS	987	0.043
			548	0.066
			942	0.042
			523	0.066
Te=300 Ti <input type="checkbox"/> Te Ti=1200 1150 1100	PARED EXTERIOR DE LA CUBA	SILICIO ALUMINOSO REPSA ANCHOR	1842	1.02
			1023	1.517
			1797	1.02
			998	1.517
Te=300 Ti <input type="checkbox"/> Te Ti=1200 1150 1100	PARED EXTERIOR DE LA CUBA	SILICIO ALUMINOSO REPSA ANCHOR	1752	1.02
			973	1.517

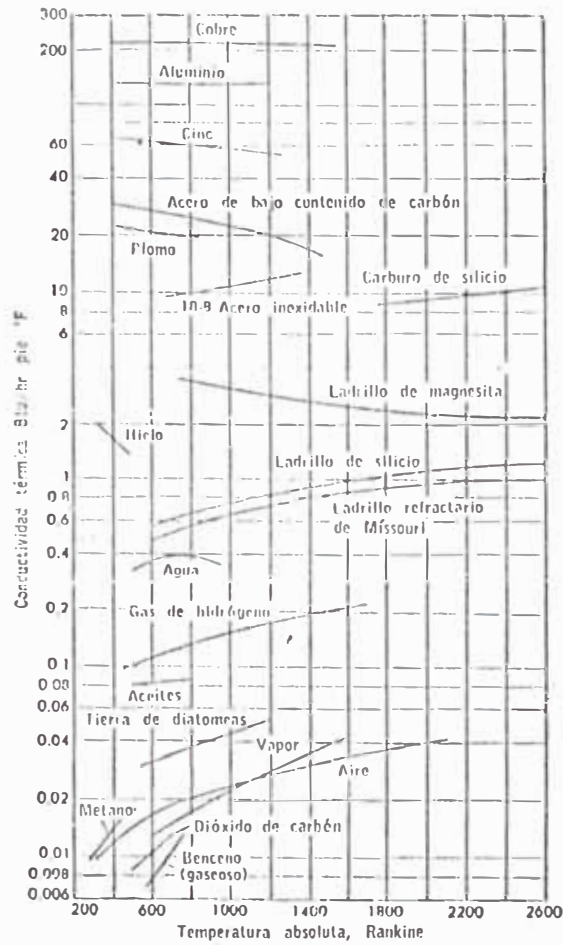


Fig. 3.44

3.6.4. Cálculo de la Temperatura del Refractario

Para determinar la temperatura que tiene el ladrillo refractario en la superficie interior del horno. En consideración el calor perdido por las paredes que fue determinado gráficamente en la sección 3.5.3.4. Que según tabla(3.19), debería ser 94,353. Lo cual proporcionará una idea de cuanto puede ser la temperatura del refractario de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T_R = 100 \times \sqrt[4]{(T_G/100)^4 - QP/(AG \times \epsilon_G \times \sigma)}$$

$$T_R = 100 \times \sqrt{(2023/100)^4 - 94,353/(2.74^2 \times 1.5 \times 0.89 \times 4.8813)}$$

$$T_R = 2017^\circ \text{ K}$$

Donde:

$T_G$  = Temperatura del gas en el horno ( °K )

QP = Calor perdido por paredes ( Kcal/Hr )

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman ( Kcal/Hr-m<sup>2</sup> - °C<sup>4</sup> )

AG = Area del gas (m<sup>2</sup>)

3.6.5. Determinación de los Factores de Forma para la conducción en esquina

A continuación se trazará el horno en corte, donde apareciera las curvas de temperatura (isotermas), y las líneas de flujo de calor fig. (3.45). De acuerdo a esto podemos determinar sus factores de forma.

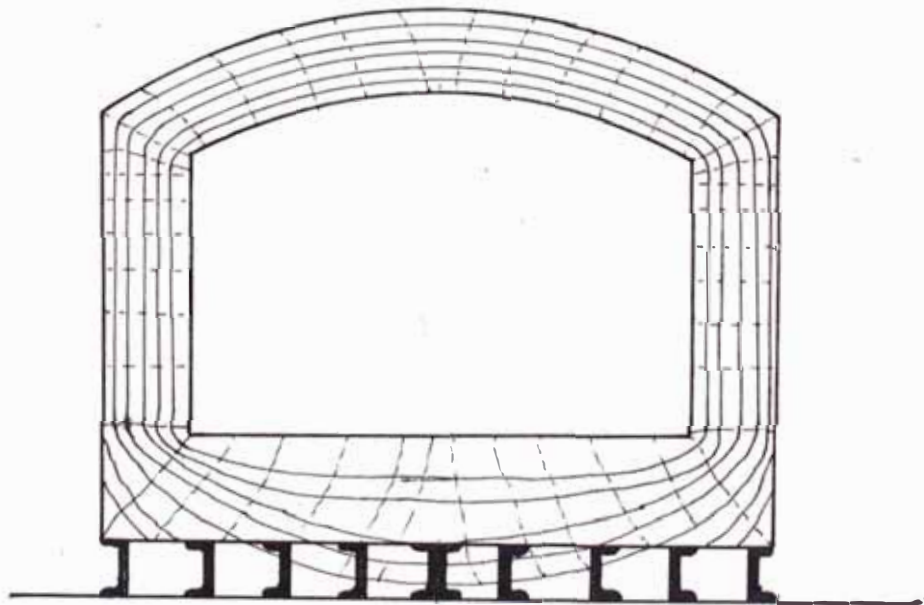


Fig. 3.45

Como podrá observarse en esta figura el efecto en las esquinas de la parte superior, el cambio de las líneas de flujo de calor es, a los 0.30 m x 0.30 m; a lo largo de la esquina.

Mientras que en el piso el efecto de variación de las isotermas y líneas de flujo de calor si no estuviera soleras no se manifestaría, tal como se observa en la figura anterior; es decir en forma similar a la que quedaría definida por el de las esquinas superiores.

Para determinar el factor de forma de la intersección de dos planos, ya sea; Pared-Techo o Pared-Pared, tanto en la parte superior o inferior del horno, haremos uso de la fig. ( 3.45 ) y de la ecuación ( 3.15 ), obtenida de la referencia "R3" - pag. ( 96).

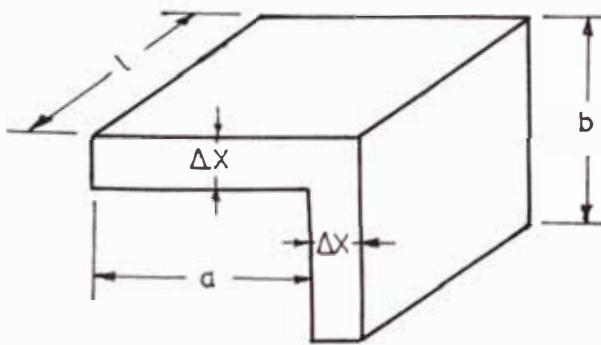


Fig. (3.46), Intersección de Pared - Pared o Pared-Techo.

$$S = a \times l / \Delta x + b \times l / \Delta x + 0.54 \times l \quad (3.15)$$

Una vez obtenido el factor de forma "S", se reemplaza en la ecuación principal de transmisión de calor.

$$Q_{INT} = \bar{S} \times k \times (T_i - T_e) \quad (3.16)$$

Donde:

$Q_{INT}$  = Calor de las intersecciones

Aquí no se determinó el factor de forma en los vértices del hor-



no; ya que este afecta muy poco para el cálculo. Debido a que este ocurre en una zona muy pequeña.

A continuación se elabora las tablas (3.25); (3.26) y (3.27). Las cuales nos permite determinar los factores de formas, para las intersecciones conformadas por los ladrillos de zirconio, refractario y aislantes.

TABLA 3.25

FACTOR DE FORMA PARA REFRACTARIOS (SR)

PUNTO	l(m)	a(m)	b(m)	X(m)	SR	TIPO
I	2.74x1.5	0.30	0.30	0.2286	13	
II	2.74	0.30	0.30	0.2286	8.67	
III	1.53	0.30	0.30	0.2286	4.84	
IV	1.00	0.30	0.30	0.2286	3.16	

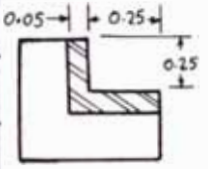
TABLA 3.26

FACTOR DE FORMA PARA AISLANTES (SA)

PUNTO	l(m)	a(m)	b(m)	X(m)	SR	TIPO
I	2.74x1.5	0.53	0.53	0.1143	40.33	
II	2.74	0.53	0.53	0.1143	26.89	
III	1.53	0.53	0.53	0.1143	15.02	
IV	1.00	0.53	0.53	0.1143	9.81	

TABLA 3.27

FACTOR DE FORMA PARA EL ZIRCONIO (SZ)

PUNTO	L(m)	a(m)	b(m)	X(m)	SZ	TIPO
I	2.74x1.5	0.25	0.25	0.05	43.32	
II	2.74	0.25	0.25	0.05	28.88	
III	1.00	0.25	0.25	0.05	10.54	

Para aclarar las tablas anteriores, se hace la figura (3.47), la cual muestra las intersecciones, donde se calculan los factores de forma.

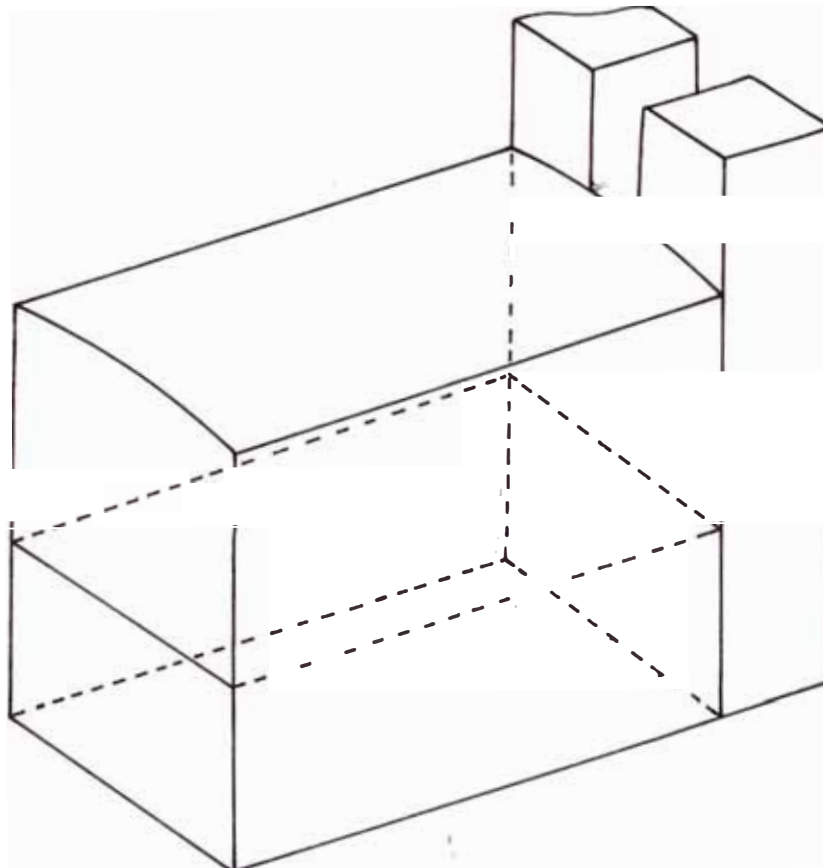


FIG. 3.47 Ubicación de las Intersecciones para determinar los factores de forma.

### 3.6.6. Determinación del Flujo de calor

#### Paredes, techo y piso del horno.

Es importante notar que la verificación del dimensionamiento del horno se restringe sólo a la zona de fusión, ya que la zona de trabajo es dimensionado de acuerdo a las dimensiones térmicas obtenidas en la zona de fusión.

En el circuito que se muestra en la fig. (3.40), se independizó la zona de fusión del horno en dos sectores. Tal como muestra la fig. (3.48), esta sectorización se realiza, a las diferentes condiciones térmicas, en que se hallan estos sectores.

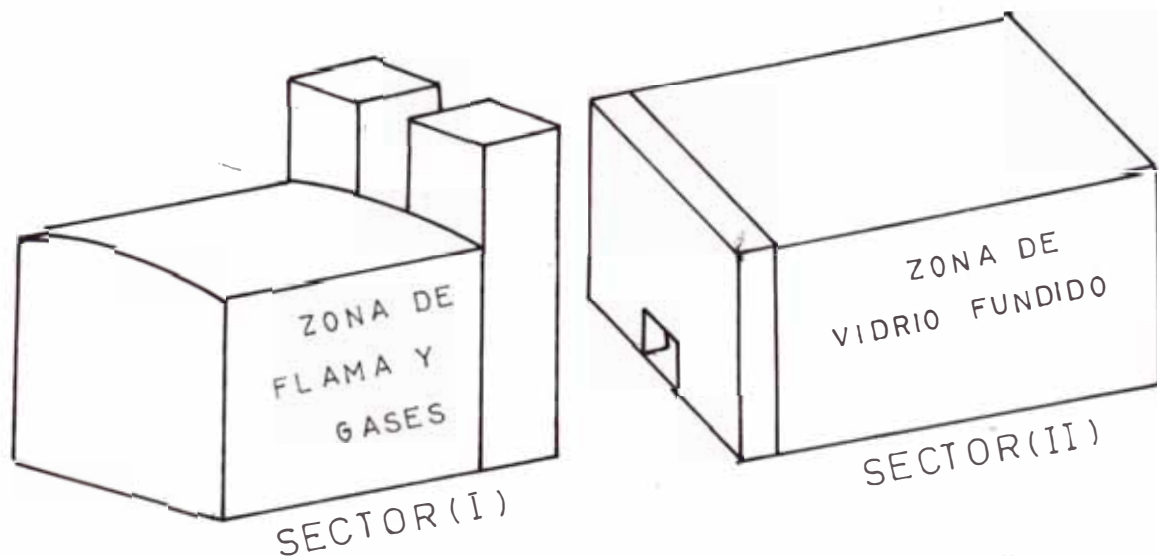


Fig. 3.48

De acuerdo a los coeficientes térmicos, obtenidos en los cálculos anteriores y empleando el diagrama del circuito, fig. (3.40), restringido a la zona (I), se plantea las siguientes funciones:

$$QA(I) = UE \times (TR - TA)$$

$$UE = 1/(UC1 + UC2)$$

$$BLT = 1/(ETE/(ATE \times KRT) + ETA/(ATE \times KAT))$$

$$CLT = 1/(1/(RT \times SRT) + 1/(KAT \times SAT))$$

$$DLT = 1/(ETE/(APA \times KRT) + ETA/(APA \times KAT))$$

$$UR1 = 1/(BLT + CLT + DLT)$$

$$UC2 = 1/(HC(I) \times (ATT + ATP) \times F)$$

Donde:

ETE	Ancho del refractario	( m )
ATE	Area del techo	( m <sup>2</sup> )
KRT	Conductividad térmica del Refractario en el techo.	( Kcal/m-Hr - °C )
ETA	Ancho del aislante	( m )
KAT	Conductividad térmica del Aislante en el techo.	( Kcal/m-Hr - °C )
SRT	Factor de forma de la intersección Del techo y pared de refractario total	
SAT	Factor de forma de la intersección Del techo y pared del aislante, total.	
APA	Area de la pared	( m <sup>2</sup> )
F	Factor de conversión	
HC(I)	Coefficiente de convención	BTU/Hr-pie <sup>2</sup> -°F )
ATT	Area exterior del techo	( m <sup>2</sup> )
ATP	Area exterior de pared del sector (I)	( m <sup>2</sup> )
VE	Coefficiente global	
TR	Temperatura del refractario	( °C )
TA	Temperatura del aire	( °C )
QA(I)	Calor perdido por pared y techo en el sector (I)	Kcal/Hr

A continuación se plantea las ecuaciones que rigen el mecanismo de la zona (II), tomando en cuenta las consideraciones que se hizo para la zona (I).

Dado la dificultad de determinar la cantidad de calor de radiación y convección que se pierde por las paredes y piso de la cuba; se supondrá que el vidrio en la cámara de fusión mantiene una temperatura de 1450°C, en forma uniforme, dentro del volumen de la cuba. Por lo cual las ecuaciones de calor perdido por este sector serán las siguientes:

$$\begin{aligned}
 QB(J) &= UB \times (TV - TB) \\
 UB &= 1/(UA1 + UA2) \\
 UA1 &= 1/(JLT + FLT + GLT) \\
 JLT &= 1/(ECZ/KTZ \times AP) + EPR/(KTR \times AP) \\
 FLT &= 1/(1/(KTZ \times STZ) + 1/(KTR \times STR)) \\
 GLT &= 1/(EPZ/(KTZ \times APB) + EPR/(KTR \times APB) + EPA/(KTA \times APB)) \\
 UD2 &= 1/(HA(J) \times (API + ATA) \times F)
 \end{aligned}$$

Donde:

QB(J)	Calor perdido por paredes y piso en el sector (II), del horno	(Kcal/Hr)
EPZ	Espesor del ladrillo de zirconio	(m)
KTZ	Conductividad térmica del zirconio en el sector (II).	(Kcal/Hr - m - °C)
AP	Area del piso, sin intersecciones	(m <sup>2</sup> )
EPR	Espesor del ladrillo refractario	(m)
KTR	Conductividad térmica del refractario en el sector (II), del horno.	(Kcal/Hr - m - °C)
STZ	Factor de forma de intersecciones entre piso y paredes del zirconio.	

STR	Factor de forma de intersección entre piso y pared de refractario.	
APB	Area de paredes en el sector (II)	( m <sup>2</sup> )
EPA	Espesor del aislante	( m )
KTA	Conductividad térmica del aislante en el sector (II) del horno	(Kcal/Hr - m - °C)
TV	Temperatura del vidrio	°C
TA	Temperatura del ambiente	°C
HA(J)	Coefficiente convectivo del aire en la zona (II), del horno	(BTU/Hr-Pie <sup>2</sup> - °F)
API	Area exterior del piso	( m <sup>2</sup> )
ATA	Area exterior de la pared en el Sector (II), del horno	( m <sup>2</sup> )

### 3.6.6.1. Cálculo de las areas del

#### Piso, Techo y Paredes.

Los valores evaluados de las areas aparecen en la tabla (3.28). acompañado de los respectivos espesores del refractario, aislante y zirconio.

### 3.6.6.2. Programa para verificación

#### del dimensionamiento térmico.

```
5 DIM S(6),SA(5),SZ(5),HC(5),QA(5),QB(5),QT(6,6),HA(6)
10 READ ERE,ATE,KRT,ETA,KAT,ALA
15 BLT = 1/(ERE/(ARE x KRT) + ETA/(ARE x KAT))
25 DLT = 1/(ERE/(ALA x KRT) + ETA/(ALA x KAT))
30 READ S(1),S(2),S(3),S(4)
35 SRT = 2 x S(1) + S(2) + 2 x S(3)
40 READ SA(1),SA(2),SA(3)
```

```
45 SAT = 2 x SA(1) + SA(2) + 2 x SA(3)
50 SKR = 2 x S(1) + 2 x S(2) + 4 x S(4)
55 READ SZ(1),SZ(2),SZ(3)
60 SPZ = 2 x SZ(1) + 2 x SZ(2) + 4 x SZ(3)
65 CLT = 1/(1/(KRT x SRT) + 1/(KAT x SAT))
70 READ ECZ,KTZ,AK,KER,EBR,ACB,EPA
75 JLT = 1/(ECZ/(KTZ x AK) + EBR/(KER x AK))
80 FLT = 1/(1/(KTZx SPZ) + 1/(KER x SKR))
85 GLT = 1/(ECZ/(KTZ x ACB) + EBR/(KER x ACB) + EPA/(KAT x ACB))
90 UR1 = 1/(BLT + CLT + DLT)
95 UA1 = 1/(JLT + FLT + GLT)
98 PRINT "CALOR TOTAL PERDIDO"
100 READ AHT,AOP,API,ATA
102 READ F,TR,TA,TV,TB,
105 FOR I = 1 TO 4
103 PRINT
110 READ HC(I)
115 UC2 = 1/(HC(I) x (AHT + AOP) x F)
120 UE = 1/(UR1 + UC2)
130 QA(I) = UE x (TR - TA)
135 FOR J = 1 TO 5
140 READ HA(J),
145 UD2 = 1/(HA(J) x (API + ATA) x F)
150 UB = 1/(UA1 + UD2)
155 QB(J) = UB x (TV - TB)
160 QT (I,J) = QA(I) + QB(J)
165 IF QT(I,J) > 100,000 THEN 170
166 PRINT "QT(";I,J;) = "; QT(I,J)
```

170 NEXT  
180 NEXT  
190 END  
195 DATA 0.2286,8.15,1.785,0.1143,0.066,12.0  
200 DATA 13,8.67,4.84,3.16  
205 DATA 40.33,26.89,15.02  
210 DATA 43.32,28.88,10.54  
215 DATA 0.51,15.624,7.51,1.517,0.2286,6.83,0.1143  
220 DATA 11.26,16.77,11.26,10.96  
225 DATA 4.8833,1740,50,1450,70  
230 DATA 0.912460,0.908487,0.878059,0.858674,0.826549,0.775458  
235 DATA 0.88029,0.908487,0.878059,0.858674,0.826549,0.775458  
240 DATA 0.83445,0.908487,0.878059,0.858674,0.826549,0.775458  
245 DATA 0.79084,0.908487,0.878059,0.858674,0.826549,0.775458

\*

- Modo de operar

Escribir comando	RUN
Aplastar	RETURN

- Valores de Salida

QT(1,5) = 99,361  
QT(2,5) = 99,227  
QT(4,5) = 98,807

\* Ver apéndice A-6a



TABLA 3.28

AREAS Y ESPESORES DE DIFERENTES PARTES DEL HORNO

TIPO	LUGAR	L(m)	L'(m)	H(m)	P(m)	A(m <sup>2</sup> )	TIPO ESPESOR	ESPESOR
ARE	TECHO	2.14	3.81	-0-	-0-	8.15	ERE	0.2286
							ETA	0.1143
ALA	PARED (I)	2.14	3.81	1.53	9.76	12.	ERE	0.2286
							ETA	0.1143
AK	PISO	2.14	3.51	-	-	7.51	ECZ	0.051
							EBR	0.2286
ACB	PARED (II)	2.14	3.	0.70	9.76	6.83	ECZ	0.051
							EBR	0.2286
							EPA	0.1143
AHT	TOTAL TECHO	2.74	4.11	-	-	11.26		
AOP	TOTAL PARED (I)	2.74	4.11	1.53	10.96	16.77		
API	TOTAL PISO	2.74	4.11	-	-	11.26		
ATA	TOTAL PARED (II)	2.74	4.11	1.00	10.96	10.96		

3.6.7.1. Cálculo de la Temperatura de los Gases a la salida de la Chimenea

Este cálculo determina la temperatura del gas a la salida del recuperador. Para tal efecto, se dibujará a la chimenea en corte, donde aparece, la ubicación del recuperador. Fig. (3.48)

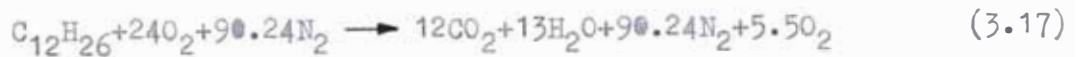
Al plantear las ecuaciones que se usarán en el cálculo de la temperatura a la salida del gas, éstas se basarán en la ecuación estequiométrica de reacción del combustible con el aire y en función de la entalpía de formación de los gases proporcionados por la tabla (A.11), páginas (703 - 711); Ref. (R.8)



Fig. 3.48

Lo que implica, plantear nuevamente la ecuación estequiométrica y a continuación de esto, la ecuación que nos conduce a determinar la temperatura de salida del gas del recuperador. De acuerdo a un balance termodinámico en el mismo recuperador.

Por cada Mol de petróleo, es decir ( $C_{12}H_{26}$ ), tenemos la siguiente ecuación.



La ecuación de balance térmico en el recuperador, está dado con la ecuación (3.18). Lo que para esto, supondremos que el Aire Frio entra al recuperador a  $10^\circ C$ ; y que el gas entra al recuperador a una temperatura de  $145^\circ C$ . Es más el aire es calentado a una temperatura de  $55^\circ C$ ; y la salida del gas estará a una temperatura  $T_s$ , la cual será determinada en las próximas secciones

$$Q_{CA} = \left[ \begin{array}{l} N_{O_2(\text{aire})} \times (h_{55} - h_{25})_{O_2} - (h_{10} - h_{25})_{O_2} + \\ N_{N_2(\text{aire})} \times (h_{55} - h_{25})_{N_2} - (h_{10} - h_{25})_{N_2} \end{array} \right] \quad (3.18.a)$$

$$Q_{CA} = \left[ \begin{array}{l} N_{CO_2(\text{gas})} \times (h_{145} - h_{25})_{CO_2} - (h_s - h_{25})_{CO_2} + \\ N_{H_2O(\text{gas})} \times (h_{145} - h_{25})_{H_2O} - (h_s - h_{25})_{H_2O} + \\ N_{N_2(\text{gas})} \times (h_{145} - h_{25})_{N_2} - (h_s - h_{25})_{N_2} + \\ N_{O_2(\text{gas})} \times (h_{145} - h_{25})_{O_2} - (h_s - h_{25})_{O_2} \end{array} \right] \quad (3.18.b)$$

Donde los valores de  $N_{O_2(\text{aire})}$  y  $N_{N_2(\text{aire})}$ ; se encuentran tabulados en la tabla (3.33), los valores de  $(h_{55} - h_{25})_{O_2}$ ,  $(h_{10} - h_{25})_{O_2}$ ,  $(h_{55} - h_{25})_{N_2}$  y  $(h_{10} - h_{25})_{N_2}$ ; se encuentran en la tabla (3.32).

Los valores de los números de moles de los componentes de los gases y los de sus entalpías, a temperatura de 1450°C han sido tabulados a continuación; ver tabla (3.29)

TABLA 3.29

UNIDADES	# Mol/mol comb.	cal /gr. mol
ELEMENTOS	NUMERO MOLES	ENTALPIA (h <sub>1450</sub> - h <sub>25</sub> )
CO <sub>2</sub>	12	17,892
H <sub>2</sub> O	13	14,057
N <sub>2</sub>	90.24	11,053
O <sub>2</sub>	5.5	11,669

Con ayuda de las tablas (3.29), (3.32), y (3.33); reducimos la ecuación anterior a la ecuación (3.19), que a continuación aparece.

$$12 \times (h_{1450} - h_{25}) \text{CO}_2 + 13 \times (h_{1450} - h_{25}) \text{H}_2\text{O} + 90.24 \times (h_{1450} - h_{25}) \text{N}_2 + 5.5 \times (h_{1450} - h_{25}) \text{O}_2 = 1'011,898 \text{ (cal/mol comb.)} \quad (3.29)$$

Antes de procesar esta fórmula en el computador, se generará la tabla (3.30); para diferentes posibles valores de temperaturas de salida de los gases, VS sus entalpías correspondientes.

Por tanto para procesar la ecuación (3.29); con la computadora, esta la transformamos en la ecuación (3.30); que aparece a continuación.

TABLA 3.30

Entalpias a diferentes temperaturas de los Gases

			CO	H <sub>2</sub> O	N	O <sub>2</sub>
NOMENG.	PUNTO	TS(I)	HCO(I)	HHO(I)	HN(I)	HO(I)
UNIDAD.	---	°K	cal/gr-mol	Cal/gr-mol	cal/gr-mol	cal/gr-mol
	1	1700	17,565	13,786	10,858	11,465
	2	1600	16,152	12,630	10,015	10,583
	3	1500	14,750	11,495	9,179	9,706
	4	1400	13,362	10,348	8,350	8,835
	5	1300	11,988	9,298	7,529	7,971

$$12xHCO(I)+13xHHO(I)+90.24xHN(I)+5.5xHO(I) = 1011898 \quad (3.30)$$

La cual al ejecutar el primer miembro con sus diferentes valores para cada punto, pretendemos por metodo iterativo igualan al segundo determinandose de esta manera la temperatura de salida del gas; TS.

3.6.7.2. Cálculo del calor perdido por los Gases QCH

En esta sección aprovecharemos también el uso del computador, al introducir las ecuaciones que permitirán el cálculo del calor que se llevan los gases al salir de la chimenea.

Para tal efecto planteamos la ecuación (3.31) y la tabla (3.31).

$$QCH = B X ( R - RA ) / 1000 \quad (3.31)$$

Donde:

$$R = 1011898 \quad (\text{Cal/mol} - \text{gr})$$

$$RA = 12x(\Delta H)_{CO_2} + 13x(\Delta H)_{H_2O} + 90.24(\Delta H)_{N_2} + 5.5x(\Delta H)_{O_2}$$

$$H = (h_{ta} - h_{25})$$

$$B = \text{No. mol-gr de combustible/horas} = 403 \quad (\text{Ver tabla 3.9.1.})$$

Para la ejecución del cálculo del calor perdido de los gases por la chimenea, implica tabular las entalpías de los diferentes componentes del gas a la temperatura ambiente, que por facilidad escogemos;  $TA = 300 \text{ K}$ . Ver la tabla (3.31); que aparece a continuación.

TABLA 3.31

Entalpía de los gases a temperatura-ambiente

NOMENGLATURA	TA	$\Delta H_{CO_2}$	$\Delta H_{H_2O}$	$\Delta H_{N_2}$	$\Delta H_{O_2}$
UNIDADES	° K	Cal/mol-gr	Cal/mol-gr	Cal/mol-gr	Cal/mol-gr
NOMENGLATURA PARA COMPUTADOR	TA	PCO	PHO	PN	PO
	300	16	15	13	13

Luego la ecuación (3.31); queda transformada en la siguiente ecuación (3.32)

$$QCH = 403 x ( R - RA ) / 1000 \quad (\text{Kcal/Hr}) \quad (3.32)$$

Donde:

$$RA = 12xPCO + 13xPHO + 90.24xPN + 5.5xPO$$

3.6.7.3. Cálculo del calor entregado  
al aire por los gases (QAC)

Al pasar el aire através del recuperador, este es calentado, por los gases del horno, en flujo cruzado. Por lo que los gases decrecen en temperatura desde 1450°C a 1100°C; (Valor hallado por el computador); mientras que el aire eleva su temperatura desde aproximadamente 10°C a 550°C.

Para evaluar la cantidad de calor que absorbe el aire, se plantea la ecuación (3.33) y la tabla (3.32), donde se muestra las entalpías del N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> del aire a temperaturas de 10°C y 550°C.

$$QAC = \left[ \begin{array}{l} \text{No. Moles O}_2/\text{HR} \times \left[ (h_{550} - h_{10})_{O_2} - (h_{10} - h_{25})_{O_2} \right] / 1000 + \\ \text{No. Moles N}_2/\text{HR} \times \left[ (h_{550} - h_{10})_{N_2} - (h_{10} - h_{25})_{N_2} \right] / 1000 \end{array} \right] \quad (3.33)$$

Los valores y la representación para el uso en computadora del número de moles/HR del O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> del aire, son tabulados en la tabla (3.33)

TABLA 3.32

PUNTO	T <sub>a</sub>	(h - h <sub>25</sub> ) <sub>O<sub>2</sub></sub>	(h - h <sub>25</sub> ) <sub>N<sub>2</sub></sub>
1	10°C	-92	-104
2	550°C	3973	3770
NOMENG. COMPUTADOR	TA(I)	GQ(I)	GN(I)
UNIDADES	°C	Cal/mol-gr	Cal/mol-gr.

TABLA 3.33

Número de Moles del O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> del aire

COMPONENTES DEL AIRE	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
No. MOLES-GR/HORA	9672	36,366
REPRESENTACION PARA EL COMPUTADOR	N O	N N

La ecuación (3.33), es transformada en la ecuación (3.34), para ser usada en el Computador.

$$QAC = (NO \times (GO(1) - GO(2)) + NN \times (GN(1) - GN(2))) / 1000 \quad (3.34)$$

3.6.7.4. Programa para el cálculo

de: TS, QCH y QAC

```

5 DIM T(6),HCO(6),HHO(6),HN(6)
6 DIM HO(6),A(6),GO(2),GN(2)
10 PRINT "xx----- (0 - 39) -----xx"
15 PRINT "x--T--x"; "--HCO--x"; "--HHO--x";
20 PRINT "--HN--x"; "--HO--x"
25 PRINT "xxx----- (0 - 39) -----xxx"
30 FOR I = 1 TO 5
35 READ T(I),HCO(I),HHO(I),HN(I),HO(I)
40 PRINT "x";TAB(1);T(I);TAB(6);"x";TAB(7);HCO(I);
45 PRINT TAB(13);"x";HHO(I);TAB(21);"x";TAB(23);HN(I);
50 PRINT TAB(29);"x";TAB(31);HO(I);TAB(38);"x"
60 PRINT "xx----- (0 - 39) -----xxx"

```



```
65 A(I) = 12xHCO(I)+13xHHO(I)+90.24xHN(I)+5.5xHO(I)
70 IF A(I) > 1011898 THEN 155
75 N = 0
76 N = N + 0.1
80 K = HCO(I)+(HCO(I-1)-HCO(I))/100 x N
85 B = HHO(I)+(HHO(I-1) - HHO(I))/100 x N
90 G = HN(I)+(HN(I-1)-HN(I))/100 x N
100 F = HO(I)+(HO(I-1)-HO(I))/100 x N
110 R = 12xk+13xB+90.24xG+5.5xF
120 IF (1011898 - R) >= 20 THEN 76
130 TS = T(I) + N - 273
140 PRINT "TS = TEMPERATURA DE SALIDA DEL GAS"
150 PRINT "TS=";TS
155 NEXT
160 READ PCO,PHO,PN,PO
170 RA = 12xPCO+13xPHO+90.24xPN+5.5xPO
180 QCH = 403 x (R-RA)/1000
190 PRINT "QCH=CALOR PERDIDO POR LOS GASES AL SALIR DE LA CHIMENEA"
200 PRINT"QCH=";QCH
210 READ GQ(2),GQ(1),GN(2),GN(1)
220 READ NO,NN.
230 QAC = (NOx(GQ(2)-GQ(1))+NNx(GN(2) - GN(1)))/1000
240 PRINT "QAC=CALOR ENTREGADO AL AIRE"
250 PRINT "QAC=";QAC
260 END
270 DATA 1700,17565,13786,10858,11465
280 DATA 1600,16152,12630,10015,10583
290 DATA 1500,14750,11495, 9179, 9706
```

300 DATA 1400,13362,10348,8350,8835

310 DATA 1300,11988, 9298,7529,7971

320 DATA 16, 15, 13, 13

330 DATA 3973, -92, 3770, -104

340 DATA 9672,36366

\* Diagrama de flujo ver en apendice A-7

- Modo de operar el programa

Escribir            RUN

PULSAR            RETURN

- Salida de Información

T(I)	HCO	HHO	HN	HO
1700	17565	13786	10858	11465
1600	16152	12630	10015	10583
1500	14750	11496	9174	9706
1400	13362	10348	8350	8835
1300	11988	9298	7529	7971

TS = "TEMPERATURA DEL GAS EN LA CHIMENEA" = 1049°C

QHC = "CALOR PERDIDO POR CHIMENEA" = 407,163 Kcal/Hr

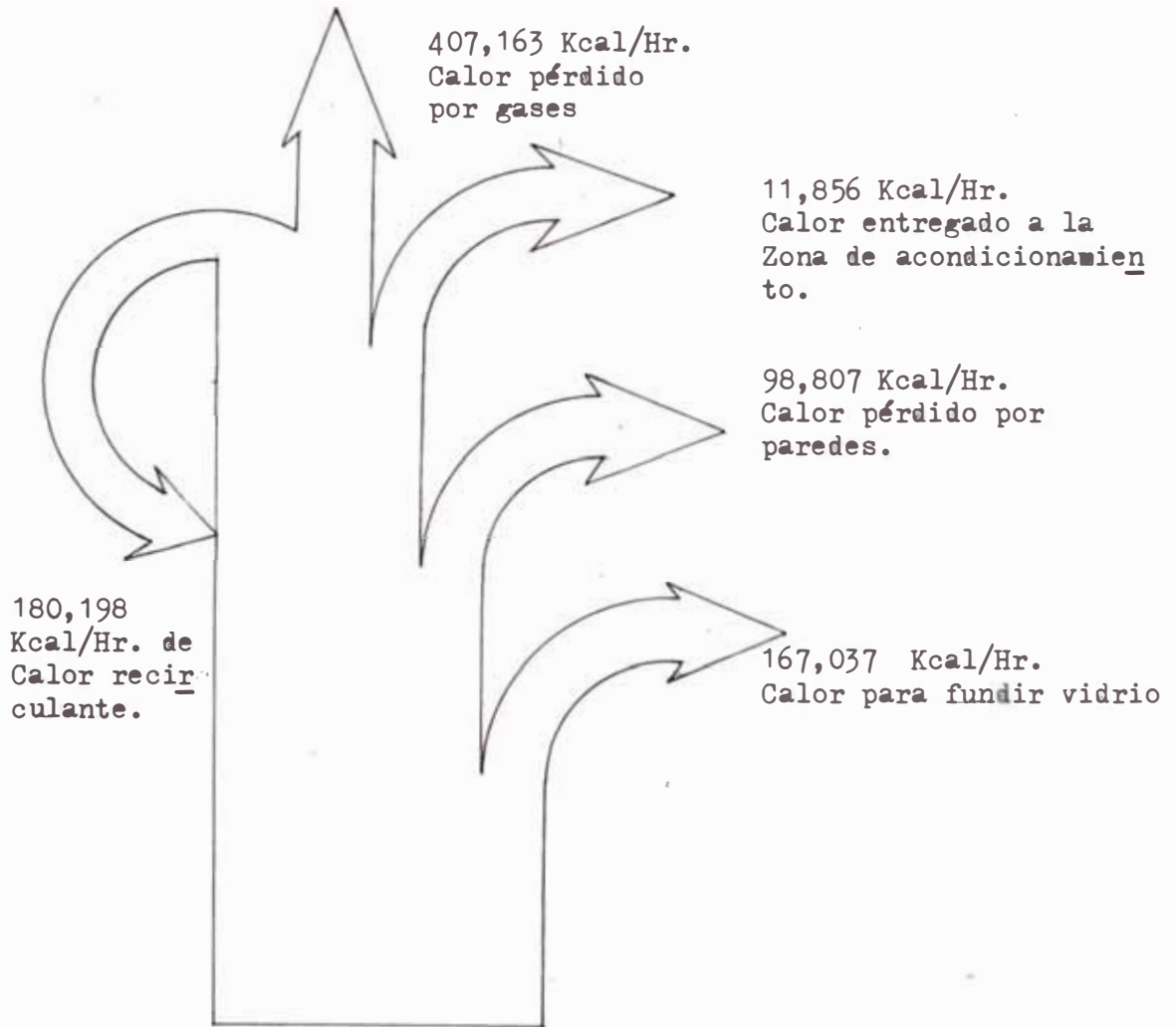
QAC = "CALOR ENTREGADO AL AIRE" = 180,198 Kcal/Hr

3.6.7.5. Diagrama de Sankey y

Cálculo de eficiencia

De acuerdo a los valores obtenidos de los calores emitidos en el horno y perdidos, se elabora el diagrama de Sankey y asimismo la

... eficiencia térmica fue calculada en forma objetiva de acuerdo al diagrama..



Luego la eficiencia térmica será:

$$\eta = \frac{167,037 * 100\%}{407,163 + 167,037 + 11,856 + 98,807}$$

$$\eta = 24\%$$

## DISEÑO ESTRUCTURAL DEL HORNO

Aquí trataremos al horno en su aspecto físico, aprovechando las dimensiones térmicas del mismo. Es decir que se hará el cálculo de resistencia del techo, paredes y solera del horno.

La estructura del horno, es calculada como consecuencia, de los esfuerzos producidos por la dilatación térmica del horno y del peso del mismo en la zona de la solera.

A consecuencia de los cálculos anteriores, y teniendo en cuenta la resistencia del terreno y considerando algunos tipos de movimientos vibratorios producidos por algunas máquinas que se encuentran al rededor del horno se procederá al diseño y cálculo de la cimentación.

En este capítulo, también se realizará, el diseño de la chimenea y del recuperador, lo mismo que el sistema de aire combustible.

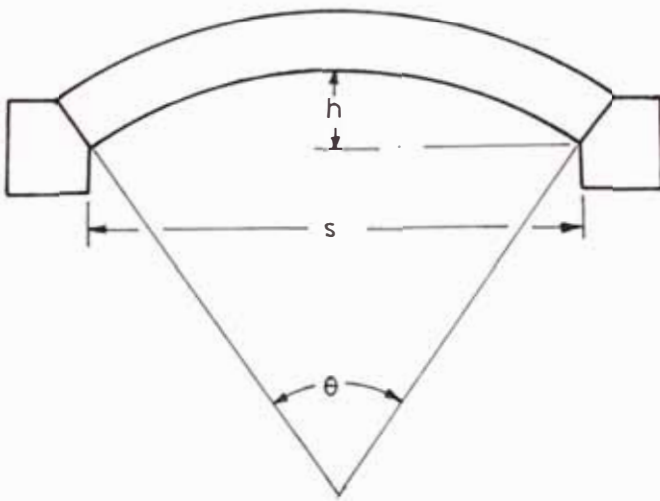
### 4.1.1. Diseño del techo

La construcción del techo se realiza en forma de bóvedas. Para tal efecto se utilizan ladrillos con conexiones Standard o en cuña. Tanto el empuje horizontal como el peso del arco están sostenidos por ladrillos salmer de formas especiales, los cuales son sostenidos, a su vez, por canales de acero que recorren a lo largo de cada lado del horno.

La fig. (4.1); muestra la geometría de un arco bombeado y sus dimensiones principales. El arco abombado convencional es circular

con un centro de curvatura común a las superficies superior e inferior, como se muestra. La elevación se expresa comúnmente en cm, por metro de vano o claro (h/s) y oscila de 8cm/m a 24cm/m. Donde, esta relación queda deducida de la siguiente forma:

$$h/s = 50 \times (1 - \cos(\theta/2)) / \text{sen}(\theta/2)$$



- h = elevación
- s = Luz del arco
- θ = Angulo Central

Fig. 4.1

En nuestro caso, para un  $\theta = 84^\circ$ ; implica que  $h/s = 19.19 \text{ cm/m}$   
Luego,  $h = 52 \text{ cm}$ .

Con la finalidad de calcular el esfuerzo que se produce en la junta de los ladrillos salmér y los ladrillos de bóveda; plantearemos ecuaciones que determinen tal esfuerzo, en función al peso y al ángulo central  $\theta$ . Para ello observar la figura (4.2.)

Donde  $H_T$ , es la fuerza lateral de la pared, en kg/m;  $W_T$ , es el peso total del ladrillo de bóveda, en kg/m; y  $F_T$ , es la fuerza total que actúa en la intersección en kg/m.

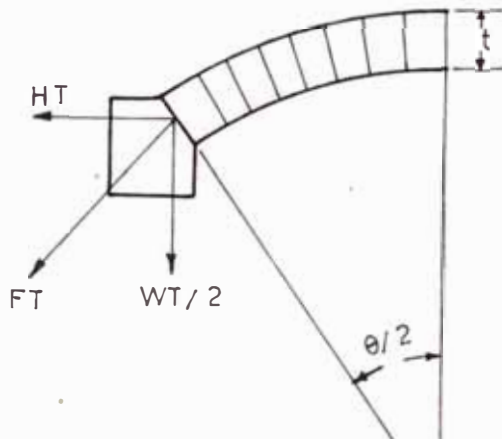


Fig. 4.2.  
Fuerzas actuantes sobre  
el Salmer.

Luego las ecuaciones que evalúan estas fuerzas son las siguientes:

$$W_T = \frac{N^\circ \times w}{L} \quad (4.1)$$

$$H_T = \frac{W_T}{2} \times \text{Ctg} \frac{\theta}{2} \quad (4.2)$$

$$F_T = \frac{W_T}{2} \times \text{Csc} \frac{\theta}{2} \quad (4.3)$$

Donde:

$N^\circ$  = Número de ladrillos totales en bóveda

$L$  = Longitud de cada ladrillo de bóveda en (m)

$w$  = Peso de cada ladrillo (kg/ladrillo)

El esfuerzo de intersección de ladrillos Salmer y de bóveda es ta dada por la siguiente relación:

$$\sigma_d = \frac{F_T}{100t} = \frac{W_T}{200t} \times \text{Csc} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (\text{Kg/cm}^2) \quad (4.4)$$

Donde:

t = espesor del arco en (cm)

4.1.1.1. Cálculo del peso WT (lineal)(Kg/m)

Para la determinación del peso lineal del techo; previamente se calculará el número de ladrillos que deben entrar en el techo en base al dimensionamiento térmico. Para lo cual planteamos la tabla, (4.1); que a continuación aparece con las dimensiones térmicas del horno.

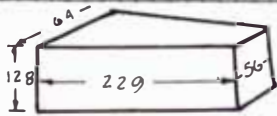
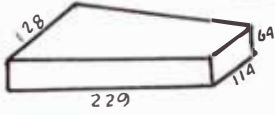
TABLA 4.1

ANCHO	LARGO
2740	6100

\* Valores dados en mm.

También se elaborará la tabla (4.2); donde figuren las dimensiones de los ladrillos refractarios, según sus características y diensiones.

TABLA 4.2

TIPO	CARACTERISTICAS
CUNA 1 - x	
LLAVE N° 1	

La cantidad de ladrillos esta determinado por la relación que a parece a continuación.

$$N_e = \left( \left( \frac{S}{2 \times \text{sen}42} + L_{LA} \right) \frac{84 \times \pi}{180} \right) / A_s \quad (4.5.a)$$

$$N_e = \left( \frac{274}{2 \times \text{sen}42} + 299 \right) \times 84 \times \pi / 180 \times 64$$

$$N_e = 54 \text{ Ladrillos} \quad (4.5)$$

Per tanto el ancho del ladrillo en la parte inferior de la bóveda es:

$$A_i = \left( \frac{S}{2 \times \text{sen}42} \right) \times \frac{84 \times \pi}{180} / N_e \quad (4.6.a)$$

$$A_i = \left( \frac{274}{2 \times \text{sen}42} \right) \times \frac{84 \times \pi}{180} / 54$$

$$A_i = 56 \text{ m.m.} \quad (4.6)$$

Donde:

$N_e$  = Número de ladrillos

$L_{LA}$  = Longitud de ladrillo

$A_s$  = Ancho mayor

$A_i$  = Ancho menor

De acuerdo a las fórmulas (4.1) y (4.4) tenemos que:



$$WT = \frac{Ne \times w}{L} \quad (4.7)$$

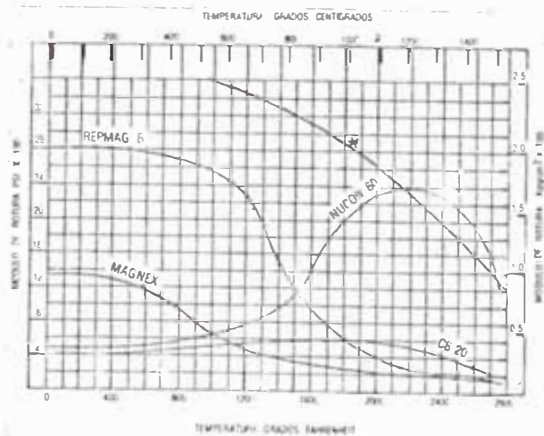
$$WT = \frac{54 \times 3.43}{0.128} = 1447 \text{ kg/m.}$$

$$d = \frac{WT}{200t} \times \text{Cosec}(\theta/2) \quad (4.8)$$

$$d = \frac{1447}{200 \times 22.9} \times \text{Cosec}(\theta/2)$$

$$d = 0.4722 \text{ kg/cm}^2$$

Este valor es mucho menor que cualquier esfuerzo de rotura a la compresión de cualquier ladrillo refractario para ello observar el gráfico de la fig. (4.3)



✱ Repsa Anchor

Fig. 4.3

Motivo por el cuál, el ladrillo preseleccionado para el diseño térmico es un ladrillo que cumple con los requisitos térmicos y de resistencia. El ladrillo seleccionado para la bóveda es entonces el Anchor Repsa (60%  $Al_2O_3$ ).

Las dimensiones aparecen en el plano (N°6).

#### 4.1.2. Diseño de paredes

Generalmente las paredes del horno de fusión originan menos problemas que los techos y soleras. Sin embargo estas paredes pueden agrietarse, ceder, quemarse o derrumbarse, motivo por el cual se mencionará las averías más frecuentes y sus soluciones.

Las paredes muy altas o largas de hornos de alta temperatura; la dilatación de las paredes internas, tiene una dilatación relativamente mayor que la externa. En los hornos grandes hay que instalar juntas de dilatación entre los ladrillos tal como muestra la fig. (4.4); otra forma de evitar que las paredes del horno se pandean hacia adentro, se construyen las paredes en forma cóncava en la zona de calor.

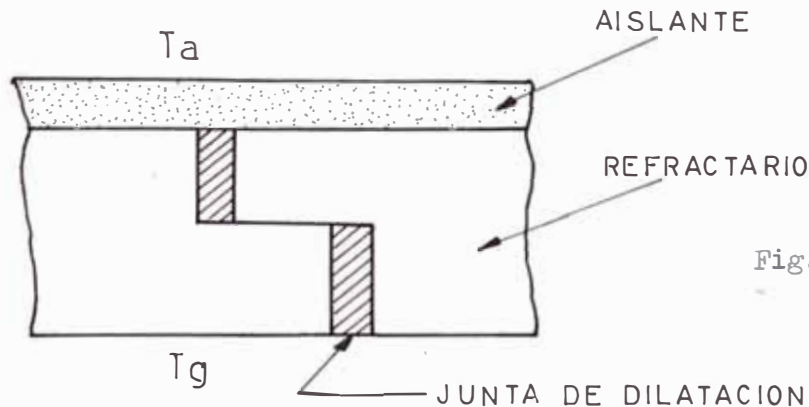


Fig. (4.4)

La tendencia al pandeo de las paredes también disminuye, uniendo los ladrillos refractarios entre sí por enlaces, el espesor de la pared debe aumentar con la extensión de la pared sin soportar. En hornos de alta temperatura se usan ladrillos de 115 m.m. hasta 1 m. de largo o altura, cada apoyo; de 228 m.m. a 1.8 m. por apoyo; y de 340 m.m. por apoyo a 3 m. En el caso del horno dimensionado térmicamente se ha obtenido que la pared es de la configuración que se muestra en la fig. (4.5); donde observamos que los ladrillos refrac-

tarios han sido recubiertos por ladrillo rojo, de manera tal, que estos actúan como aislantes.

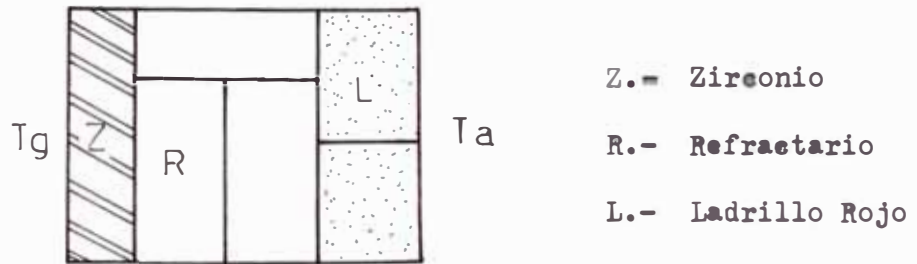
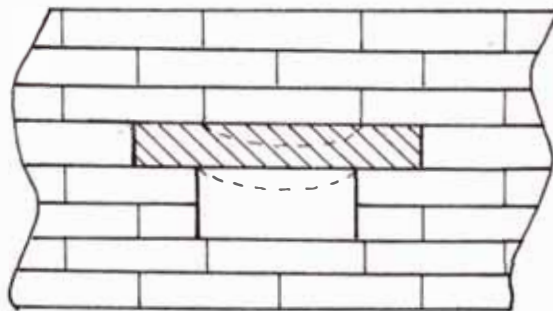


Fig. 4.5

Generalmente las paredes laterales se sujetan por su parte superior, lo que evita su caída en el interior del horno, ya que el empuje del arco de la bóveda presiona el Salmer contra la viga de amarre y por efecto de la pared mantiene ésta en su posición.

Las aberturas de las paredes para los ductos de los gases (chimenea), donde los gases entran a unos 1350°C a 1450°C. Es un motivo bastante serio ya que esto, flexa las lazas del canal de humos Fig. (4.6)



La resistencia a la fluencia en caliente de los ladrillos refractarios corrientes es muy débil a estas temperaturas. En consecuencia la losa se flexa bajo su propio peso y el de la pared situada encima

y el conducto de humos se cierra poco a poco. Como parece natural ' este se podría solucionar empleando ladrillos de calidad superior tales como los ladrillos con alto contenido de alúmina, pero sin embargo resulta un fracaso intentar usar este tipo de ladrillo debido a que esto tiene una dilatación rápida a temperatura por debajo de los 556°C. Esta dilatación impide también la correcta unión de estos ladrillos con los refractarios normales, pues en el primer calentamiento estas se agrietan.

La tensión de la loza que muestra la fig. (4.6); se suprime si se sustituye por arco doble o arco liso, tal como muestra las fig. (4.7) y (4.8); pero incluso estos tipos de arcos pueden ceder a la acción del calor. Lo cual para el mismo tenemos que utilizar ladrillos de calidad superior.

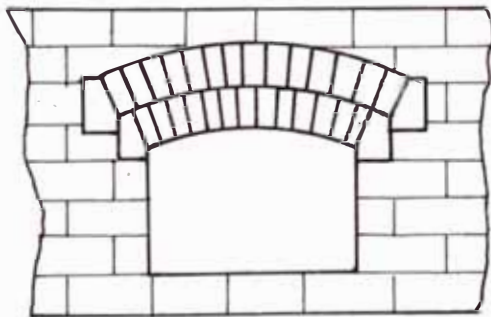


Fig. 4.7 ; doble arco

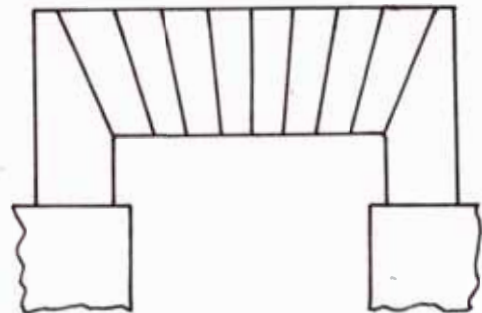


Fig. 4.8 arco liso

#### 4.1.2.1. Cálculo de fuerzas en la pared

Para efectuar este cálculo se graficará las fuerzas que actúan sobre la pared, determinando estas en su punto más crítico. Para ello ver la Fig. (4.9).

Donde los valores de las fuerzas que actúan sobre la pared son dadas por los siguientes valores y ecuaciones:

$$WT = 723 \text{ (kg/m)}$$

Ver ecuación (4.7)

$$WP = \frac{Ne \times w}{L} \quad (\text{kg/m})$$

Peso de pared/m.

$$F = \int_0^1 \gamma' x y x \, dy \quad (\text{kg/m})$$

Fuerza producida por peso de vidrio fundido.

$$FR = \mu \times (W_T + W_P)$$

Fuerza de rozamiento entre la ladrillos.

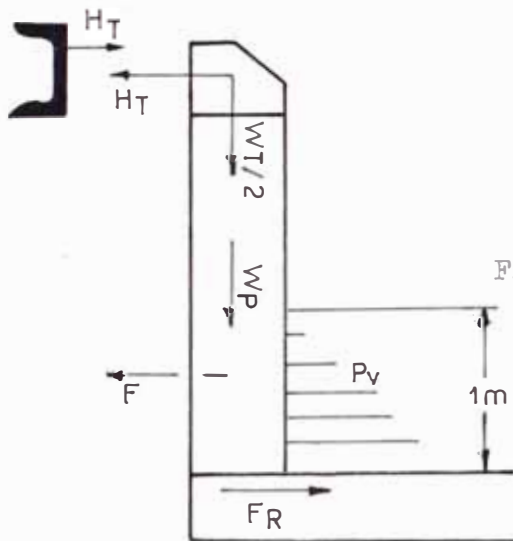


Fig. 4.9 Distribución de fuerza en la pared de los ladrillos refractarios de la pared.

4.1.2.2. Cálculo del peso de pared por metro lineal WP

$$WP = \frac{Ne \times w \times a}{L} \quad (4.9)$$

Donde:

Ne = H/e

Número de ladrillos

H = 2.53

Altura del horno (m)

e = 0.064

Espesor del ladrillo (m)

w = 3.34

Peso de cada ladrillo (Kg)

L = 0.229

Longitud del ladrillo (m)

a = 2

Número de ladrillos por pared

Luego:

$$WP = \frac{(2.53/0.064) \times 3.34}{0.229} \times 2$$

$$WP = 1153.13 \text{ Kg/m}$$

4.1.2.3. Cálculo de la fuerza ejercida

por la presión del vidrio F (kg/m)

Esta fuerza se calcula en la primera fila de los ladrillos. Ya que esta zona es la más crítica.

$$F = \int_b^a \gamma \times y \times dy \times 1 \quad (4.1)$$

Donde:

$$b = (1 - 0.114)$$

Altura al primer ladrillo

$$a = 1$$

Altura del vidrio fundido

$$\gamma = 2.220$$

Peso específico (kg/m<sup>3</sup>)

$$F = \frac{2,220 \times 1^2}{2} - \frac{2220 \times 0.886^2}{2}$$

$$F = 229 \text{ kg/cm}$$

4.1.2.4. Cálculo de la fuerza friccional

entre ladrillos FR

$$FR = (WT/2 + WP) \times \mu \quad (4.11)$$

Donde:

$$\mu = 0.3$$

Coefficiente friccional del la  
drillo.

$$WT/2 = 723$$

Peso del techo kg/m

$$WP = 1153$$

Peso de pared kg/m

Luego:

$$FR = (1153 + 723) \times 0.3$$

$$FR = 563 \text{ Kg/m}$$

Como esta última fuerza es mayor que la fuerza ejercida por la presión del vidrio ( $FR > F$ ); entonces esto significa que la pared para las dimensiones, halladas térmicamente no necesita ningún refuerzo adicional.

#### 4.1.2.5. Cálculo de la resistencia de aplastamiento del ladrillo refractario de la pared.

El cálculo del valor del aplastamiento del ladrillo refractario nos obliga hacer uso de la gráfica de la fig. (4.3); con el fin de poder determinar si el esfuerzo de aplastamiento del ladrillo refractario diseñado para las paredes laterales esta dentro del esfuerzo real del mismo; a la temperatura promedio en que se encuentran las paredes (  $165^{\circ}\text{C}$  )

#### 4.1.1.6. Cálculo del esfuerzo de aplastamiento de diseño $\sigma_d$ (kg/cm<sup>2</sup>)

La relación para este cálculo esta dada en función de los pesos

de techo y pared que actúan en la base de esta última y el espesor de la misma. Tal como aparece a continuación

$$\sigma_d = \frac{WP + WT/2}{100 \times t} \quad (4.12)$$

Donde:

WP = 1153.13	Peso de pared kg/m
WT/2 = 723.00	Peso de techo kg/m
t = 22.9	Ancho de pared cm.

Luego:

$$\sigma_d = \frac{1153.13 + 723}{29.9 \times 100}$$

$$\sigma_d = 0.82 \text{ kg/cm}^2$$

Según la figura (4.3); donde se gráfica los esfuerzos de aplastamiento y la tabla (4.3); donde aparece la composición y tipo de ladrillo a temperatura de fusión. Obtenemos que para un ladrillo Silico aluminoso al (50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) el esfuerzo de aplastamiento es, ( $\sigma_a = 1.2 \text{ kg/cm}^2$ ); a una temperatura de 1450°C

La temperatura de fusión para este tipo de ladrillo es de 1875° C. Lo que el valor anterior lo podemos considerar como adecuado. Y, además se podrá observar que este valor es mayor que el diseño.

$$\sigma_a > \sigma_d$$

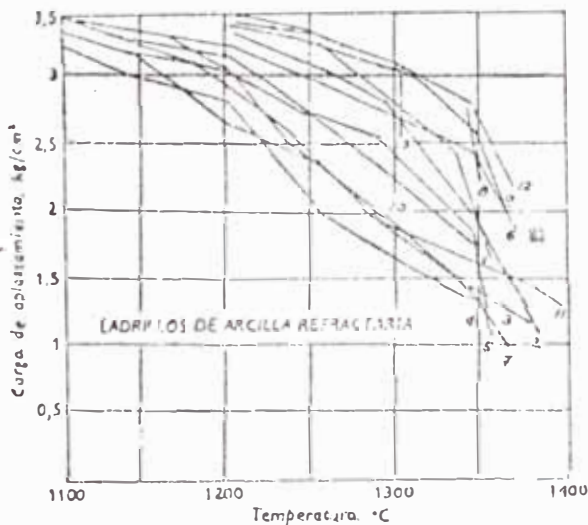
Lo que indica que el tipo de ladrillo para fabricar las paredes



del horno es el silice aluminoso aluminoso al 50% (en Repsa el anchor 50).

#### 4.1.3. Diseño de solera

Para el tipo de horno seleccionado (el de cuba); las soleras cumplen dos funciones; la de resistir la carga y la de aislar esta del medio ambiente, sin producir mucha pérdida de calor. Pero estas dos funciones que deben cumplir las soleras, se ven restringidos por la temperatura; ya que a mayor temperatura menor resistencia y duración de los ladrillos refractarios. Siendo la temperatura exterior de la solera máxima recomendada de 35°C.



- 1.- Arcilla refractaria de calidad inferior.
- 2.- Arcilla refractaria de calidad elevada.
- 3.- Ladrillo de arcilla refractaria de baja calidad.
- 4.- Ladrillo de arcilla refractaria de alta calidad.
- 5.- Ladrillo de caolin.
- 6.- Ladrillo aluminoso 50%
- 7.- Ladrillo aluminoso (de Silimanita) 60%.
- 8.- Ladrillo aluminoso (mullita) 70%.
- 9.- Ladrillo aluminoso 80%
- 10.- Ladrillo de sílice
- 11.- Magnesita totalmente - Calcinada
- 12.- Cromita.

Fig. 4.11

Resistencia al aplastamiento en función a la temperatura para diferentes calidades de ladrillos refractarios.



4.1.3.1. Cálculo de la resistencia del ladrillo refractario de la solera

El cálculo de resistencia mecánica de la solera se efectuará teniendo en cuenta, que el mayor esfuerzo es producido debido a los esfuerzos flectores, producidos por la carga del vidrio fundido. Para efecto de este cálculo, es importante hacer notar que toda la solera, ha sido supuestamente cargada por vidrio fundido. Ver fig. (4.10) la cuál muestra el ancho del horno y la cantidad de apoyos. Que deben soportar a la solera y a la carga.

Para determinar el número de apoyos se ha tomado en cuenta la recomendación hecha por la referencia (R.6); el cuál dice que la longitud máxima entre estas no debe ser mayor de 300 m.m.

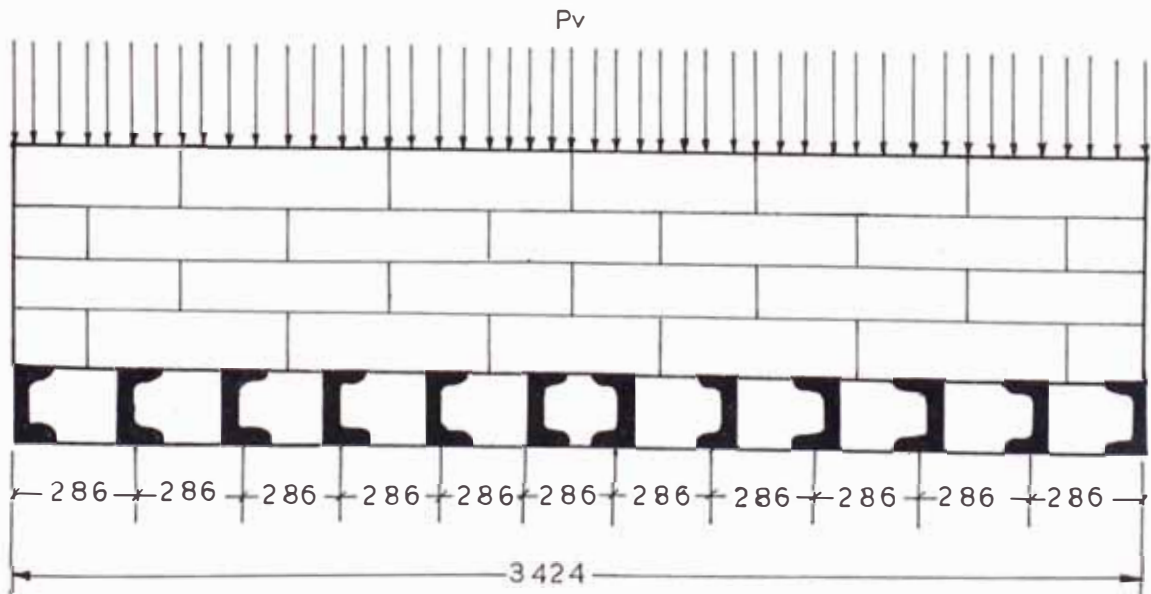


Fig. 4.12

Disposición de los Apoyos de la Solera y del peso del vidrio

La disposición elegida para el cálculo del espesor de la solera aplicando el teorema de momentos al piso del horno que se encuentra apoyada sobre vigas canal, tal como muestra la figura 4.10; obtenemos

los valores de las reacciones y momentos. Tal como aparecen en la tabla (4.4)

TABLA 4.4

$R_0$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
$0.394P_1$	$1.134P_1$	$0.964P_1$	$1.009P_1$	$0.997P_1$	$1.000P_1$	$0.999P_1$
$M_0$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
0	$0.106P_1^2$	$0.077P_1^2$	$0.085P_1^2$	$0.083P_1^2$	$0.083P_1^2$	$0.083P_1^2$

$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$	$R_{11}$	$R_{12}$	$R$
$1.000P_1$	$1.997P_1$	$1.009P_1$	$0.964P_1$	$1.134P_1$	$0.394P_1$	
$M_7$	$M_8$	$M_9$	$M_{10}$	$M_{11}$	$M_{12}$	
$0.083P_1^2$	$0.083P_1^2$	$0.085P_1^2$	$0.077P_1^2$	$0.106P_1^2$	0	

A continuación se elaborará el diagrama de momentos flectores, figura ( 4.13 ); en el cual se visualizará el de mayor intensidad.

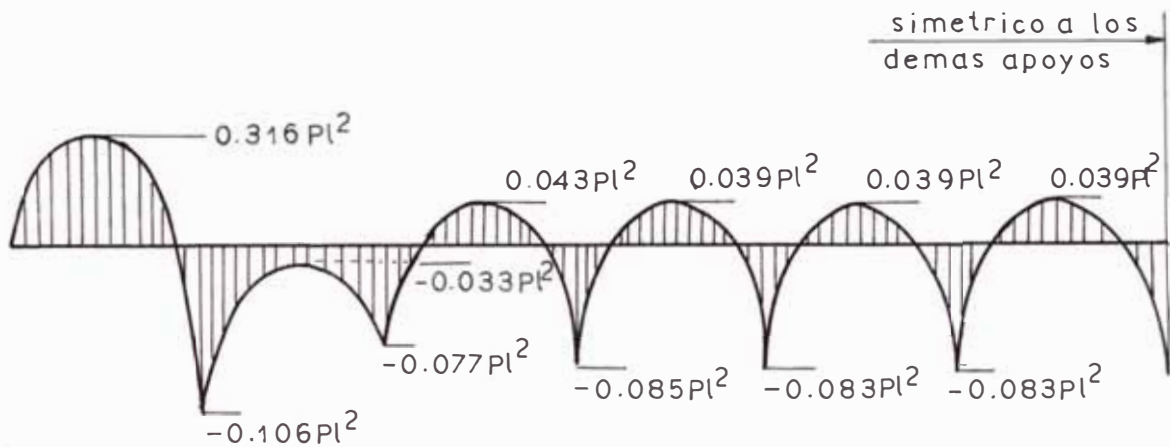


Fig. 4.13

Diagrama de momento flector  
del Piso de solera.

De acuerdo a la tabla (4.4); y las figuras (4.12) y (4.13); nos permitirán determinar el esfuerzo flector en su punto más crítico; para tal efecto usaremos las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_d = \frac{M \times h/2}{I}$$

Reemplazando:

$$\sigma_d = \frac{0.316Pl \times hr/2}{hr^3 \times b/12 \times 1000} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Donde:

$$P = (\gamma_v \times h_v + \gamma_r \times h_r)$$

P = Carga sobre solera (kg/m<sup>2</sup>)

$\gamma_v$  = Peso específico del vidrio (kg/m<sup>3</sup>)

$h_v$  = Altura del vidrio; aproximadamente igual a 1 (m)

$\gamma_r$  = Peso específico del refractario (kg/m<sup>3</sup>)

$h_r$  = Altura del refractario (m)

$b$  = 1; ancho del elemento analizado (m)

$$\sigma_d = \frac{(2220 \times 1 + 2240 \times h_r) \times 0.316 \times 0.286 \times 6}{h_r^2 \times b \times 10000}$$

Considerando que  $h_r$ ; tiene 3 hileras de ladrillo refractario '  
( $h_r = 0.315$  m).

$$\sigma_d = 0.457260 \text{ kg/cm}^2.$$

Comparando con el esfuerzo de rotura por aplastamiento o compresión tenemos que:

$$\sigma_c = 1.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ a } 1450^\circ\text{C}$$

$$\sigma_d < \sigma_c \times F$$

Luego:  $0.45726 < 1.2 \times 0.45$

Donde:

$F = 0.45$ ; Factor según normas Mexicanas.

Luego: La altura de solera

$$h_r = 0.315 \text{ m.}$$

#### 4.2. Cálculo de la estructura

En el caso de nuestro horno, las paredes laterales estará sostenida por dos vigas horizontales que sostienen, tanto a las paredes como el techo del horno; estas vigas se encuentran ubicadas en la parte superior del horno; las cuáles a su vez son soportadas por cuatro vigas verticales y dos tepladores superiores y dos inferiores; estos últimos prácticamente serán los que soporten las fuerzas producidas, por el peso del techo y los de dilatación.

Debido, a la disposición de la planta con el fin de utilizar el horno en producción en serie; se vio por conveniente que este trabajo en desnivel; de manera que en una zona superior operen las máquinas, para fabricar utensilios y en la inferior la máquina que va producir vidrio plano.

Con el fin de tener una idea mas clara de la disposición de la estructura del horno, se elaborará el esquema, fig. (4.14); la cuál muestra además algunas dimensiones.

#### 4.2.1. Cálculo de los tirantes y de las vigas soporte

Debido ha que en la bóveda hay una combinación de fuerzas producidas por el peso y la dilatación térmica, esta se hace unas tres veces estática ente indeterminado.

Per lo que supondremos en el peor de los casos, que la línea de fuerza de la bóveda planteada en la sección 4.1.1., toma la posición que aparece en la fig. ( 4.15 ); lo que indica que las fuerzas producidas por la dilatación están comprimiendo a los ladrillos en una zona inferior a la línea central del arco. Pero el desplazamiento de la línea de fuerza en el arco es incierto y varía no solamente con la temperatura, sino también con el estado de la superficie de los

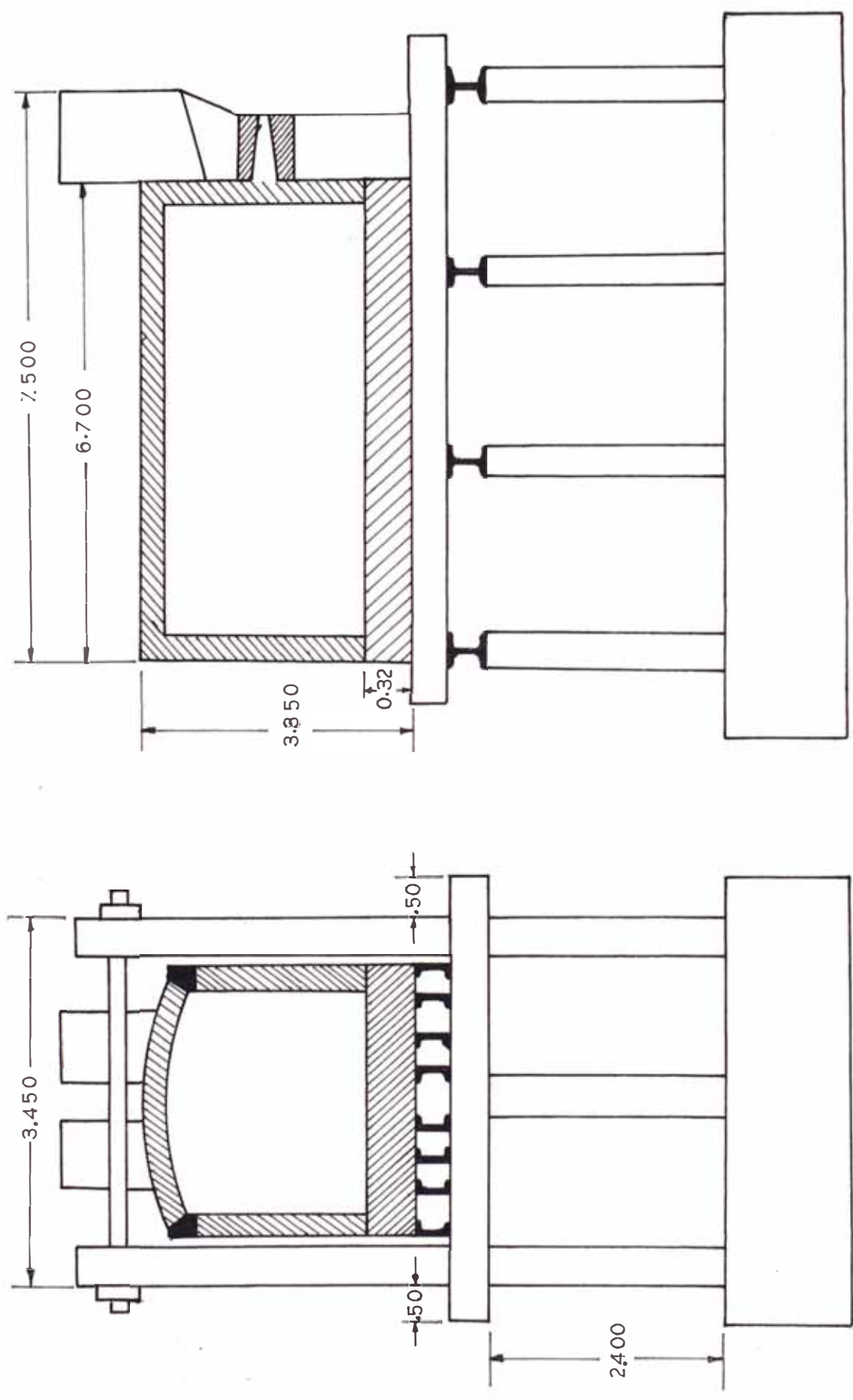


Fig. 4.14



ladrillos, es decir si este se encuentra en su estado elástico o plástico. Por tal razón, se hará una hipótesis al respecto; de que las líneas de fuerza central tiene que ser afectada por un factor, que dependerá de la temperatura interior de la bóveda, para el cálculo de la línea de fuerza real.

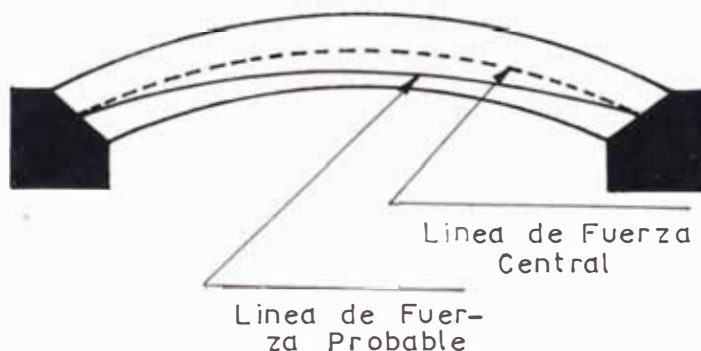


Fig. 4.15

Los factores que afectan al cálculo ideal, es decir la influencia de la dilatación están dadas en la tabla ( 4.5 ); estos valores han sido recopilados de la referencia ( R.6 ); página 312.

TABLA 4.5

Factores de Fuerza

TEMPERAT. °C	87°	87° T 1100	1100 T 1315
FACTOR	2	2.5	3.5

Por lo que el valor de la fuerza que tienen que soportar los tirantes y los parantes del horno, ver fig. ( 4.16 ), está dado por la

ecuación ( 4.15 )

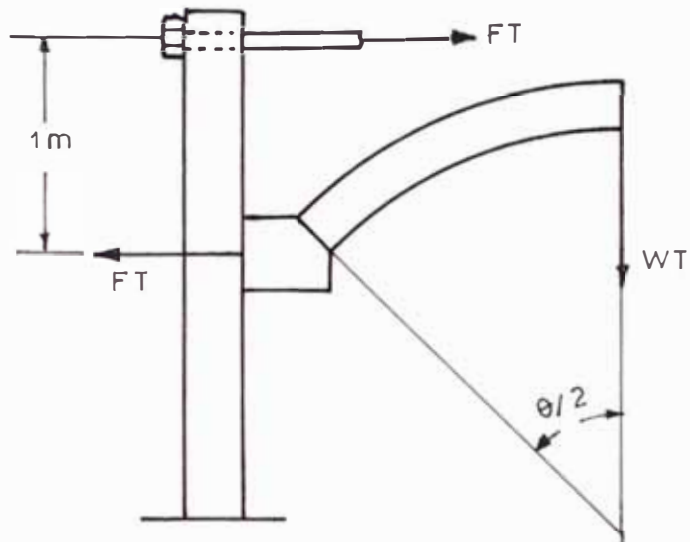


fig. (4.16)

$$FT = \frac{WT}{2} \times \text{Cotg.}(\theta/2) \times \text{FACTOR} \times \frac{L}{2} \quad (4.15)$$

Donde:

F'T = Fuerza real del tirante ( kg )

WT/2 = Peso del techo = 1447 (kg/m) \*

$\theta$  = Angulo del Salmer = 84° (grado) \*

L = Longitud del horne ( m )

Luego:

$$F'T = \frac{1447}{2} \times \text{Cotg.}(84/2) \times 3.5 \times 1/2 \times 6.7$$

$$FT = 8483 \text{ kg.}$$

#### 4.2.1.1. Cálculo del diámetro del tirante

El esfuerzo del acero a tracción, ( A-36 ); según normas AISC,

\* Valores establecidos en la sección ( 4.1.1.1 )

es de, ( $\sigma_t = 2566 \text{ kg/cm}^2$ ); por lo que el diámetro de este tirante será de:

$$d = \sqrt{\frac{4 * FT}{0.75 * t * \pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 * 8483}{0.75 * 2566 * \pi}}$$

$$d = 2.36 \text{ cm.}$$

Para tirantes usar:

4 fe de  $\phi = 1'' \times 3.60 \text{ m.}$  de acero estructural ( A-36 ).

4.2.1.2. Cálculo de las dimensiones de la viga parante (Vertical)

Esta viga soporta las cargas que produce el techo del horno y la fuerza de reacción del tirante en sus ejes horizontales y en su eje vertical su propio peso, ver fig. ( 4.17 ).

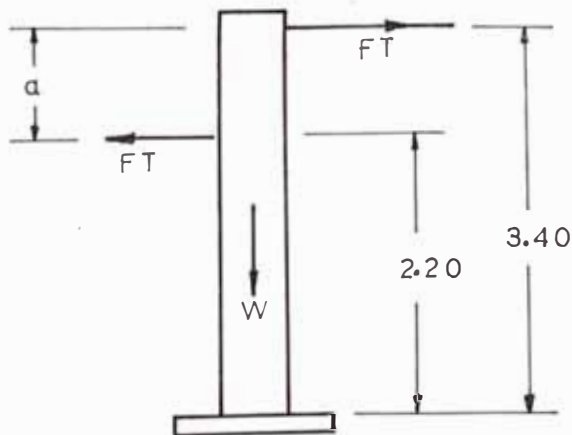


Fig. (4.17)

La viga en la parte inferior de su base soportará un esfuerzo de flexo compresión, la cuál cumple la siguiente relación.

$$\sigma_{fc} = \frac{P \times L}{A} + \frac{M}{Z} \quad (4.16)$$

$$M = FT \times a$$

Para determinar las fuerzas que resiste cada parante vertical se tuvo que calcular estos, haciendo uso del teorema de tres momentos, para ello haremos uso de la fig. ( 4.18 ) y; de acuerdo a la aplicación del teorema, también se procedió a elaborar la tabla ( 4.18 ).

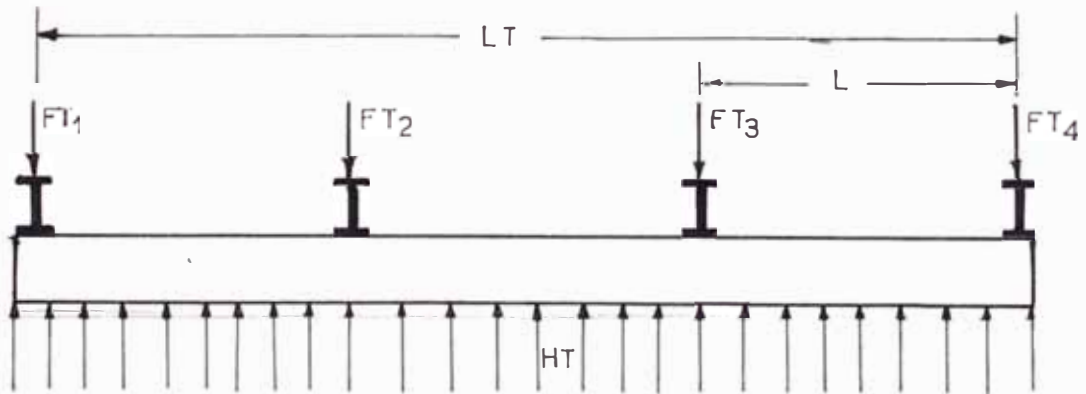


Fig. 4.18

Donde el valor de HT, está dado por la siguiente ecuación:

$$HT = \frac{WT}{2} \times \cot. (\theta/2) \times \text{Factor} \quad (4.17)$$

$$HT = \frac{1447}{2} \times \cot.(42) \times 3.5$$

$$HT = 2812 \text{ (kg/m)}$$

Es importante también observar que el valor de "L" es:

$$L = LT/3 = 6.70/3$$

$$L = 2.23$$

Luego en la tabla (4.6); aparecen los siguientes resultados:

TABLA 4.6

FT <sub>1</sub>	FT <sub>2</sub>	FT <sub>3</sub>	FT <sub>4</sub>
Kgr	Kgr	Kgr	kgr
2508	6897	6897	2508

De acuerdo a estos resultados, determinaremos el esfuerzo de diseño planteado en la ecuación ( 4.16 ).

Previamente supondremos que se ha elegido, para este cálculo una viga, 8WF40; la cuál tiene los siguientes valores; obtenidos de la tabla B.2. de la Ref. pag. 375. (R-4)

$$P = \text{Peso unitario} = 60 \text{ kg/m}$$

$$A = \text{Area de sección transversal} \quad L = 1.82 \text{ cm}^2$$

$$Z = \text{Módulo de flexión} = 581.74 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{fc} = \frac{60 \times 3.40}{1.82} + \frac{6897 \times 1.2 \times 100}{581.74}$$

$$\sigma_{fc} = 1534.7 \text{ kg/cm}^2.$$

Como el acero de estas vigas van a ser del tipo ( A-36 ); entonces su resistencia a la tracción  $\sigma_t = 2566 \text{ kg/cm}^2$ .

Luego:

$$\sigma_{fc} < 0.6 \sigma_t$$

Lo que implica que las vigas parantes a usar serán del tipo elegido, es decir usar:

8 Vigas 8WF40 x 3.86 (m)

4.2.1.3. Cálculo de las vigas de  
Soporte de solera

Las vigas que mayor carga soportan practicamente son la R<sub>0</sub> y R<sub>12</sub>; la ubicación de estas vigas aparece en la fig. (4.14); de la sección 4.1.1.3. Las cargas soportan estas son las de pared lateral y techo:

$$R_0' = R_{12} = WP + WT/2 + R_0 \quad (4.18)$$

Donde:

WP = 0.342 x 1 x 3 x 2,200	1504 kg/m
Peso de Pared.	
WT = Peso del techo	724 kg/m
R <sub>0</sub> = Resistencia en el apoyo "0"	<u>322 kg/m</u>
RT = Fuerza Unitaria Total	2550 kg/m

La viga de solera esta soportada por cuatro apoyos a lo largo del horno; fig. ( 4.19 ). Con el fin de no tener luces grandes entre apoyos; lo cual evitará, que para vigas mas ligeras, estas se flexen menos. Evitando de esta manera, que el horno sufra menos esfuerzos por deformación de la estructura.

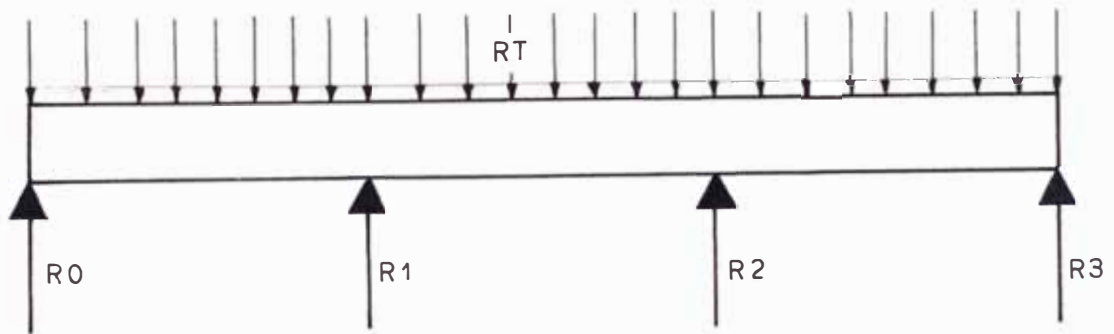


Fig. 4.19

Aplicando el teorema de los tres momentos obtenemos los siguientes valores de reacción ver tabla (4.7) y las siguientes ecuaciones:

R <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>
$4Pl/10$	$11Pl/10$	$11Pl/10$	$4Pl/10$
2040	7013	7013	2040

De acuerdo a los valores de esta tabla, se determina el diagrama de momentos, fig. ( 4.20 )

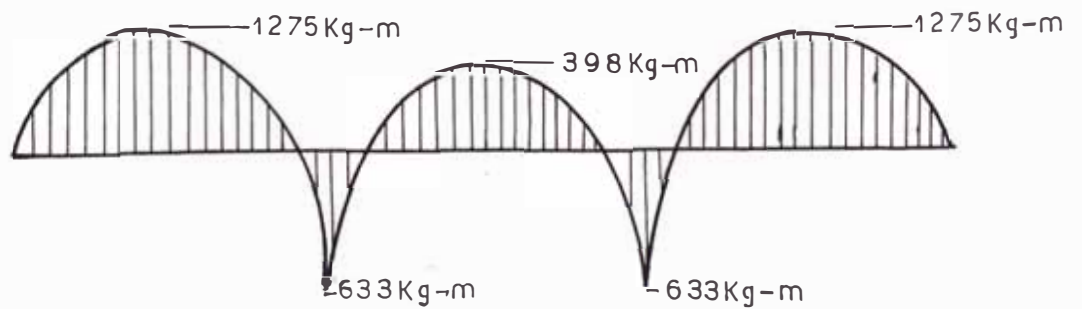


Fig. 4.20

Diagrama de momento de la viga soporte de solera

El momento máximo mayor es de 1275 kg/m; para determinar el esfuerzo que va soportar esta viga, se hará uso de la siguiente relación.

$$\sigma_f = \frac{M}{Z} \leq \sigma_t \times 0.6 \quad (4.19)$$

Por lo tanto, antes de proceder a la aplicación de esta ecuación elegiremos el canal (6 L 13).

Donde:

$$Z = 95.04 \text{ cm}^3$$

Luego:

$$\sigma_f = \frac{1275 \times 100}{95.04}$$

$$\sigma_f = 1336.4 \leq 0.6 \times \sigma_t$$

Por lo tanto usar 13 vigas de acero estructural (A-36); del tipo canal (6 L 13 x 8). Las dimensiones aparecen en el plano (P-5).

#### 4.2.1.4. Cálculo de diseño de los pórticos tipo P3

Según la figura (4.21); tenemos 4 pórticos denominados con la siguiente nomenclatura (P3-1), (P3-2), (P3-3), y (P3-4). Los cuales soportan las cargas del pórtico; cumpliendo la relación siguiente en sus apoyos.



$$RP-1 = RP-4 = 4/10 PL_1 \quad (4.20)$$

$$RP-2 = RP-3 = 11/10 PL_1 \quad (4.21)$$

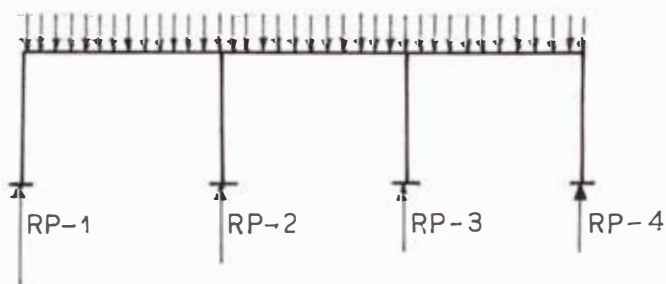


Fig. 4.21

Pórtico - Perfil

A su vez las resistencias RP-2 ó RP-3; la vamos a distribuir a lo largo de la viga de estos pórticos, ver fig. (4.22); teniendo en cuenta que el peso de las paredes y techo son absorbidas por las columnas de la viga y el peso del vidrio es distribuido a lo largo de la viga.

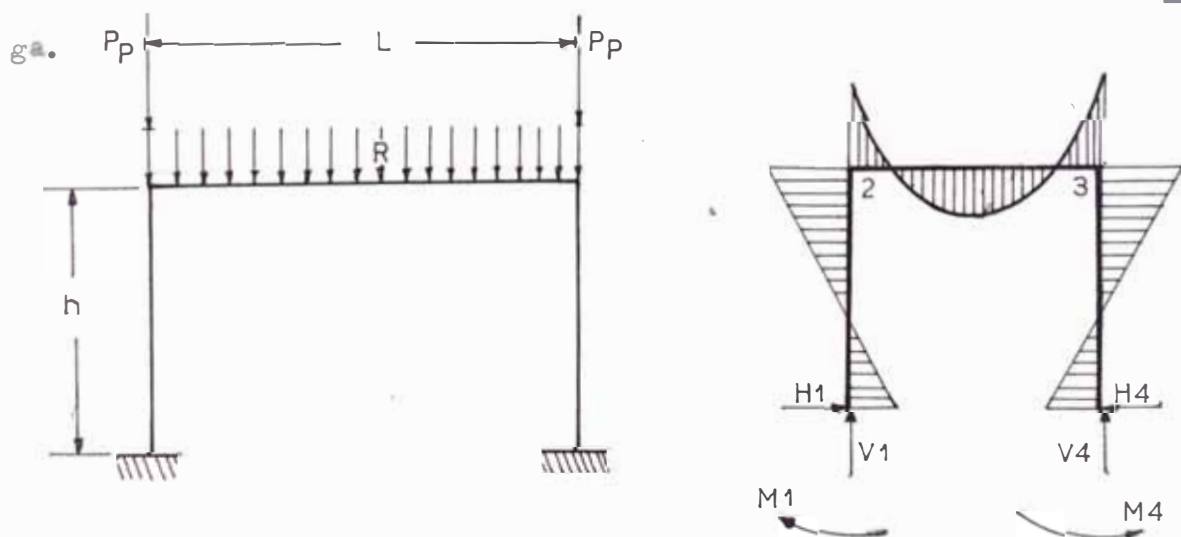


Fig. 4.22

Tipo de pórticos (P3 -2 ó P3-3)

Esto implica que las ecuaciones de momentos están dados por las siguientes ecuaciones:

$$V_1 = V_4 = W/2 \quad \text{Reacción en los puntos ( 1 y 4 )} \quad (4-22)$$

$$M_1 = M_4 = \frac{WL}{2F} \quad \text{Momento flector en 1 y 4} \quad (4-23)$$

$$M_2 = M_3 = -\frac{WL}{F} = -2M_1 \quad \text{Momento flector en 2 y 3} \quad (4-24)$$

$$M_x = \frac{WX}{2} (1 - X/L) + M_2 \quad \text{Momento flector en la viga del pórtico.} \quad (4-25)$$

$$F = 6 \times (2 + 1/\phi) \quad \text{Constante de una estructura} \quad (4-26)$$

$$\phi = \frac{I_{1-2}}{I_{2-3}} \times \frac{L}{h} \quad \text{Constante de la estructura que depende de las propiedades geométricas y físicas de la estructura.} \quad (4-27)$$

Donde:

$$W = \text{Carga uniformemente distribuida} \quad (\text{kg/m})$$

$$L = \text{Luz del pórtico} \quad (\text{m})$$

$$h = \text{Altura del pórtico} \quad (\text{m})$$

$$I_{1-2} = \text{Momento de inercia de columna (1-2)} \quad (\text{m}^4)$$

$$I_{1-3} = \text{Momento de inercia de viga (2-3)} \quad (\text{m}^4)$$

Como se puede observar en la fig. (4.22), el valor de PP y PV; tienen los siguientes valores.

$$PP = (h_p \times B_p \times J_r \times 1) + WT/2 \times 11/10 \times L_1 \quad (4-28)$$

$$W = (h_v \times v \times h_s \times J_r \times 1) \times 11/10 \times L_1 \quad (4-29)$$

Donde:

PP	=	Peso pared en la viga del pórtico	(kg)
W	=	Peso unitario a lo largo de la viga del pórtico	(kg/m)
h <sub>p</sub>	=	Altura de pared del horno	(3.35 m)
B <sub>p</sub>	=	Ancho de la pared del horno	(0.343 m)
γ <sub>r</sub>	=	Peso específico del refractario	(2200 kg/m <sup>3</sup> )
L <sub>1</sub>	=	Luz entre pórticos a lo largo del horno	(2.5 m)
γ <sub>v</sub>	=	Peso específico del vidrio	(2220 kg/m <sup>3</sup> )
h <sub>r</sub>	=	Altura del vidrio	(1 m)
WT	=	Peso del techo	(kg/m)
h <sub>s</sub>	=	Altura de la solera	(0.32 m)

Luego:

Reemplazando valores en las fórmulas (4-28) y (4-29) tenemos que:

$$PP = \left[ (3.35 \times 0.343 \times 2200) + 724 \right] \times 11/10 \times 2.5$$

$$PP = 8942.75 \text{ Kg.}$$

$$W = (1 \times 2220 + 0.32 \times 2200) \times 11/10 \times 2.5$$

$$W = 8041 \text{ kg/m}$$

Antes de proceder al cálculo de los momentos que se produce en la viga y columna del pórtico, se elegirá las vigas y columna del pórtico, con el fin de calcular la constante de estructura y constante geométrica y física de estructura.

Se supone que la viga a usar tanto para la columna como para la viga del pórtico usan el mismo tipo de viga; que para nuestro caso '

elegimos a un perfil del tipo 10WF25.

Aplicando las ecuaciones (4.27), (4-26), (4-25), (4-24) y (4-23), obtenemos el diagrama de momentos; para el tipo de viga seleccionada, tal como aparece en la figura (4-23). Siendo los valores de las ecuaciones mencionadas los siguientes:

$$\phi = \frac{3.45}{2.1} = 1.6428$$

$$F = 6 \times (2 + 1/1.6428) = 15.6523$$

$$M_1 = M_4 = 8041 \times 3.45 / 15.623 \times 2 = 887.8 \text{ Kg-m}$$

$$M_2 = M_3 = 8041 \times 3.45 / 15.623 = -1775.6 \text{ kg-m}$$

$$M_{\text{MAX}} (2 - 3) = 8041 \times 3.45 / 4 \times (1 - 1/2) - 1775.6 = 1692 \text{ kg-m}$$

A continuación procederemos a graficar el diagrama de momentos

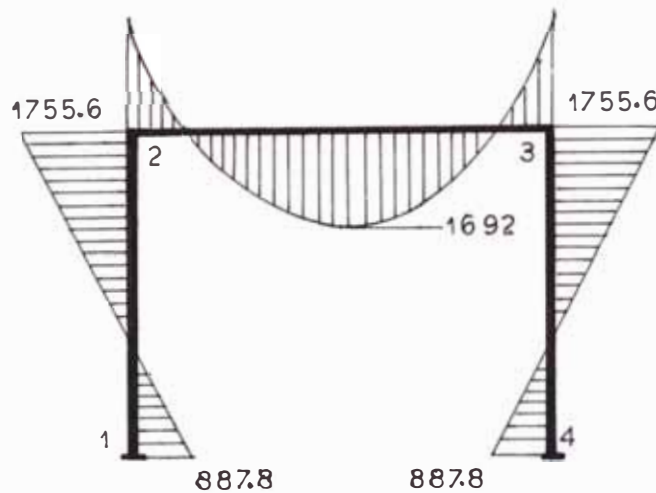


Fig. 4 - 23

Diagrama de momentos del pórtico P3 - 2 ó P3 - 3

Como se observa en la figura anterior, el máximo momento ocurre en los puntos (2 y 3) del pórtico; también de acuerdo a esta se observa que estos pórticos no han sido considerados como simples apoyos de las vigas de soporte de celera, sino que se considerará que trabaja como una viga del mismo pórtico, pero perpendicular a la mencionada, (Ver sección 4.2.1.3.); para determinar el valor de la carga unitaria que actúa sobre esta última viga.

Lo anteriormente mencionado indica que la columna del pórtico va trabajar con un esfuerzo producido por flexo compresión combinado, cumpliendo la siguiente relación:

$$\sigma_{fc} = \frac{PP}{A} + \frac{M_x}{Z_x} + \frac{M_y}{Z_y} \times f \leq 0.6 \times \sigma_t$$

Donde para la viga elegida y seleccionada tenemos que:

$A = 47.41 \text{ (cm}^2\text{)}$	Area de la sección
$Z_x = 432 \text{ (cm}^3\text{)}$	Módulo de flexión
$Z_y = 72.10 \text{ (cm}^3\text{)}$	Módulo de flexión
$M = \frac{2550 \times 2.5}{15.65} \text{ (kg-m)}$	Momento flector
$f = 1.3$	Factor según norma AISC.

Luego:

$$\sigma_{fc} = \frac{8942}{47.41} + \frac{1776 \times 100}{432} + 1.3 \times \frac{2550 \times 2.5 \times 100}{15.65 \times 72.10}$$

$$\sigma_{fc} = 1335 < 0.6 \times \sigma_t$$

Per lo tanto usar pórticos con viga y columnas de 10WF25 x 2.10 x 3.45. Más detalles ver en el plano (P-5).

#### 4.3. Cimentación

La finalidad de la cimentación de un horno es repartir uniformemente sobre el suelo el peso no uniforme del horno. En el caso de este proyecto, el horno no está en contacto directo con la cimentación; esto facilita el diseño de la cimentación, ya que el tratamiento del cálculo para esto es aplicado sin tener en cuenta la transmisión de calor.

El tipo de terreno en la Localidad de Huancayo y zonas aledañas es del tipo sedimentario lo que en forma bastante conservadora elijeremos un terreno con una resistencia de ( $\sigma_t = 4.0 \text{ kg/cm}^2$ ); para este fin se emplea la siguiente tabla (4.8)

TABLA 4.8

TIPO DE TERRENO	RESISTENCIA(kg/cm <sup>2</sup> )
ARENA MOVEDIZA	0 - 2
TIERRA VEGETAL	1
ARENA FINA SECA	2 - 6
TIERRA ARCILLOZA SECA	3 - 4
ARENA COMPACTA	6 - 8
ROCA BLANDA	7 - 15
ROCA DURA	20 - 50
TIERRA SEDIMENTARIA	4 - 9

4.3.1. Ubicación de las cargas  
en la cimentación.

Para este fin se elaboró la fig. (4.24)

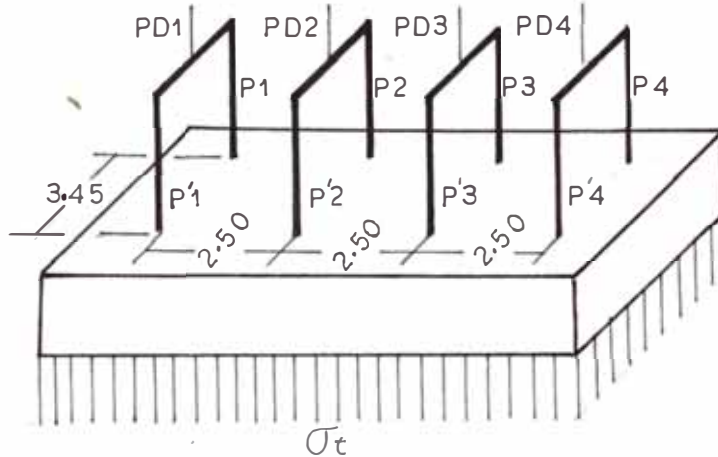


Fig.(4.24)

La cuál muestra la ubicación de las cargas puntuales producidas por el peso del horno y de su estructura. Para la evaluación de estas cargas se distribuirá el peso total sobre los 4 apoyos del horno. Para ello se usará algunos cálculos realizados en las secciones anteriores y otros que serán evaluados en la próxima sección.

4.3.1.1. Cálculo Cargas PP<sub>1</sub> y PP<sub>4</sub>

Estas cargas son debido al peso de la pared posterior y frontal del horno luego el valor de estas cargas está dada por la siguiente relación:

$$W_1 = W_4 = H * B * A * \gamma_r$$

Donde:

- H = Altura del horno (m)
- B = Espesor de la pared (m)
- A = Ancho del horno (m)

Luego:

$$W_1 = W_4 = 3 \times 3.45 \times 0.343 \times 2000 \text{ kg/cm}^3$$

$$W_1 = W_4 = 7100 \text{ kg}$$

4.3.1.2. Cálculo de (PD<sub>1</sub>, PD<sub>2</sub>, PD<sub>3</sub>, y PD<sub>4</sub>)

Cargas en pórticos debido a cargas  
uniformemente distribuidas.

Para este cálculo evaluaremos todas las cargas en base a los pesos unitarios de las paredes laterales, solera y vidrio. Que esta da de por la siguiente relación:

$$W = WP + WS + Wv + WT + WS'$$

Donde:

$$WP = \text{Peso de pared} \quad \text{kg/m}$$

$$WS = \text{Peso de solera} \quad \text{kg/m}$$

$$Wv = \text{Peso del vidrio} \quad \text{kg/m}$$

$$WT = \text{Peso del techo} \quad \text{kg/m}$$

$$WS' = \text{Peso de viga solera} \quad \text{kg/m}$$

Luego:

$$W = (2 \times \gamma_r' \times B_p \times H_p + \gamma_r' \times H_s \times B_s + \gamma_v' \times H_v \times B_v + WT + N \cdot$$

Vigas \* Peso Unit. vigas.)

$$W = (2 \times 2200 \times 0.343 \times 2.73 + 2200 \times 0.32 \times 3.15 + 2220 \times 1 \times 2.74 + 1447 + 13 \times 19.5)$$

$$W = 14,067 \text{ kg/m}$$



Con este valor de carga se procede a calcular las cargas puntuales:

$$P_1 = P_1' = 7100/2 + \left( \frac{4}{20} \times 14067 \times 2.5 \right) + W_{\text{p\acute{a}rtico}/2}$$

$$P_1 = P_1' = 10583 \text{ kg} + 143$$

$$P_1 = P_1' = 10726 \text{ kg.}$$

$$P_2 = P_3 = \left( \frac{11}{20} \times 14067 \times 2.5 \right) + 143$$

$$P_2 = P_3 = 19485 \text{ kg}$$

4.3.2.1. C\`alculo del esfuerzo del Terreno sobre la zapata.

Como podr\`a observarse en la Fig. (4.25); la distribuci\`on de fuerzas sobre nuestro cimiento y el esfuerzo sobre la misma; ha sido idealizada.

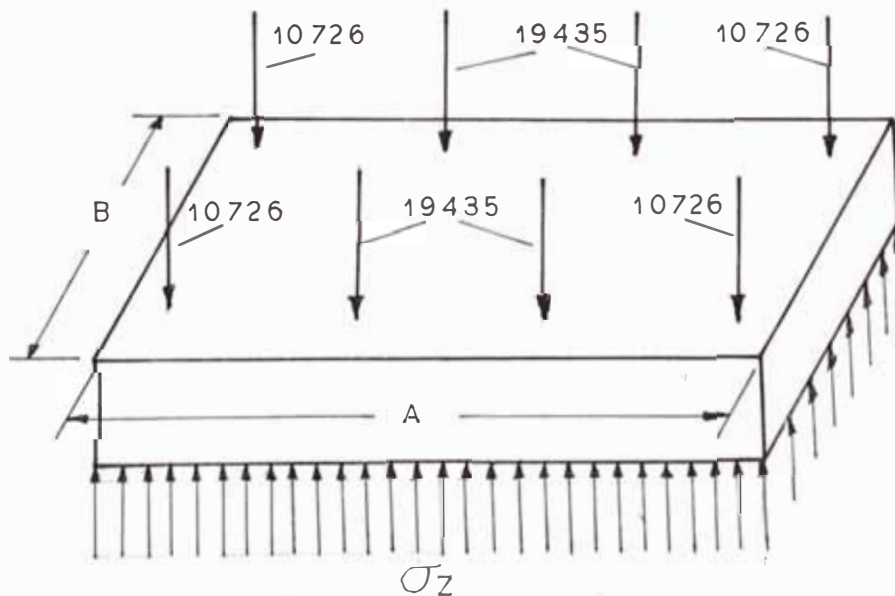


Fig. 4.25

Es importante también observar que la zapata y la distribución de las fuerzas es simétrica por tanto el esfuerzo que ejersiera el terreno cumple con la siguiente relación:

$$\sigma_z = \frac{2WP_1 + 4WP_2 + 2WP_3 + 2WP_4 + PP}{Ar}$$

Donde:

$$PP = 10\% (W \text{ TOTAL})$$

Luego:

$$\sigma_z = \frac{(4 \times 10726 + 4 \times 19485) \text{ kg} + PP}{(7.5 + 1) \times (3.45 + 1) \times 10000}$$

$$\sigma_z = 0.318 \text{ kg/cm}^2$$

De acuerdo a este valor de area, el esfuerzo que se produce en la zapata, es mucho menor que la resistencia del terreno.

$$\sigma_z \ll \sigma_t$$

El esfuerzo que ejerce el terreno sobre la zapata es muy pequeño en lo que respecta a la resistencia del terreno, esto nos permitira hacer un diseño de zapatas individuales; lo cual resultaría inconveniente, debido a que dentro de la planta van existir máquinas que produzcan vibración, perjudicando este último mucho más a la estructura del horno montado sobre un solo cimiento.

#### 4.3.2.2. Diseño de la zapata per momento flector

Los esfuerzos flectores sobre la zapata se producen a todo el largo y ancho de la zapata; es decir que en la zapata se produce un esfuerzo del tipo combinado.

Luego:

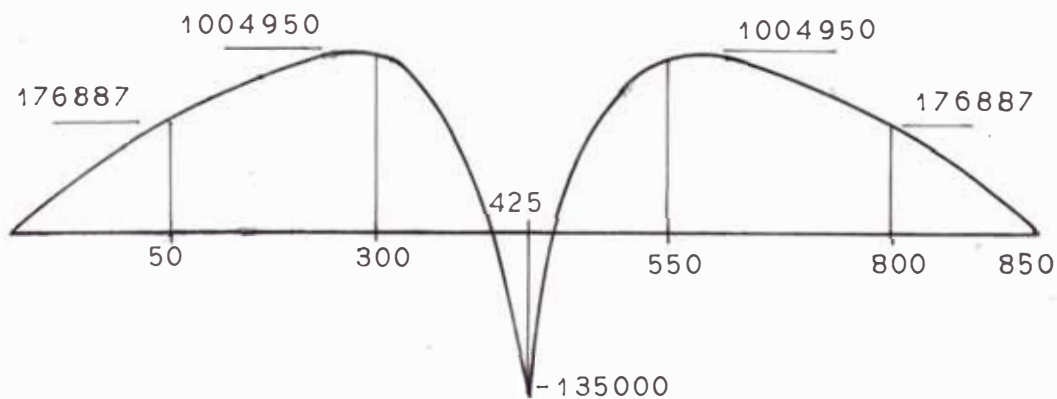
$$M_{xx} = \frac{\sigma t * B * X^2}{2} \quad \text{Si } X \leq 50 \text{ cm}$$

$$M_{xx} = \frac{\sigma t * B * X^2}{2} - P_1 * (X-50) \quad \text{Si } 50 < X \leq 300 \text{ cm.}$$

$$M_{xx} = \frac{\sigma t * B * X^2}{2} - P_1 * (X-50) - P_2 * (X-300) \quad \text{Si } 300 < X < 550$$

#### 4.3.2.3. Diagrama de momentos x - x

De acuerdo a las fórmulas anteriores obtenemos que:



En el diagrama de momentos podemos observar que el momento máximo en el eje x - x es:

$$M_{\text{Max}(x-x)} = 1'004,950 \text{ Kg-cm}$$

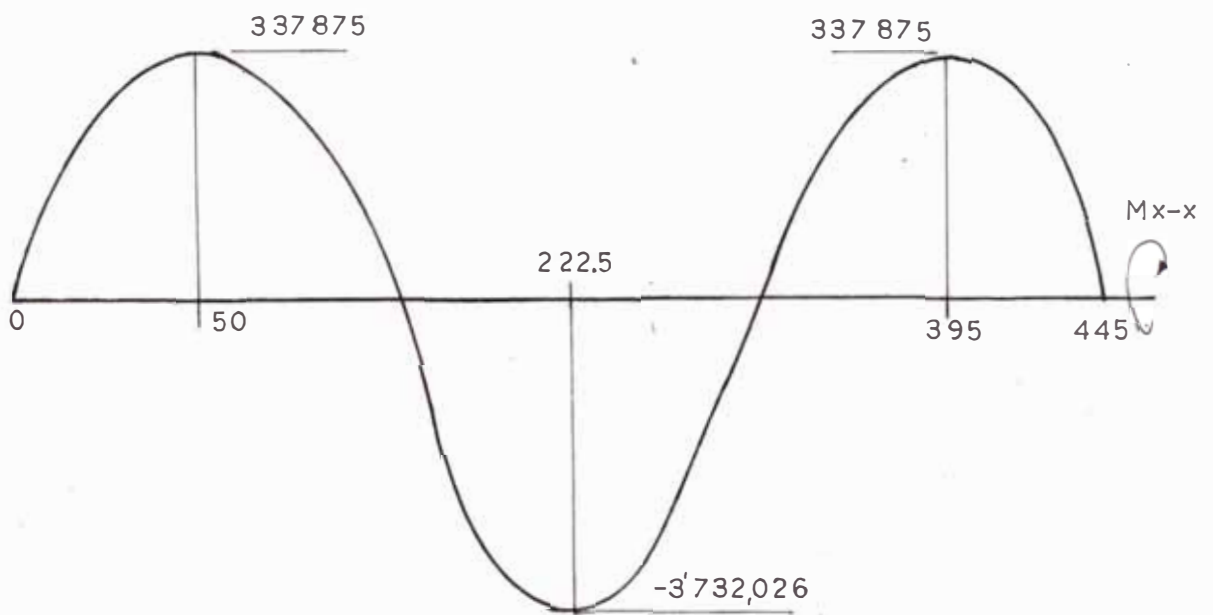
4.3.2.4. Cálculo del momento en el eje (y - y)

En este caso analizaremos los momentos en dirección al eje y-y de la zapata; para lo cual emplearemos las siguientes fórmulas:

$$M_{y-y} = \frac{\sigma_t * A * Y^2}{2} \quad \text{si } Y \leq 50$$

$$M_{y-y} = \frac{\sigma_t * A * Y}{2} - (\sum P) * Y \quad \text{si } 50 < Y \leq 222.5$$

Aplicando estas fórmulas obtenemos el siguiente diagrama de momento.



Luego en el diagrama de momentos observamos que el máximo momento en el eje y-y es:

$$M_{\text{Max}} (y-y) = -3732,026 \text{ kg-cm}$$

4.3.2.5. Cálculo de la altura de momento flexible

En los ~~dos~~ diagramas de momentos se puede observar que el momento máximo predominante esta a lo largo del eje (y-y); para lo cual emplearemos la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{\frac{M_{\text{Max}}(y-y)}{K \times A}} \quad (4.36)$$

Donde :

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.1 \times 10^4}{140 \times 1000} = 15$$

$$K = \frac{1}{1 + f_s/n \times f_c} = \frac{1}{1 + 0.5 \times 2800 / 15 \times 0.45 \times 140} = 0.40$$

$$J = 1 - R/3 = 1 - 0.4/3 = 0.87$$

$$K = 1/2 \times f_c \times R \times j = 1/2 \times 0.45 \times 140 \times 0.40 \times 0.87 = 10.962$$

$$A = 445 \text{ cm.}^2$$

Luego aplicando la ecuación (4.36); tenemos que:

$$d = \sqrt{\frac{3732026}{10.962 \times 850}}$$

$$d = 21 \text{ cm}$$

Luego nuestro elemento tendrá las siguientes dimensiones:

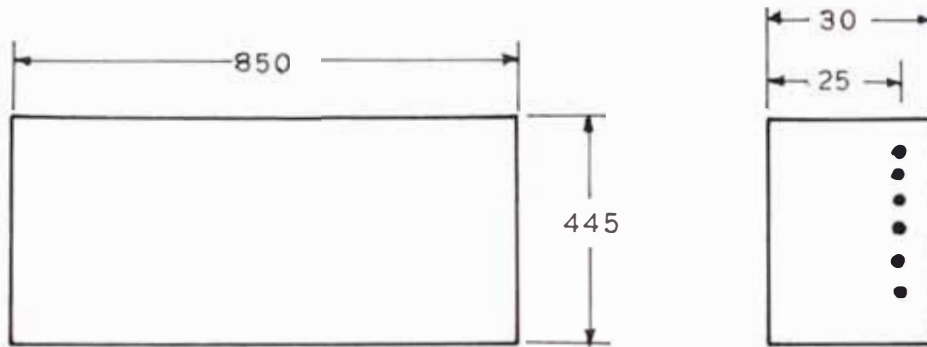


Fig. 4.26

4.3.2.6. Cálculo del área de acero

$$A_{S_{y-y}} = \frac{M_{y-y}}{f_s \times j \times d} \times 0.85$$

$$A_{S_{y-y}} = \frac{3732026}{2100 \times 0.87 \times 25} \times 0.85$$

$$A_{S_{y-y}} = 70 \text{ cm}^2$$

Usar fe  $\phi = 5/8$  por cada 24 cm.; (35 varillas)

$$A_{S_{x-x}} = \frac{M_{x-x}}{f_s \times j \times d} \times 0.85$$

$$A_{S_{x-x}} = \frac{1004950}{2100 \times 0.87 \times 25} \times 0.85$$

$$A_{S_{x-x}} = 18.70 \text{ cm}^2$$

Usar 27 varillas de fe  $\phi = 3/8$  por cada 16 cm.

En el plano (P-6); aparecen las dimensiones y detalles.

#### 4.4. Cálculo del recuperador de calor

Para este cálculo primeramente se planteará el esquema del recuperador y sobre esta forma, se procedera hacer el cálculo del coeficiente pelicular del gas, coeficiente pelicular del aire, las resistencias de las paredes y el cálculo del área promedio de transmisión de calor y el medio logarítmico de la diferencia de temperatura; todos estos parámetros serán calculados para diferentes dimensiones de intercambiador de calor.

Los cálculos de los valores anteriores estan superditados a cálculos obtenidos anteriormente en el capítulo 3; tales como; Temperatura del gas a la entrada del recuperador, temperatura del gas a la salida del recuperador, temperatura del aire a la entrada, temperatura del aire a la salida, y los flujos de masa de aire y gas, lo mismo que el calor que transmite el gas al aire. Los cálculos mencionados al comienzo de la sección, varian de acuerdo a la dimensión del recuperador a diseñar.

Todo lo anteriormente mencionado, indica que se deberá hacer un programa en BASIC, que permita obtener un recuperador; que transmita el calor necesario del gas hacia el aire a calentar. Asi mismo el recuperador debe proporcionar una caída de presión, la menor posible, con el fin que el tiro de la chimenea no sea muy grande. Motivo por el cual el número de REYNOLD, para el recuperador seleccionado estará restringido para flujos turbulentos entre (10,000Re a 50,000Re).

##### 4.4.1. Esquema del recuperador

El recuperador ha plantear va ser de cuerpo simple en el interi

er (zona gas); y de ductos simples para la zona de flujo de aire.  
Ver la fig. ( 4.27 ).

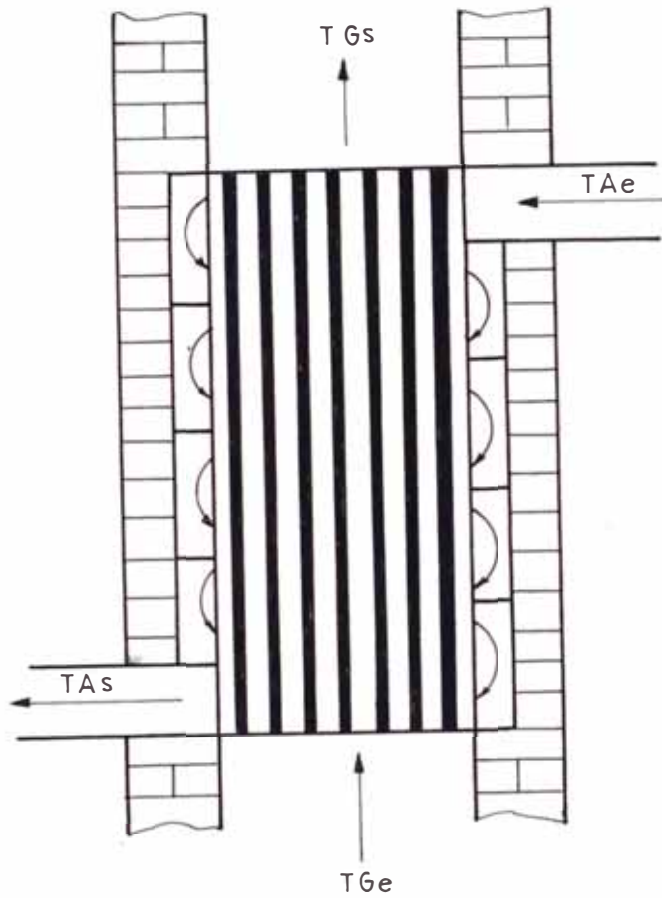


Fig. 4.27 Recuperador de flujo transversal para calentar el aire.

Para este recuperador el circuito equivalente, fig. ( 4.28 ); en este circuito se considera que el flujo de calor hacia el exterior y la pared de la chimenea es adiabático, luego el circuito equivalente, será el siguiente:

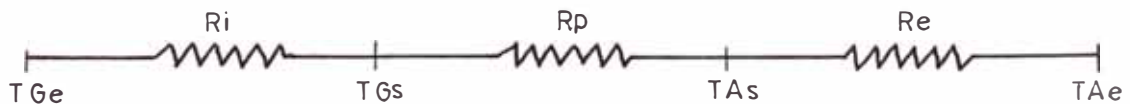


Fig. 4.28 Circuito equivalente de Transmisión de calor del recuperador.



4.4.2. Valores determinados en

Cálculos de Balance Térmico

Los valores de temperatura del gas a la entrada del recuperador, temperatura de salida del gas a la salida del recuperador, temperatura del aire a la salida y entrada del recuperador y lo mismo que el flujo de masa de gas y aire por el recuperador, han sido obtenidos en el Capítulo 3; siendo sus valores los siguientes:

$T_{G_e}$	$1450\text{ }^{\circ}\text{C}$	Temperatura del gas a la entrada del Recuperador
$T_{G_s}$	$= 1049\text{ }^{\circ}\text{C}$	Temperatura del gas a la salida del Recuperador.
$T_{a_e}$	$= 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Temperatura del aire a la entrada del Recuperador
$T_{a_s}$	$= 500\text{ }^{\circ}\text{C}$	Temperatura del aire a la salida del Recuperador.
$M_G$	$= 1394.78\text{ Kg/HR}$	Masa del gas por el recuperador.
$Q_{G-A}$	$= 180198\text{ Kcal/HR}$	Calor transferido del gas al aire.
$M_A$	$= 1326.38\text{ Kg/HR}$	Masa de aire por el recuperador.

Es también importante tener en cuenta, los porcentajes moleculares de los productos de la combustión ya que las propiedades de cada componente tienen valores diferentes; lo cual conlleva a determinar

estos:

$$\%M_{CO_2} = 12/120.74 \times 100 = 9.938\%$$

$$\%M_{H_2O} = 13/120.74 \times 100 = 10.767\%$$

$$\%M_{N_2} = 90.24/120.74 \times 100 = 74.739\%$$

$$\%M_{O_2} = 5.5/120.74 \times 100 = 4.555\%$$

#### 4.4.3. Cálculo del flujo de gases expresado en volumen.

Este cálculo se hace con la finalidad de tener dentro del horno, un flujo estable; lo mismo que nos permitira determinar la velocidad y el número de REYNOLD, para diferentes areas de la sección transversal del ducto de gases en el recuperador. Para tal fin, determinaremos primeramente las presiones relativas en función de sus presiones parciales y presión crítica de cada componente del gas; de igual manera, se calculará la temperatura relativa de cada componente, en función de su temperatura crítica. Para determinar finalmente el volumen de gas; en función del factor de compresibilidad. Siendo éste último calculado en función de los porcentajes moleculares y compresibilidades de cada componente del gas.

##### 4.4.3.1. Cálculo de la presión relativa, Temperatura relativa y compresibilidad relativa.

Para este cálculo tendremos en consideración la presión atmosférica en Huancayo, los porcentajes de cada componente del gas, los porcentajes de cada componente del gas, las presiones críticas y tempera

turas críticas de los mismos; con este fin elaboraremos la tabla 4.9; para tal fin emplearemos las siguientes fórmulas de valores y la gráfica (3.42)

$$(Pr)_{CO_2} = \frac{Y_{CO_2} \times P_A}{(Pc)_{CO_2}}$$

$$(Tr)_{CO_2} = \frac{T}{(Tc)_{CO_2}}$$

$$(Pr)_{H_2O} = \frac{Y_{H_2O} \times P_A}{(Pc)_{H_2O}}$$

$$(Tr)_{H_2O} = \frac{T}{(Tc)_{H_2O}}$$

$$(Pr)_{O_2} = \frac{Y_{O_2} \times P_A}{(Pc)_{O_2}}$$

$$(Tr)_{O_2} = \frac{T}{(Tc)_{O_2}}$$

$$(Pr)_{N_2} = \frac{Y_{N_2} \times P_A}{(Pc)_{N_2}}$$

$$(Tr)_{N_2} = \frac{T}{(Tc)_{N_2}}$$

Donde:

$P_A$  = (ATM)

Presión atmosférica

$Y_{CO_2}$  = (%)

Porcentaje de  $CO_2$  en el gas

$Y_{H_2O}$  = (%)

Porcentaje de  $H_2O$  en el gas

$Y_{O_2}$  = (%)

Porcentaje de  $O_2$  en el gas.

$Y_{N_2}$  = (%)

Porcentaje de  $N_2$  en el gas.

$T$  = ( $^{\circ}K$ )

Temperatura del gas a la salida del horno.

$P(c)_{CO_2} = (ATM)$	Presión crítica del $CO_2$
$(Tc)_{CO_2} = (°K)$	Temperatura crítica $CO_2$
$(Pc)_{H_2O} = (ATM)$	Presión crítica del $H_2O$
$(Tc)_{H_2O} = (°K)$	Temperatura crítica del $H_2O$
$(Pc)_{O_2} = (ATM)$	Presión crítica del $O_2$
$(Tc)_{O_2} = (K)$	Temperatura crítica del $O_2$
$(Pc)_{N_2} = (ATM)$	Presión crítica del $N_2$
$(Tc)_{N_2} = (K)$	Temperatura crítica del $N_2$
$Z_{CO_2} =$	Factor de compresibilidad del $CO_2$
$Z_{H_2O} =$	Factor del compresibilidad del $H_2O$
$Z_{O_2} =$	Factor de compresibilidad del $O_2$
$Z_{N_2} =$	Factor de compresibilidad de $N_2$

TABLA 4.9

UNIDADES	ATM	°K	%	*	ATM	°K
Elementos	Pr	Tr	Ya	Z	Pc	Tc
$CO_2$	0.001022	5.0049	9.938	1	72.9	304.2
$H_2O$	0.00037	2.3517	10.767	1	218.3	647.4
$O_2$	0.00068	9.83527	4.555	1	50.1	154.8
$N_2$	0.0167	12.064	74.739	1	33.5	126.2

\* Valor obtenido del gráfico ( 3.42 )

Los valores de la presión atmosférica de Huancayo y de la temperatura promedio del gas en el recuperador son las siguientes:

$$PA = 0.75 \text{ ATMS.}$$

$$T = (1450 + 1049)/2 + 273 = 1522.5 \text{ } ^\circ\text{K}$$

4.4.3.2. Cálculo del flujo  
del volumen de gas

En los cálculos de la sección anterior se llegó a determinar que los factores de compresibilidad de cada elemento del producto es igual a, 1. Lo que significa que la compresibilidad de la mezcla es (Z=1). Lo que significa que el flujo de volumen esta dada por la siguiente relación:

$$\dot{V} = \frac{Z \times \dot{m} \times \bar{R} \times T}{M \times P} \quad (4.38)$$

Donde el peso molecular promedio de la mezcla cumple con la siguiente ecuación:

$$M = (Y \times M)_{\text{CO}_2} + (Y \times M)_{\text{H}_2\text{O}} + (Y \times M)_{\text{O}_2} + (Y \times M)_{\text{N}_2}$$

$$M = (0.09938 \times 44) + (0.10767 \times 18) + (0.0455 \times 32) + (0.74739 \times 28)$$

$$M = 28.70 \text{ (kgm/kg-mol)}$$

Luego reemplazando los valores determinados en la sección 4.4.3.1 y en está; en la ecuación ( 4.38 ), tenemos que:

$$V = \frac{1 \times 1394.78 \times 858 \times 1522.5}{28.70 \times 0.75 \times 1.0328 \times 10^4}$$

$$\dot{V} = 8195.79 \text{ m}^3/\text{HR}$$

#### 4.4.4. Cálculo del coeficiente pelicular de los gases en el recuperador.

Para plantear la ecuación del coeficiente pelicular del gas, es importante determinar la temperatura promedio de este a lo largo del recuperador, con la finalidad de obtener los valores de las propiedades de los diferentes elementos del gas, estos valores aparecen en la tabla (4.10) y han sido obtenidos de las tablas A-3; de la referencia (R-3). El coeficiente pelicular del gas, debido a que el gas tiene una composición con diferentes tipos de gases. Este se calculará haciendo una sumatoria de los coeficientes peliculares de cada elemento del gas, basados estos últimos en el porcentaje molecular de cada uno de estos. Así mismo elaboraremos la tabla (4.11), en la cual aparecen varias áreas de sección y velocidad del flujo de gases y el número de REYNOLD de éstos, los cuáles, son las informaciones anteriores, serán introducidos al computador con el fin de hacer el cálculo de las dimensiones del recuperador.

El valor de la temperatura promedio del gas en el recuperador es calculado y expresado en grados °F, con la siguiente fórmula:

$$T = (T_{G_e} + T_{G_s}) / 2 \times (9/8) + 32$$

$$T = (1450 + 1049) \times 9/10 + 32$$

$$T = 2281 \text{ } ^\circ\text{F}$$

TABLA 4.10

PROPIEDADES DE LOS GASES A 2281 °F Y 1 ATMOSFERA

		$\rho$	$C_p$	$\mu \times 10^5$	$\sqrt{\nu} \times 10^{-3}$	$R$	$Pr_g$	$a$	$\beta \times 10^3$
	UNID. ELEMENT.	lb/ft <sup>3</sup>	BTU/ lbm-°F	lbm/ pie-seg	pie <sup>2</sup> / seg.	BTU/ HR Pie <sup>2</sup> °F	-	Pie <sup>2</sup> / HR.	1/°F
9.938	CO <sub>2</sub>	0.0227	0.312	3.474	1.596	0.053	0.738	7.74	0.373
10.767	H <sub>2</sub> O	0.0090	0.6224	3.3391	3.7437	0.0872	0.86	15.735	0.3678
4.555	O <sub>2</sub>	0.0224	0.2635	3.32	1.480	0.0465	0.677	7.88	0.510
74.739	N <sub>2</sub>	0.0196	0.2878	2.800	1.420	0.0423	0.676	7.58	0.510
	MEZCLA	0.018022	0.3251	2.94852	1.6904	0.04839	0.7020	8.3875	0.4802
	NOMENCLATURA... computadora	RG	CG	UG	VG	KG	PG		

A continuación plantearemos las ecuaciones que determinan el área de sección, la velocidad de flujo, el diámetro hidráulico de la sección y el número de REYNOLDS, para la sección transversal que aparece en la fig. ( 4.29 )

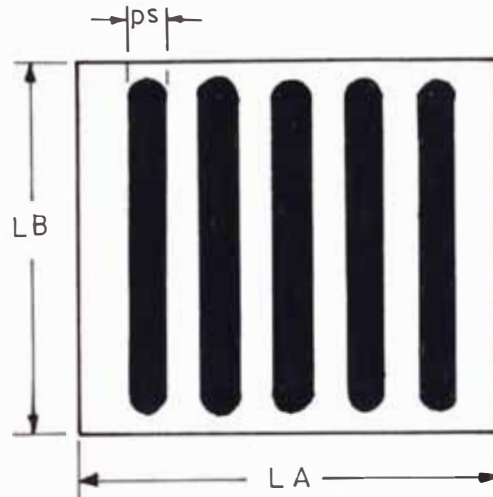


Fig. (4.29)

De acuerdo a la sección que aparece en la figura (4.29) tenemos las siguientes relaciones:

$A = LB \times PS/12$	Area	(pie <sup>2</sup> )
$DH = 2 \times 4 / (LB + PS) 12$	Diámetro Hidráulico	(pie)
$GG = \frac{mG}{ND \times A} \times F$	Velocidad	(pie/seg)
$Re = G_G \times D_H /$	Número REYNOLDS	

Donde:

LA = Lado de sección transversal del recuperador (pie)

F =  $\frac{2.2}{3600}$  Factor de conversión

Con las fórmulas establecidas elaboraremos la tabla (4.11), don



de aparece los valores calculados, de áreas de sección, diámetro hidráulico, velocidad, factor de fricción y número de REYNOLDS; para diferentes valores de PS, LB, y LA; ver la Tab. ( 4.11 )

TABLA 4.11

PS(Z)	LB(J)	LA(I)	ND(I)	—	—	DG(I)	RG(I)	NOMENG. COMPUT.
PS	LB	LA	ND	A	GG	DH <sub>g</sub>	R <sub>eg</sub>	TIPO FLUJO
3/4	2.5	2	16	0.1562	0.3469	0.1219	1409	Laminar
		2.5	20	0.1562	0.2727	0.1219	1128	Laminar
	3	2	16	0.1875	0.28412	0.1224	1179	Laminar
		2.5	20	0.1875	0.2272	0.1224	944	Laminar
1/4	2.5	2	24	0.05208	0.6818	0.0413	955	Laminar
		2.5	30	0.05208	0.5455	0.0413	764	Laminar
	3	2	24	0.0625	0.5682	0.0413	796	Laminar
		2.5	30	0.0625	0.4545	0.0413	637	Laminar

Ya que la intención es colocar el recuperador, en el ducto de la chimenea; las dimensiones supuestas hasta el momento son adecuadas; a simismo se observa que para estas dimensiones el recuperador funciona bajo el régimen laminar.

Para determinar el coeficiente pelicular, se hará uso de la fig. ( 4.30 ); el cuál será aplicado a los diferentes valores de la tabla ( 4.11 ); y las posibles longitudes que podría tener el recuperador.

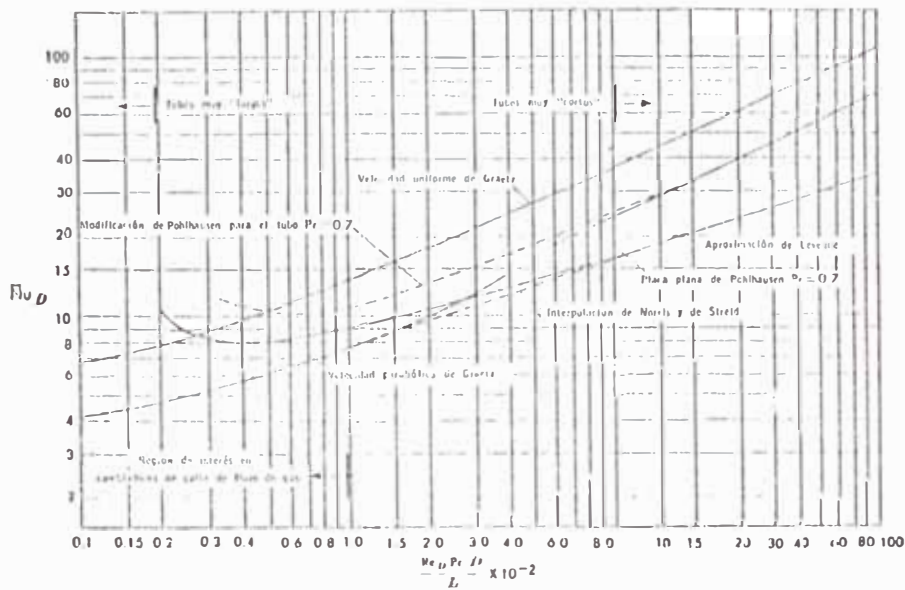


Fig. 4.30 Número de Nusselt de gases para flujo laminar dentro de ductos.

Donde:

$$GZ = \frac{Re \times Pr \times D}{L} \times 10^{-2} \quad (\text{Número de Graetz})$$

Elaboraremos la tabla ( 4.12 ); con la finalidad de obtener un conjunto de valores que serán utilizados en la computadora con el fin de obtener el coeficiente pelicular, y el area más conveniente en el diseño del recuperador.

Con ayuda de esta tabla y el uso de las formulas, que aparecen a continuación, y con ayuda de la computadora se calculará el coeficiente pelicular de los gases.

$$h_{cg} = NU \times k/DH \quad \text{Coeficiente Pelicular}$$

#### 4.4.5. Cálculo del Coeficiente

##### Pelicular del aire

TABLA 4.12

PS	LB	LA	H	DH <sub>g</sub>	Re <sub>g</sub>	GZ	NU	ND	
3/4	2.5	2	2.5	0.1219	1409	0.4823	7.9	16	
			3			0.4019	7.4		
			3.5			0.3445	7.05		
			4			0.3014	6.9		
	2.5	2.5	2.5	2.5	0.1219	1128	0.3861	7.2	20
				3			0.3218	7.0	
				3.5			0.2758	6.85	
				4			0.2413	6.3	
3	2	2.5	2.5	0.1224	1179	0.4052	7.45	16	
			3			0.3377	7.05		
			3.5			0.2894	6.80		
			4			0.2533	6.5		
2.5	2.5	2.5	2.5	0.1224	944	0.3244	7.0	20	
			3			0.2704	6.8		
			3.5			0.2317	6.4		
			4			0.2028	6.05		
1/4	2.5	2	2.5	0.0413	955	0.1108	5.1	24	
			3			0.0923	5.05		
			3.5			0.0791	5.0		
			4			0.0692	4.9		
	2.5	2.5	2.5	2.5	0.0413	764	0.0886	5.0	30
				3			0.0738	5.0	
				3.5			0.0633	4.9	
				4			0.0554	4.8	
	3	2	2.5	2.5	0.0413	796	0.0923	5.05	24
				3			0.0769	5.0	
				3.5			0.0659	4.9	
				4			0.0577	4.8	
2.5	2.5	2.5	2.5	0.0413	637	0.0739	5.0	30	
			3			0.0616	4.9		
			3.5			0.0528	4.8		
			4			0.0462	4.6		

Al igual que el caso anterior, para determinar este coeficiente, es necesario evaluar todas las propiedades necesarias, a la temperatura promedio del aire. Luego la temperatura promedio en el recuperador es la siguiente:

$$TP = \frac{(T_{as} + T_{ae})}{2} \times \frac{9}{5} + 32$$

$$TP = (500 + 10) \times 9/10 + 32$$

$$TP = 491^{\circ}F$$

Con el valor de esta temperatura promedio se elaborará la tabla (4.13), con ayuda de la tabla (A-3), de la referencia (R-3).

TABLA 4.13

Propiedades del aire a 491<sup>o</sup>F y 1 Atmosf.

	$\rho_a$	CP	$\mu \times 10^{-5}$	$\sqrt{\nu} \times 10^{-3}$	$k_a$	$Pr_a$
UNID. ELEMEN.	lb/pie <sup>3</sup>	BTU(lb- <sup>o</sup> F)	lb./ pie-seg	pie <sup>2</sup> / seg.	BTU/h pie <sup>o</sup> F	—
AIRE	0.0416	0.4627	1.2528	0.4814	0.0225	0.94
NOMENGLAT. COMPUTADOR	RA	CA	UA	VA	KA	PA

4.4.5.1. Cálculo del área transversal

Velocidad y número de REYNOLDS

para el aire

Para este efecto se ha planteado en forma esquematizada el tipo de sección que utilizará este recuperador. Ver la figura (4.31).

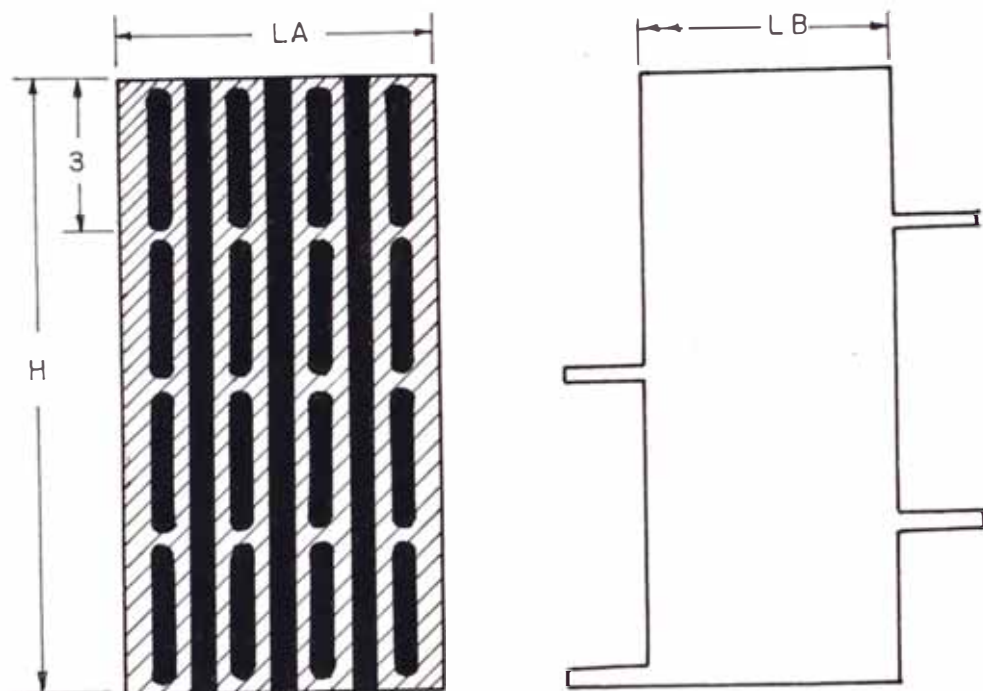


Fig. 4.31 Sección transversal Elemental para el flujo de aire

El area transversal para esta sección estara dada por la siguiente relación:

$$A = 3 \times PS/144 \quad \text{Area} \quad (\text{pie}^2)$$

El diámetro hidráulico esta dada por la fórmula siguiente:

$$DH = 4 \times A/2 \times (LB/12 + PS/12)$$

La velocidad masica y el número de REYNOLDS, esta dada por las siguientes ecuaciones respectivas:

$$GA = \dot{m} \times 2.2 / (N^{\circ}D \times A \times 3600)$$

$$Re = GA \times DH / (\mu \times P)$$

Donde:

P = 2 atmosferas

$\mu_a = 1326.38$

Con las fórmulas mencionadas, elaboraremos la tabla (4.13); donde se ha establecido los valores del area, diámetro hidráulico, velocidad masica y el número de REYNOLDS; para diferentes valores de ND (número de ductos), y PS (ancho del ducto). Ver fig. (4.29)

TABLA 4.14

Pulg.	Pie	Pie	Pie	Pie <sup>2</sup>	Pie	Pie/ seg.	—	UNIDAD
PC(Z)	LB(J)	LA(I)	ND(I)		DA(I)	GA(I)	RA(I)	NOMENCL. COMP.
PC	LB	LA	ND	A	DH <sub>a</sub>	GA	Re <sub>a</sub>	TIPO FLUJO
1/4	2.5	2	16	0.005208	0.03846	9.72685	4930	TURBUL.
		2.5	20	0.005208	0.03846	7.78148	11945	TURBUL.
	3	2	16	0.005208	0.03846	9.72685	14930	TURBUL.
		2.5	20	0.005208	0.03846	7.78148	11944	TURBUL.
1/4	2.5	2	24	0.005208	0.03846	6.48456	9957	TURBUL.
		2.5	30	0.005208	0.03846	5.18765	7963	TRANS-TURBUL.
	3	2	24	0.005208	0.03846	6.48456	9957	TURBUL.
		2.5	30	0.005208	0.03846	5.18765	7963	TRANS-TURBUL.

Para determinar el coeficiente pelicular de transmisión de calor emplearemos la fórmula que determina a éste, en flujo turbulente.

Siendo ligeramente erróneo para los dos últimos valores, ya que estos se encuentran en estado de flujo transitorio.

$$h_{ca} = 0.023 \times (Re)^{0.8} \times (Pr)^{0.33} \times \left( \frac{h_a}{DHa} \right) \times \left[ 1 + \left( \frac{DHa}{L} \right)^{0.7} \right]$$

#### 4.4.5.2. Cálculo de la resistencia

Del ducto (RP).

Para esto emplearemos la gráfica de la figura (1 - 2) de la referencia (R - 3); obtenemos que para la temperatura promedio de  $(T = (1450 + 500)/2)^\circ C$ , el valor de coeficiente de conductividad es:

$$K_p = 0.8 \text{ BTU/HR} - \text{pie} - ^\circ F$$

Luego el valor de la resistencia del ducto de gases, para un espesor de  $(1/4)"$  es:

$$RP = 0.026 \times A_T^{-1}$$

#### 4.4.5.3. Cálculo del área interior y exterior del ducto de gases del recuperador.

El área de transferencia de calor por las paredes interiores es ta dado por:

$$A_i = 2 \times ND \times LB \times H$$

El área de transferencia exterior estará dada por la siguiente relación:

$$A_e = 2 \times LB \times ND \times H$$

4.4.6.1 Cálculo de la longitud del Intercambiador

Para determinar esta dimensión haremos uso de la computadora, debido a que hay una serie de variables que nos permitirá determinar el intercambiador más económico y a su vez el más eficiente en su diseño. Esto implica hacer uso de las tablas (4.10), (4.11), (4.12) y (4.14) asimismo de las ecuaciones (4.39), (4.40), (4.41), (4.42), (4.43), (4.44), (4.45) y (4.46); todo esto aplicado a la ecuación de transmisión de calor dada por la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{A_i}{\frac{1}{h_{c_i}} + \frac{1}{K_p} + \frac{1}{h_{c_e}}} \times \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)} \quad (4.47)$$

Donde  $\Delta T_a$  y  $\Delta T_b$ ; esta determinado en la figura (4.32), que muestra la distribución de temperatura de un cambiador de calor en contra flujo; que para el nuestro, es el caso.

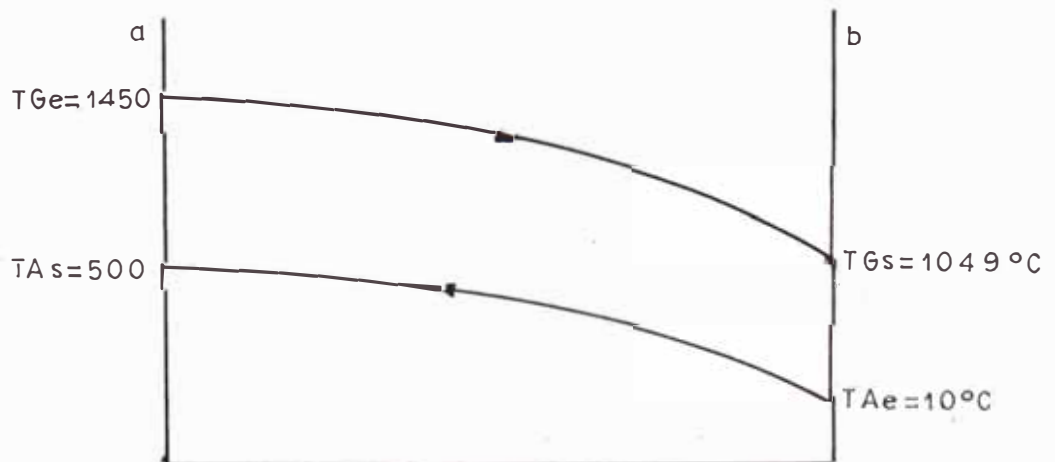


Fig. 4.32



Luego:

$$\Delta T_a = (1450 - 500) \times 9/5 = 1710^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_b = (1049 - 10) \times 9/5 = 1888.2^\circ\text{F}$$

De acuerdo a toda la información planteada a lo largo de esta sección (4.4); como ya se mencionó anteriormente, se elaborará en BASIC un programa, para determinar la dimensión del recuperador; motivo por el cual, el valor de "Q" planteada en la ecuación 4-47; debe cumplir con la siguiente igualdad:

$$Q_N = 180198 \times 3.968 \text{ BTU/HR}$$

$$Q_N = 715,025 \text{ BTU/HR.}$$

4.4.6.2. Nomenclatura de términos equivalentes para usar Computadora

<u>FORMULA</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>COMPUTADORA</u>
$k_g$	Conductividad del gas	KG
$Pr_g$	Prandtl del gas	PG
$k_a$	Conductividad del aire	KA
$Pr_a$	PRANDTL del aire	PA
PS	Ancho de ducto de gases	PS(Z)
LB	Largo del recuperador	LB(J)
LA	Ancho del recuperador	LA(I)
H	Altura del recuperador	H(I,T)
ND	Número de ductos	ND(I)
DHg	Diámetro Hidráulico (gas)	DG(I)
Re <sub>g</sub>	Número REYNOLDS (gas)	RG(I)

<u>FORMULA</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>COMPUTADORA</u>
NU	NUSELT del gas	NU(I,T)
$h_{c_g}$	Coefficiente pelicular del gas	HG
DH	Diámetro hidráulico (aire)	DA(I)
$Re_a$	Número REYNOLDS (aire)	RA(I)
$h_{c_a}$	Coefficiente pelicular (aire)	HA
UA	Coefficiente global de transmisión	UA
AT	diferencia media de temperatura	DT
Ai	Area total de transmisión (gas)	AI
Aa	Area total de transmisión (aire)	AE
QN	Calor necesario	(715025)BTU/HR
QC	Calor calculado	QC

4.4.6.3. Programa para calculo  
del dimensionamiento  
para el recuperador.

```
5 DIM PS(2), PC(2), LB(4), LA(8), DG(8), ND(8)
10 DIM DA(8), RA(8), H(8,4), NU(8,4)
12 RP = 0.026
14 QN = 715025
15 DT = (950 - 1039)/LOG(950/1039)
20 READ KG, KA, PA
25 FOR Z = 1 TO 2
30 READ PS(Z), PC(Z)
35 NEXT
40 FORJ = 1 TO 4
45 READ LB(J)
50 NEXT
```

```
55 FOR I = 1 TO 8
60 READ LA(I), DG(I), ND(I), DA(I), RA(I)
65 FORT = 1 TO 4
70 READ H(I,T), NU(I,T)
75 NEXT
80 NEXT
85 FOR Z = 1 TO 2
86 IF Z <> 1 THEN 93
90 FORJ = 1 TO 2 : IF Z = 1 THEN 95
93 FORJ = 3 TO 4
95 IFJ <> 1 THEN 97
96 FOR I = 1 TO 2 : IF J = 1 THEN 106
97 IFJ <> 2 THEN 99
98 FOR I = 3 TO 4: IFJ = 2 THEN 106
99 IFJ <> 3 THEN 105
100 FOR I = 5 TO 6 : IFJ = 3 THEN 106
105 FOR I = 7 TO 8
106 T = 0
110 T = T + 1
111 IF T > 4 THEN 106
112 AI = 2 x ND(I) x LB(J) x H(I,T)
115 HG = NU(I,T) x KG/DG(I)
120 HA = 0.023 x RA(I) ↑ 0.8 x PA ↑ 0.33 x KA/DA(I) x (1+(KA/DA(I)) ↑ .7)
130 UA = AI/(1/HG + RP + 1/HA)
140 QC = UA x DT
145 IF QC < QN OR (QC-QN) > 70000 THEN 155
148 PRINT "(";Z;J;I;T;") SPC(1);"FS(";Z; SPC(1);"FC(
149 PRINT ")";SPC(1);"LB(";J;")";SPC(1);"LA(";I;")"
```

16φ

```
150 PRINT Z;J;I;T;SPC(3);PS;SPC(3);PC;SPC(4);LB(J);SPC(I);LA(I)
151 PRINT "H(";I;T;")=";H(I,T)
152 PRINT "QC=";QC
155 GOTO 110
160 NEXT
165 NEXT
170 NEXT
180 END
185 DATA 0.04839;0.0225,0.94
190 DATA 0.75,0.25,0.75,0.25
195 DATA 2.5, 3,2.5,3
200 DATA 2,0.1219,16,0.0384615,14930
205 DATA 2.5,7.9,3,7.45,3.5,7.05,4,6.9
210 DATA 2.5,0.1219,20,0.0384615,11944
215 DATA 2.5,7.2,3,7.0,3.5,6.85,4,6.3
220 DATA 2,0.1224,16,0.0384615,14930
225 DATA 2.5,7.45,3,7.05,3.5,6.8,4,6.5
230 DATA 2.5,0.1224,20,0.0384615,11944
235 DATA 2.5,7.0,3,6.8,3.5,6.4,4,6.05
240 DATA 2,0.0413,24,0.0384615,9957
245 DATA 2.5,5.1,3,5.05,3.5,5.0,4,4.9
250 DATA 2.5,0.0413,30,0.0384615,7963
255 DATA 2.5,5.0,3,5.0,3.5,4.9,4,4.8
260 DATA 2,0.0413,24,0.0384615,9957
265 DATA 2.5,5.05,3,5.0,3.5,4.9,4,4.8
270 DATA 2.5,0.413,30,0.0384615,7963
275 DATA 2.5,5.0,3,4.9,3.5,4.8,4,4.6
```

El diagrama de flujo, ver en el apéndice A-8

VALORES DE SALIDA

UND.	N <sup>o</sup> *	Pulg.	Pulg.	PIE	PIE	PIE	PIE
TIPO	ND	FS	LC	LB	LA	H	QC
1114	16	0.75	0.25	2.5	2	4	772517
1122	20	0.75	0.25	2.5	2.5	3	726338
1241	20	0.75	0.25	3	2.5	2.5	739696
1233	16	0.75	0.25	3	2	3.5	737599

Los detalles del recuperador ver en el plano P-7

4.4.6.4. Cálculo del aislante de los ductos de aire caliente

El cálculo implica determinar la resistencia en el interior del ducto, resistencia del ducto, resistencia del aislante y la resistencia al medio ambiente. Ver fig. (4.33); el cual muestra el circuito equivalente del ducto de aire caliente.

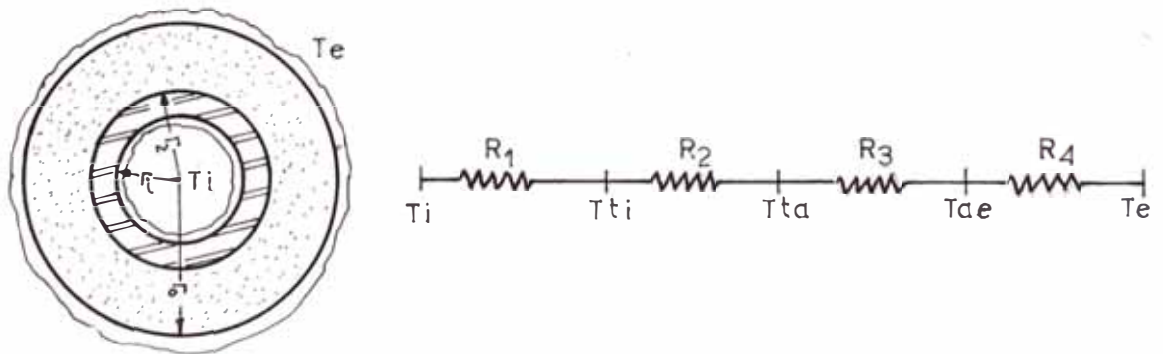


Fig. 4.33

\* Número de ductos de aire y/o gases

DATOS PARA CALCULO

$\phi_i$	=	5.761 (Pulg.)	Diámetro interior del ducto.
$l$	=	7 (pies)	Longitud del ducto.
$T_A$	=	500°C - 932°F	Temperatura del aire caliente.
$T_e$	=	90°F	Temperatura del aire exterior.
$w_H$	=	0.8106 lb/seg.	Flujo de masa de aire caliente.
$K_t$	=	10 BTU/HR - °F - PIE	Conductividad del tubo
$K_a$	=	0.04 ETU/HR -°F - PIE	Conductividad aislante
$e_T$	=	0.432 Pulg.	Espesor del tubo
$\phi_e$	=	6.625	Diámetro exterior del tubo.

- Cálculo del Coeficiente

Pelicular del gas en el ducto

$A$	=	$\pi \times 5.761^2/4 \times 144 = 0.1810$ (Pie <sup>2</sup> )	Area interior del ducto.
$\rho_H$	=	0.0290 lb/pie <sup>3</sup>	Densidad del aire caliente
$\mu$	=	$2.363 \times 10^{-5}$ lbu/pie-seg.	Viscosidad del aire caliente
$V$	=	$w_H / (\rho_H \times A) = 154$ pies/seg	Velocidad del aire
$Re$	=	$\frac{V \times \phi \times \rho}{\mu} = 90734$	Número de REYNOLDS.

De acuerdo al valor del número del REYNOLDS, hemos determinado que el flujo es turbulento dentro de un ducto; luego el valor del coeficiente pelicular ( $h_i$ ); estará dada por la siguiente ecuación:

$$h_i = 0.023 \times \frac{k_f}{D} \times Re^{0.8} \times Pr^{0.33}$$

Donde:

$k_f$	=	0.0303 (BTU/HR pie°F)	Conductividad térmica del aire
-------	---	-----------------------	--------------------------------

$$q = \frac{18033}{0.20073 + 25 \times \pi(r_o/6.625) + 1/r_o h_c}$$

$$r_o = \sqrt{\frac{2 k_o}{0.53 \times k_f \times (Gr \times Pr)^{1/4}}}$$

TABLA 4.15

Tea	$\frac{T_{ea} + T_{\infty}}{2}$	$T_{ea} - T_{\infty}$	kf	$g\beta\rho^2/\mu^2$	Gr	Pr	$h_o$	$r_o$	q
$^{\circ}F$	$^{\circ}F$	$^{\circ}F$	BTU/HR Pie $^{\circ}F$	$1/^{\circ}F$ Pie $^3$	—	—	BTU/pie $^2$ $^{\circ}F$	Pie	BTU/HR
212	151	122	0.0176	1.2959	54228	0.72	0.08393	0.7811	747
176	133	86	0.0169	1.4597	43058	0.72	0.07238	0.821	669
158	124	68	0.0165	1.5416	35956	0.72	0.06531	0.8492	621
140	115	50	0.0162	1.6235	27843	0.72	0.05772	0.8849	571

La cantidad perdida de calor con aislante

$$r_o = 9.85''$$

$$T_{ae} = 86^{\circ}C$$

Será:

$$q = 669 \text{ BTU/HR}$$

$$(168 \text{ Kcal/HR})$$

Es decir la pérdida de calor es pequeña, motivo por el cual el di  
mensionamiento seleccionado del recuperador es el adecuado.

Los detalles del diseño del intercambiador ver en el plano P-7.

#### 4.5. Cálculo para el diseño de la Chimenea

Es necesario que la chimenea cumpla con sus dos funciones principales; que son, las de conducir el gas hasta salidas adecuadas (sumideros) y de producir el tiro suficiente para vencer todas las caídas de presión; producidas por los coeficientes de fricción, coeficientes de cambio de forma, y otras restricciones.

Esto implica que primeramente debemos hacer un esquema de la chimenea que ha de ser diseñada; la cuál estará parametrada a algunas dimensiones de los recuperadores pre seleccionados.

Seguidamente, respecto a lo anteriormente dicho; plantearemos las ecuaciones que evalúan las pérdidas de presión producidas por el ducto de la chimenea, cambio de forma, por los ductos del recuperador y de embocadura de los gases. Finalmente se igualara estas ecuaciones; con la ecuación que evalúa la altura de la chimenea.

##### 4.5.1. Esquema de la Chimenea

El recuperador que ha sido seleccionado es de las siguientes características, ver fig. (4.34)

TABLA 4.16

UNIDADES	m.m	m.m	m.m	Kcal/ HR
TIPO	L <sub>A</sub>	L <sub>B</sub>	H	Calor Trans.
1-1-2-2	2.5	2.5	3	726,338
	762	762	915	183,049

De acuerdo a esto, las chimeneas del horno tendrán el siguiente



esquema; fig. (4.34), el cuál muestra algunas dimensiones presentadas en el cuadro anterior.

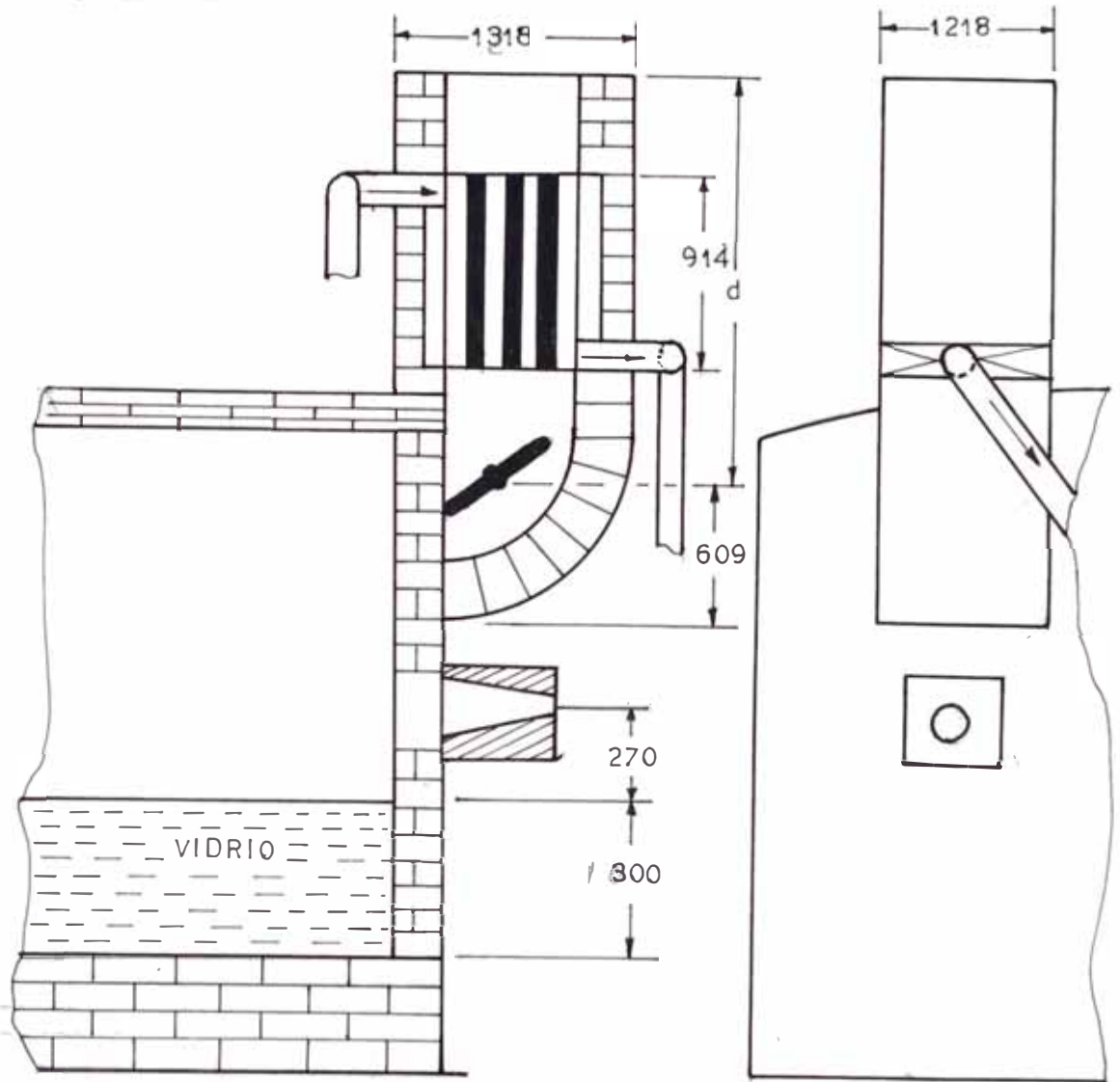


Fig. 4.34

4.5.2. Determinación de pérdidas de presión

Hay cuatro zonas importantes donde se van ha producir caídas de presión a causa de cambios, restricciones y rugosidades en la chimenea cada una de estas zonas están en diferentes condiciones de temperatura y sección de área, motivo por el cuál se elaborará las tablas (4.17 4.18,4.19,4.20) donde aparecen los valores de algunas propiedades, la

velocidad de flujo, el número de REYNOLDS, el diámetro hidráulico, el flujo masico, la velocidad del gas y el factor de fricción o el coeficiente de pérdida, y asimismo la densidad del gas.

4.5.2.1. Pérdida de presión en la zona "0"

En esta zona prácticamente la temperatura cambia desde la temperatura de estancamiento ( $\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ) a la temperatura de salida del gas por la chimenea en un  $\Delta T$ ; esta caída de temperatura se debe al cambio de la entalpía a causa del cambio de la energía cinética producida por el cambio de sección; luego aquí se hará un balance de energía aplicando la primera termodinámica, con el fin de determinar la caída de presión en ésta zona, para ello elaboraremos la tabla ( 4.17 ); con las propiedades del gas obtenidas en los cálculos anteriores y con la aplicación de las fórmulas siguientes:

$$V = \frac{wG}{\rho} \times A_0 \quad (\text{pies/seg})$$

$$\phi = (\phi \text{ entrada} + \phi \text{ cambio sección})$$

$$\Delta P_0 = \phi_{0-1} \times \rho \times (v^2/2gc)$$

Donde:

$$\phi \text{ entrada} = 0.5 \quad (\text{Ver referencia R-5; página 192})$$

$$\phi \text{ cambio sección} = (1.25 \frac{A_1}{A_0}) \times 0.4 \quad (\text{Ver referencia R-5; página 193})$$

TABLA 4.17

T	$\rho$ *	wG *	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>	$\phi$	$\Delta P_0$	V
$^{\circ}\text{F}$	lb/pie <sup>3</sup>	lb/seg	Pie <sup>2</sup>	Pie <sup>2</sup>		lb/pie <sup>2</sup>	pie/seg
2732	0.0186	0.8584	7.07	45	0.937	0.00171	1.016

\* Valor obtenido de las tablas A-3 de la referencia R-3

\*\* Valor obtenido en cálculos de la sección 3.3.6.

4.5.3.2. Caida de presión  
en la zona "1"

Por construcción suponemos que el austo en la zona "1"; tiene una altura de un pie desde el punto final del coño a la base del recuperador y la temperatura en este punto aproximadamente es de 1450°C - (2642 - F). Al igual que el caso anterior elaboraremos la tabla (4.18) aplicando las fórmulas que se plantearán a continuación y los valores de las referencias (R-5) pag. 176 y de las tablas A-3 de la referencia (R-3)

$$V_I = mG/\rho G X A$$

$$D_H = 4 \times A/PE$$

$$Re = V \times D_H/\nu$$

$$P_1 = f \times (V^2 \times \rho) / 2 \times g_c \times \left( \frac{f \times L}{D_H} + \phi \text{ CODO} \right)$$

Donde:

f = Valor obtenido de la referencia (R-5) pag. 179

PE = Perímetro del área de la sección "1" de la chimenea

$\phi$  CODO = 0.18 (ver referencia R-5; pag. 179)

TABLA 4.18

$\phi$ CODO	$V_I$	T	mG	$\rho$	A	PE	DH	Re	f	$\Delta P_1$	$\gamma \times 10^3$
-	Pie/seg.	°F	lb/seg	lb/pie <sup>3</sup>	Pie <sup>2</sup>	Pie	Pie	-	-	lb/pie <sup>2</sup>	Pie <sup>2</sup> /seg
0.18	6.424	2642	0.8584	0.0189	7.07	10.65	2.655	9402	0.051	0.00231	1.814

4.5.2.3. Caida de presión  
en la zona II

Es la zona que pertenece al recuperador; lo cual implica que la temperatura del gas debe bajar de 1450°C a T°C; motivo por el cual calcularemos previamente este valor, empleando la siguiente ecuación:

$$T = T_G - \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{QC}{m_G \times CP_G}$$

Donde:

- |   |  |
|---|--|
| $T_G = 1450 \text{ C}$                        | Temperatura del gas a la entrada del recuperador.  |
| $QC = 183049 \text{ Kcal/HR}$                 | Calor intercambiado en el recuperador.             |
| $CP_G = 0.3208 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$ | Calor específico del gas calculado molecularmente. |
| $m_G = 1394.78 \text{ Kgr/HR}$                | Masa de gas por el recuperador.                    |
| $ND = 25 \text{ ductos}$                      | Número de ductos.                                  |

Luego:

$$\Delta T = 183049 / (1394.78 \times 0.3208) = 409^\circ\text{C}$$

$$T = 1450 - 409 = 1041^\circ\text{C}$$

De acuerdo al último valor calculado procederemos a determinar la densidad del gas a temperatura promedio en el recuperador ( $TP = \frac{1450 + 1041}{2} = 1245.5 \text{ C}$ ). Asimismo se recalculará la caída de presión en función del número de ductos del recuperador y de los factores de cambio de sección tanto a la entrada como a la salida del mis

no. Para este fin elaboraremos la tabla (4.19), la caída de presión cumple con la siguiente ecuación:

$$\Delta P_2 = \frac{V}{2gc} \times \left( f \times ND \times \frac{1}{DH} + \begin{matrix} \text{Cambio sec.} \\ \text{entrada} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{Cambio de} \\ \text{sec. salida} \end{matrix} \right)$$

Donde:

$$(\text{Cambio de sección})_e = 0.4 \times (1.25 - A_2/A_1)$$

$$(\text{Cambio de sección})_s = (1 - A_2/A_1)^2$$

$$A_2 = ND \times AD$$

$$AD = \text{Area del ducto.}$$

TABLA 4.19

TP	DH	$\rho$ <sup>⊕</sup>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	ND <sup>⊕</sup>	Re <sup>⊕</sup>
°F	Pie	lb/pie <sup>3</sup>	Pie <sup>2</sup>	Pie <sup>2</sup>	# DUCTOS	-
2274	0.1219	0.018894	7.07	3.125	20	1128

TP	V <sub>D</sub>	f <sup>**</sup>	$\phi_{I-II}$ <sup>***</sup>	$\phi_{II-II}$ <sup>***</sup>	P <sub>2</sub>	l
°F	Pie/seg	-	-	-	lb/pie <sup>2</sup>	pie
2274	14.436	0.0567	0.195	0.323	2.022	3.5

\*\* Ver referencia (R-5)

⊕ Valores calculados en la sección 4.4

Caída de presión en la zona III.-

En esta zona el gas se encuentra a una temperatura de 1001°C, con

considerando además, que por la pared no hay pérdidas de calor. Con el fin de obtener el valor de la densidad de ésta temperatura haremos uso de la tabla A-3, de la referencia (R-3) y asimismo para obtener los coeficiente de fricción en esta zona se hará uso de la referencia (R-5), pagina 176. Con estos valores y con ayuda de las siguientes fórmulas, se elaborará la tabla ( 4 - 20 ).

$$V_{III} = wG/\rho G \times A$$

$$DH = 4A/PE$$

$$Re = V \times DH/\nu$$

$$\Delta P_3 = f_{III} \times (V^2 \times \rho \times L/H)/2g_c \times DH$$

PE = Perímetro mojado.

TABLA 4.20

T	$\rho$	wG	A	PE	DH	$\nu \times 10^{-3}$
°F	lb/pie <sup>3</sup>	lb/seg	Pie <sup>2</sup>	Pie	pie	—
1834	0.01955	0.8584	7.07	10.65	2.655	1.5352

T	Re	f	L	$\Delta P_{(3)}$	GV
°F	—	—	Pie	lb/pie <sup>2</sup>	Pie/seg.
1834	10697	0.03	5	0.0006522	6.1668
			10	0.001304	—
			20	0.002609	—
			30	0.003913	—
			40	0.005218	—

4.5.2.4. Cálculo de la caída de presión

la presión total y altura de chimenea

La caída de presión total es la suma de todas las caídas de presiones parciales:

$$\Delta P_{(TOTAL)} = \Delta P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

$$\Delta P_{(TOTAL)} = 0.00171 + 0.00231 + 2.022 + 0.005218$$

$$\Delta P_{(TOTAL)} = 2.0782 \text{ lb/pie}^2$$

Con el fin de determinar la altura de la chimenea emplearemos la ecuación de balance mecánico:

$$(Z_3 - Z_0) \times \left[ 1 - \rho_{\text{aire}} / \rho_{\text{promedio}} \right] + \frac{V_3^2 - V_0^2}{2g_c} + F = 0$$

Donde:

$\rho_{\text{aire}} = 0.076$  (lb/pie<sup>3</sup>) Densidad del aire a 10°C de temperatura.

$\rho_{\text{Gas}} = 0.619063$  (lb/pie<sup>3</sup>) Densidad promedio del gas.

$V_0 = 1.016$  pies/seg. Velocidad en la entrada

$V_3 = 6.1668$  pies/seg. Velocidad a la salida

$F = +\Delta P_{(TOTAL)} / \rho$  Fuerza friccional

Reemplazando estos valores en la ecuación; tenemos que:

$$Z_3 - Z_0 = \left[ \frac{(6.1668^2 - 1.016^2)}{2 \times 32.2} + \frac{2.0782}{0.619063} \right] / \left( \frac{0.076}{0.619063} - 1 \right)$$

$$Z_3 - Z_0 \approx 37 \text{ pies (11.28 mts)}$$

Esta chimenea es bastante alta para la dimensión del horno, por lo que; se opta en usar un extractor de gases o también evaluar la caída de presión para una chimenea de 3 metros de altura máximo; si la caída de presión resultara pequeña se optaría por usar ésta última alternativa como solución a la extracción de los gases del horno.

4.5.2.5. Cálculo de la caída de presión  
para una chimenea de 3 metros  
de altura.

Este cálculo permitira evaluar, si es necesario usar un extractor de gases o es sólo suficiente hacer subir ligeramente la presión de gases en la cámara de combustión del horno; luego esto implica que; emplear la siguiente fórmula:

$$M = \left[ 10 \times (1 - \rho_{aire}/\bar{\rho}) + (v_3^2 - v_0^2)/2 \times gc + \Delta P/\bar{\rho} \right] \times \bar{\rho}$$

$$M = \left[ 10 \times (1 - 0.071/0.019063) + (6.1668^2 - 1.016^2)/2 \times 32.2 + 2.0782/0.019063 \right] \times 0.019063$$

$$M = 1.56978 \text{ lb/pie}^2$$

$$M = 0.000768 \text{ kg/cm}^2$$

Donde;

M = a presión producida por fuerza motriz.

Esto indica que no es necesario usar un extractor de gases; sino el de hacer subir la presión del horno ligeramente para tener éste, en flujo estable.

Los detalles del diseño ver en el plano ( P - 7 ).



#### 4.6. Diseño del sistema

##### Aire - Combustible

Para efectuar este diseño primeramente se procedera a elaborar un esquema de la instalacion de combustible - aire; a continuacion se generara un cuadro con algunas caracteristicas de los dispositivos utilizados para esta instalacion. Y, finalmente se hara calculos de las potencias de las bombas y del compresor.

##### 4.6.1. Esquema de la instalacion

##### Aire - Combustible

Los ductos de petroleo estan representadas por lineas simples y los ductos de aire por lineas dobles; cada componente estara denominado para su descripcion. Ver fig. ( 4.35 ).

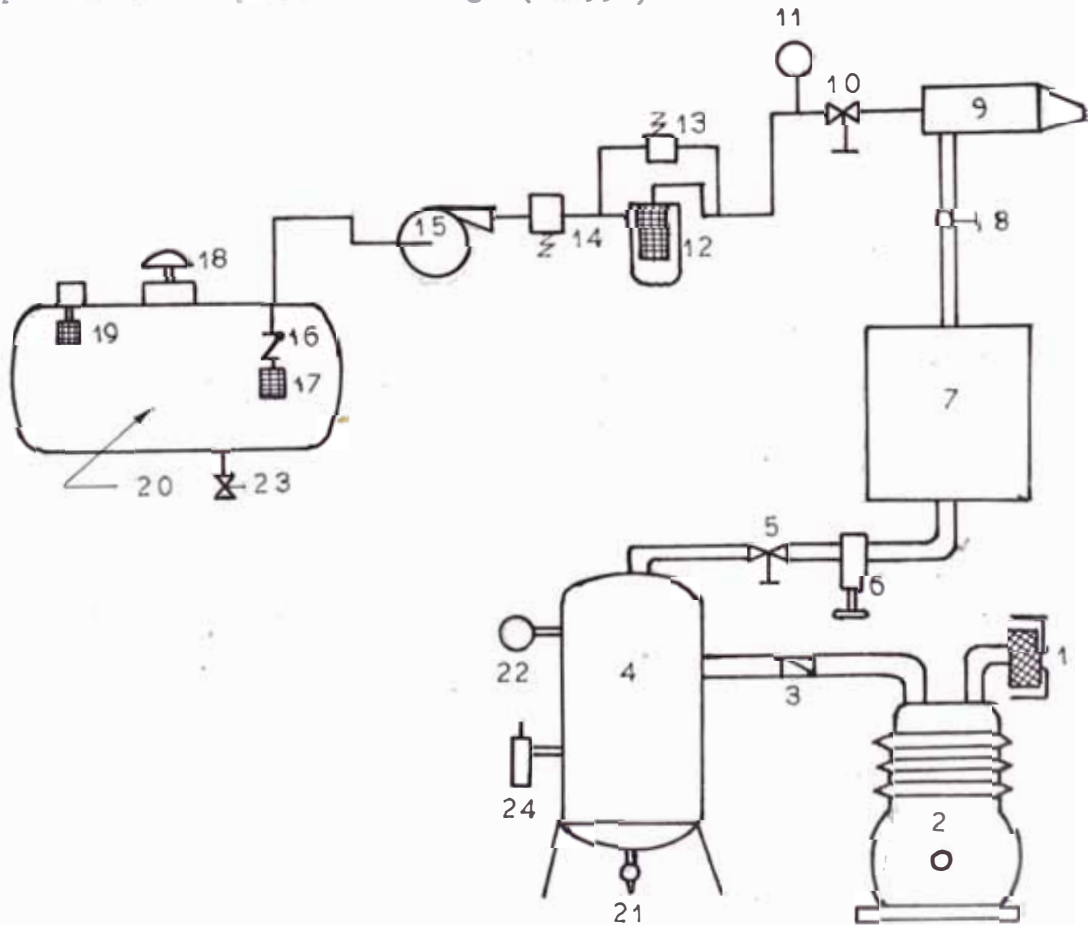


Fig. 4.35

Nomeclatura Fig. 4.35

- |                                  |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| ( 1) Filtro de aire              | (13) Válvula BY PASS      |
| ( 2) Compresora (800 CFM).       | (14) Válvula RELIEF       |
| ( 3) Válvula CHECK               | (15) Bomba de petróleo    |
| ( 4) Tanque de aire              | (16) Válvula CHECK        |
| ( 5) Válvula compuerta           | (17) Filtro magnético     |
| ( 6) Válvula reguladora de flujo | (18) Respirador           |
| ( 7) Recuperador de calor (aire) | (19) Surtidor de petróleo |
| ( 8) Válvula mariposa            | (20) Tanque de petróleo   |
| ( 9) Quemador de petróleo        | (21) Válvula de drenaje   |
| (10) Válvula compuerta           | (22) Manómetro de aire    |
| (11) Manómetro de petróleo       | (23) Válvula de drenaje   |
| (12) Filtro petróleo             | (24) Válvula de seguridad |

El funcionamiento de este sistema, es como se describe a continuación. Tanto el aire como el petróleo llegan al quemador (9); donde el petróleo es inicialmente pulverizado; para posteriormente ser atomizado por las corrientes de aire.

El aire del medio ambiente es tomado por través del filtro (1); de manera que el compresor (2) eleve la presión del aire hasta unas 6 atmósferas, en el tanque (4); una parte del aire es dirigido para actuar los sistemas neumáticos de las máquinas de fabricación; a una presión aproximada de 6 atmósferas. Y, la mayor parte es de aire para alimentar al quemador, el cuál pasa através de una válvula reguladora de flujo (6); antes de entrar al recuperador de calor para el aire (7); una vez que pasa por este el aire es calentado hasta 500°C; para finalmente entrar al quemador (9); con una presión entre 2 atmósferas a 3 atmósferas.

Por otro lado el petróleo; que a sido almacenado en el tanque (20); es succionado por la bomba (15); pasando antes de llegar a la bomba por el filtro de succión (17) y la válvula Check (16); la bomba en mención eleva la presión del petróleo, de manera que esta llegue al quemador con una presión de 5 atmósferas. El petróleo es filtrado en el filtro (12); con el fin que éste llegue limpio al quemador, en caso que el filtro (12) se ensuciará la válvula By Pass (13); actuaría de manera que el sistema del quemador no se quede sin petróleo y así mismo como elemento de seguridad para la bomba (15); en este sistema se ha colocado la válvula Rellief (14), que actúa retornando el petróleo al tanque; cuando el quemador o las líneas después de la bomba se encuentran obstruidas.

Como se mencionó inicialmente el petróleo y el oxígeno del aire deben mezclarse adecuadamente para producir la reacción de combustión.

#### 4.6.2. Características de los componentes del sistema

Los componentes principales de éste sistema, son el tanque de petróleo, la bomba de petróleo, el filtro, el quemador, el recuperador, y el compresor; los cuáles tienen valores definidos por cálculo y selección. Pero sin embargo haremos mención de las características aproximadas de los otros componentes; tales como tuberías de aire y petróleo. Ver tabla ( 4.21 )

#### 4.6.3. Determinación de la potencia requerida por la bomba de petróleo

Para evaluar la potencia requerida por la bomba primeramente evaluaremos la pérdida de presión por pérdida en los ductos y filtro de

petróleo

TABLA 4.21

Características de los Componentes Principales  
del Sistema Aire - Combustible del horno.

ITM	DESCRIPCION	DIAM(M)"	CAPAC. M3	FLUJO M3/HR	PRESION ATMS	LONG. (M)
1	Tanque Petróleo	2.85	50 60			3.8
2	Bomba Petróleo			0.070	200	
3	Compresor de aire			1500	10	
4	Tubo Petróleo	0.01			20	100
5	Tubo de aire	0.077			30	50
6	Recuperador	0.762 <sup>***</sup>	184	1165	2	1.066
7	Filtro				0.5	
8	Tanque aire	1.5	8		15	2
	Quemador			40-80	6/4 <sup>*</sup>	

\* 6 atmósferas presión del petróleo, 4 atmósferas presión del  
aire.

\*\* Diámetro hidráulico.

4.6.3.1. Pérdida de presión en  
Ductos de petróleo.

Longitud del ducto	100 mts.
Diámetro del ducto	0.010 mts.
Flujo de petróleo	~70 kgr/HR
Densidad del petróleo	980 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad del petróleo	0.0026 Kgr/m-seg
Nº de codos aproximado	5
Coefficiente de pérdida por fricción en tubos (l/D) eq.	32
Masa de combustible	70 kgr/HR
Area del ducto (sección)	0.7854 cm <sup>2</sup>

Luego:

$$V = \frac{m_c}{\rho \times A \times 3600} = \frac{70 \times 10^5}{980 \times 7.85 \times 3600} = 0.253 \text{ m/seg}$$

$$Re = \frac{V \times D \times \rho}{\mu} = 954$$

$$f = 64/Re = 0.067$$

De acuerdo a la información obtenida por las tres fórmulas anteriores obtenemos la siguiente cantidad de caída de presión por ductos y filtro de petróleo.

$$\Delta P = \Delta P_d + \Delta P_c + \Delta P_f$$

$$\Delta P = f \times \left( \frac{l}{D} + 5 \times 32 \right) \times \frac{V^2}{2 \times g} \times \rho + \Delta P_F$$

$$\Delta P = 0.067 \times (10000 + 160) \times (0.253^2 / 2 \times 9.8) \times (980 / 10000) + \Delta P_F$$

$$\Delta P = 0.22 + 0.4$$

$$\Delta P = 0.62 \text{ kg/cm}^2$$

Donde:

$P_F$  = Caída de presión en filtro.

#### 4.6.3.2. Presión total de bombas

La presión que requiere el sistema es igual a la siguiente:

$$P_T = P(\text{quemador}) + \Delta P$$

$$P_T = 6.138 + 0.62$$

$$P_T = 6.738 \text{ kg/cm}^2$$

#### 4.6.3.3. Potencia de motor

Finalmente la potencia que requiere producir la bomba esta dado por la siguiente fórmula:

$$HP = \frac{P_T \times M_e \times 10^9}{2736 \times \rho} \times \frac{1}{\gamma_M}$$

$$HP = \frac{6.738 \times 70 \times 10}{2736 \times 980} \times \frac{1}{\gamma_M}$$

Donde:

$$\gamma_M = 0.86$$

Eficiencia del motor.

La potencia del motor será

$$HP = 1.759 / \gamma_M$$

$$HP = 2.045 \text{ HP}$$

Usar: Motor de 2.25 HP.

#### 4.6.4. Cálculo de la potencia

##### Requerida por el compresor

Como en el caso anterior determinaremos la caída de presión en los ductos y el recuperador; con la finalidad de asegurar la compresión. Aquí también evaluaremos la potencia requerida por el motor del compresor.

##### 4.6.4.1. Caída de presión del aire en

##### los ductos y el recuperador

Longitud de ductos del aire	50,000 m.m.
Diámetro del ducto de aire	77 m.m.
Densidad del aire a 0°C	1.30 kg/m <sup>3</sup>
Flujo del aire	1326 kg/HR.
Viscosidad del aire a T 0°C	1.7369 kg/m-seg x 10 <sup>-5</sup>
Número de codos	5
Coficiente de longitud equivalente (l/D) en codos	32
Densidad del aire en el recuperador a 456°C (temperatura promedio del recuperador)	0.661 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad del aire en el recuperador.	2.818 kg/m-seg x 10 <sup>-5</sup>
Diámetro hidráulico del ducto	

de aire en el recuperador

12 m.m.

Longitud total de ductos en

el recuperador.

182,880 m.

Flujo de aire a sistema neumá

tico para operar máquinas.

174 m<sup>3</sup>/HR

- Caida de presión en los ductos

$$V = \frac{ma}{(\rho \times A \times 3600) \times P} = \frac{1326 \times 10^3}{(1.3 \times 4.65 \times 3600 \times 3)} = 20.31 \text{ m/seg}$$

$$Re = \frac{V \times DH \times \rho}{\mu} = \frac{66.93 \times 0.077 \times 1.3 \times 10^5}{1.7369} = 117,049$$

De acuerdo al gráfico del apéndice (A - 8), tenemos que (f=0.02);  
para un r/D = 0.0006

Luego la caída de presión en ducto y codos del aire es la siguiente:

$$\Delta P_d = \frac{V^2 \times \rho}{2 \times g} \times (f \times L/D + N \times (L/D) \text{ eq}) \times 10^{-4}$$

$$\Delta P_d = \frac{20.31^2 \times 1.3}{2 \times 9.8} \times (0.02 \times 50/0.077 + 5 \times 32) \times 10^{-4}$$

$$\Delta P_d = 0.4732 \text{ kg/cm}^2$$

- Caida de presión en el recuperador

$$V = \frac{ma}{(\rho_r \times A \times 3600) \times N_D} = \frac{1326}{(0.661 \times 0.00521 \times 3600) \times 20}$$



$$V = 5.3477 \text{ m/seg.}$$

$$Re = \frac{1.7826 \times 0.661 \times 10 \times 0.012}{2.818} = 1505.26$$

$$f = 64/Re = 64/505 = 0.042$$

Luego la caída de presión en los ductos del recuperador será:

$$\Delta P = \frac{v^2 \times \rho}{2 \times g_c} \times f \times L/D \times 10^{-4}$$

$$\Delta P = \frac{5.3477^2 \times 0.661}{2 \times 9.8} \times 0.042 \times \frac{182}{0.012} \times 10^{-4}$$

$$\Delta P = 0.062 \text{ kg/cm}^2$$

#### 4.6.4.2. Cálculo de la potencia del compresor

Para calcular la potencia necesaria del compresor se calcula la presión total que debe producir el compresor para introducir el aire en el quemador, y éste cumpla un buen funcionamiento.

Luego:

$$\Delta P_T = (4 + 0.4732 + 0.062) \times 1.023$$

$$\Delta P = 4.64 \text{ kg/cm}^2$$

La ecuación que emplearemos para el cálculo de la potencia del compresor será la siguiente:

$$HP = \frac{K}{K - 1} \times \frac{P_1}{\rho_1} \times \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] \times \dot{m}_a \times F$$

Donde:

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| $K = 1.4$                          | Relación de capacidad calorífica.            |
| $P_1 = 0.767 \text{ kg/cm}$        | Presión a la entrada del compresor           |
| $P_2 = 4.64 \text{ kg/cm}^2$       | Presión del compresor necesaria a la salida. |
| $\dot{m}_a = 1500 \text{ kg/seg.}$ | Flujo del aire.                              |
| $F = 0.03655$                      | Factor global de conversión.                 |
| $\rho_1 = 1.30 \text{ kg/m}^3$     | Densidad del aire a la entrada.              |

$$HP = \frac{1.4}{1.4 - 1} \times \frac{0.767}{1.30} \times \left[ \left( \frac{4.64}{0.767} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right] \times 1326 \times 0.03655$$

$$HP = 67.29 \text{ HP.}$$

La potencia del motor para accionar el compresor será:

$$HP_M = \frac{HP}{\eta} = \frac{67.29}{0.86}$$

$$HP_M = 80 \text{ HP}$$

Usar motor de 80 HP.

## PRESPECTIVAS FUTURAS

Como perspectivas futuras se plantea la utilización del carbón y del oxígeno; ya que hacer esto significaría una inversión alta, tanto para el tratamiento del carbón como el oxígeno, no se utilizarán es tos recursos inmediatamente.

En el Capítulo 2, se hizo un estudio de la posible utilización del carbón, ya que en zonas aledañas a Huancayo se encuentra carbón antracítico y Bituminoso; aún sin ser explotados, lo cual haría acrecentar la inversión inicial de la utilización de éste. Es más, el carbón no puede ser utilizado directamente en los hornos de vidrio; ya que las cenizas de carbón contaminarían al vidrio fundido; lo que in plica usar el mismo en forma indirecta, es decir gasificando. Este proceso será descrito en este capítulo. Lo mismo que la evaluación, energética del gas.

El uso del oxígeno como perspectiva futura, implicaría un ahorro en el consumo de combustible; pero sin embargo esto implicaría la ins talación de una planta para la producción del mismo. Que para el ca so de una fábrica de vidrio, con una producción que cubra la zona de Huancayo, no justifica su instalación inmediata pero sin embargo, de acuerdo al diseño del horno planteada en esta tesis, se evaluará el ahorro de combustible que traería consigo la utilización de oxígeno en vez de aire.

### 5.1. Gasificación de combustibles.

5.1.1. Generalidades

5.1.1.1. Definición

Por gasificación se entiende la transformación de un combustible sólido en otro gaseoso (gas pobre), haciendo pasar una corriente de aire a través de una capa relativamente gruesa del combustible en incandescencia. El gas obtenido contiene el nitrógeno del aire, y a ello se debe su poca potencia calorífica.

5.1.1.2. Teoría de la gasificación

Esta se reduce a convertir en gas el carbono sólido, mediante una combustión en dos tiempos representados por las ecuaciones siguientes:



En la combustión completa, 1 molécula de carbono (12 kg) desarrolla 97800 Kcal. Pero el anhídrido carbónico formado  $CO_2$ , en presencia de la masa de combustible incandescente y a las temperaturas a que la gasificación se produce, es inestable, es decir, que se desecompone como lo indica la segunda ecuación, absorbiendo 39240 Kcal. Esta última cifra se compueba multiplicando, en la ecuación (2), los pesos que reaccionan por las respectivas potencias caloríficas (en Kcal/kg); o sea:

$$12.8150 + 44.0 - 2.28.2447 - 39240 \text{ Kcal.}$$

La figura ( 5.1 ); da las curvas de equilibrio del óxido de carbono CO y del anhídrido carbónico CO<sub>2</sub>, en preseneia del carbón incandescente, según la temperatura. En la práctica, la transformación del CO<sub>2</sub> en CO no es total, por insuficiencia de tiempo.

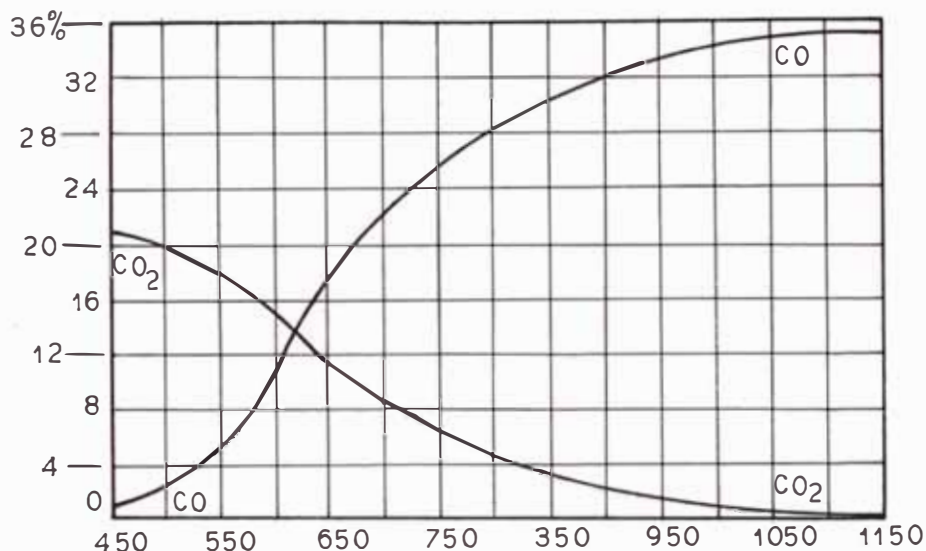


Fig. 5.1

Composición del gas pobre  
( en función de la temperatura)

Sumando las dos ecuaciones (5.1) y (5.2); se obtiene la ecuación resultante de la gasificación:



Los 24 kg de carbono que intervienen en la reacción (5.3), requieren 22.4 m<sup>3</sup> de oxígeno a 0° y 760 mm (metro cúbico normal) y producen 44,8 m<sup>3</sup> de óxido de carbono; de modo que 1 kg de carbono exige 22,4/24 = 0.93 m<sup>3</sup> de oxígeno y da 44.8/24 = 1.86 m<sup>3</sup> de óxido de carbono.

#### 5.1.1.3. Consumo de aire

Como que 100 volúmenes de aire contienen 21 de oxígeno y 79 de nitrógeno, para gasificar 1 kg de carbono harán falta  $0.93 (100/21) = 4.43 \text{ m}^3$  de aire a  $0^\circ$  y 760 mm.

Como se ha dicho ante - ecuación (5.3) - un kilogramo de carbón exige  $0.93 \text{ m}^3$  de oxígeno; el gas producido contendrá, no solamente los 1.86 m de óxido de carbono sino los  $0.93 (79/21) = 3.50 \text{ m}^3$  de nitrógeno que acompañan a los 0.93 de oxígeno, o sea que tendrá un volumen total de  $1.86 + 3.50 = 5.36 \text{ m}^3$  (a  $0^\circ$  y 760 mm). Composición del gas (en volumen) :  $(1.86/5.36)100 = 34.7\%$  de CO y  $(3.50/5.36)100 = 65.3\%$  de nitrógeno.

Por la proporción de nitrógeno del gas, puede calcularse la cantidad de aire que hace falta para producir un metro cúbico normal del gas (despreciando la pequeña proporción de nitrógeno del carbón). En el caso presente, harán falta  $1.0,653/0.79 = 0.83 \text{ m}^3$  de aire.

#### 5.1.1.4. Potencia calorífica del gas pobre

Siendo la potencia calorífica de un metro cúbico de óxido de carbono ( a  $0^\circ$  y 760 mm) 3059 Kcal, el gas producido por 1 kg de carbono contendrá latentes  $1,86.3059 = 5690$  Kcal, encerradas en  $5,36 \text{ m}^3$ .

Por lo tanto, si todo el carbono se transforma en CO, la potencia calorífica de un metro cúbico normal (a  $0^\circ$  y 760 mm), de gas, será de  $5690/5,36 = 1060$  Kcal/ $\text{m}^3$ . La cantidad de calor desarrollada por esta combustión del carbono, para convertirse en óxido de carbono - según la ecuación (5.3) - es de 58560 Kcal para 24 kg, o sea 2440 Kcal/kg; prescindiendo de pérdidas, esta cantidad se hallará en forma de calor sensible en los  $5,36 \text{ m}^3$  de gas. Por lo tanto, teóricamente, la temperatura del gas será  $2440/(5,36.0,34) = 1340^\circ$ , teniendo en cuenta que

el calor específico medio de los gases diatómicos, por metro cúbico normal (entre las temperaturas de 0 y 1340°), es 0.34

#### 5.1.1.5. Rendimiento químico de la gasificación

Es la relación entre el calor que encierra en estado latente, el gas obtenido, y la potencia calorífica del combustible invertido para obtener aquél. En este caso - gas de aire producido por carbono - valdrá:

$$5.36 \times 1060 / 8150 = 0.70$$

#### 5.1.2. Gasificación con ayuda de vapor de agua

La conversión del carbono en CO o CO<sub>2</sub>, en las capas de combustible incandescentes, desarrolla en ellas temperaturas de 1300° ó más superiores desde luego al punto de fusión de las escorias que contienen todos los combustibles. Así es que la producción de gas de aire puro funde la escoria, y hace imposible el funcionamiento seguido del gasógeno. Para limitar la temperatura, se recurre a inyectar vapor de agua que - al disociarse, en presencia del carbono incandescente, - absorbe la cantidad de calor correspondiente; el fenómeno da lugar a una de las reacciones endotérmicas siguientes:



Al gasificar un combustible sólido, con auxilio de vapor, los fenómenos de combinación y disociación que ocurren pueden resumirse en

las fórmulas siguientes:



En la práctica, el tiempo disponible es insuficiente para el desarrollo total de estas reacciones; por consiguiente, no todo el carbono y tampoco se disocia, casi nunca, todo el vapor. El hidrógeno resultante de la disociación del vapor de agua eleva la potencia calorífica del gas y reduce, al mismo tiempo, su calor sensible (temperatura).

Para evitar que la fusión de las escorias obstruya el gasógeno y conseguir que éste funcione de modo satisfactorio, la gasificación de todos los combustibles (incluso de los muy húmedos) exige inyectar vapor, en cantidad tanto mayor, cuanto más bajo sea el punto de fusión, de las escorias. Como dicho punto, tratándose de escorias fusibles, siempre supera al de inflamación del carbono sólido, inyectando vapor en cantidad suficiente habrá posibilidad de gasificar cualquier combustible, sin temor a que la escoria perturbe la marcha del gasógeno; el único requisito, para ello, es que el lecho de combustible resulte permeable a los gases, condición que no satisfacen las hullas aglutinantes ni los lignitos pulverulentos muy húmedos.

Es muy conveniente inyectar el vapor al aire de gasificación, antes de que éste penetre en el gasógeno. Por razones económicas, se procura aprovechar vapor de escape, o bien se genera aquél en un vaporizador del gasógeno mismo, dispuesto como envolvente refrigerante. Para la mayoría de combustibles, y con la marcha de los gasógenos ordinarios, basta inyectar de 0.2 a 0.6 kg de vapor por kilogramo de



carbón; para algunos carbones (lignites renanos), basta una cantidad menor.

El vapor inyecta o satura el aire de gasificación. Para un combustible determinado se trabaja, también, con una temperatura de saturación fija, determinada experimentalmente y medida por un termómetro dispuesto en la tubería de aire.

La cantidad de coque (de aire y vapor) que ha de inyectarse, por kilogramo de combustible, se deducirá de la temperatura que exija su gasificación y de la de vapor necesario para saturarlo.

La cantidad de aire precisa, para obtener un metro cúbico (normal) de gas, puede obtenerse, como se ha dicho antes, conociendo la proporción de nitrógeno en éste. La cantidad de gas se deduce del balance de carbón. La tabla ( 5.1 ) da el peso de vapor contenido en un metro cúbico de aire, para diversas temperaturas de saturación.

Inyectan el vapor en cantidad suficiente, mientras no se trate de carbónes aglutinados o fundentes (lignites pulverulentos), puede limitarse al grado que convenga la formación de escorias. El vapor no disociado y el agua del combustible constituyen la humedad del gas (ésta obliga a desecarlo, por condensación de aquélla, antes de su empleo). Cuando el gas se utiliza como agente de caldeo, conviene aprovechar también su calor sensible, y entonces la humedad reduce su temperatura de combustión; debido a ello, y porque en ciertas operaciones metalúrgicas la presencia de humedad perturba el trabajo, dichos gasógenos se hacen funcionar como un horno de vapor, aceptando el inconveniente de una mayor escorificación.

Cuanto menor sea la cantidad de combustible gasificada, por hora menor será también la de vapor que haya de inyectarse.

TABLA 5.1

Temperatura (°C)	Tensión del vapor (mm de merc.)	Gramos de vapor por m <sup>3</sup> de aire saturad.	Kilo calorías del vapor por m <sup>3</sup> de aire Sat.	Volumen total del aire húmedo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Tensión del vapor (mm de merc.)	Gramos de vapor por m <sup>3</sup> de aire Satur.	Kilo calorías del vapor por m <sup>3</sup> de aire Sat.	Volumen total del aire húmedo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
5	4.6	4.9	2.9	1.006	54	111.9	139.0	102.0	1.405
10	6.5	6.9	5.7	1.028	56	123.2	155.8	114.2	1.439
15	9.2	9.8	9.0	1.049	58	135.5	174.7	126.7	1.476
20	12.7	13.6	12.9	1.073	60	148.8	196.0	140.8	1.518
25	17.4	18.8	17.6	1.098	62	163.2	220.2	156.7	1.564
30	23.6	25.7	23.4	1.127	64	178.7	247.6	174.5	1.615
32	31.5	34.8	30.6	1.158	66	195.5	279.0	195.1	1.673
34	35.4	39.2	33.9	1.172	68	213.6	314.9	218.4	1.738
36	39.6	44.1	37.6	1.187	70	233.1	356.4	245.1	1.814
38	44.2	49.6	41.6	1.202	72	254.1	404.6	276.4	1.900
40	49.3	55.8	46.0	1.218	74	276.6	461.1	313.0	2.000
42	54.9	62.6	50.9	1.236	76	300.8	527.9	356.0	2.118
44	61.1	70.2	56.2	1.255	78	326.8	607.8	407.0	2.257
46	67.8	78.8	62.2	1.275	80	354.6	704.8	470.0	2.427
48	75.2	88.3	68.9	1.297	85	433.0	1066.5	702.0	3.052
50	83.2	98.9	76.0	1.321	90	525.4	1802.7	1173.0	4.310
52	92.0	110.8	84.0	1.347	95	633.7	4035.4	2600.00	8.112
	101.5	124.1	93.1	1.374	100	760.0	-	-	-

5.1.3. Funcionamiento del gasógeno

5.1.3.1. Estructura del gasógeno

La figura ( 5.2 ); representa un gasógeno de hierro a más elemental.

Consta de un horno de cubo de fierro refractaria, que se llena de combustible cargado sobre la parrilla b. Entre los brotes de esta penetra el aire, i se toma presión por el tubo e (empirado a través de la columna de combustible). El gas sale del generador por la boca c. El combustible se introduce mediante una tolva de carga i un vitel de doble cierre (tapa f y campana g). La escoria se extrae por las ptezuelas h situadas al nivel de la parrilla. Para tizar el fuego y expulsar la escoria hacia abajo, hay en la bveda del generador un orificio pie fuego i por lo cuales se introduce el fogonero sptn; se viene cobiar este orificio con una disposición que evite auto tico e te l s'li el gas c o se bren quéllos por picar el fuego.

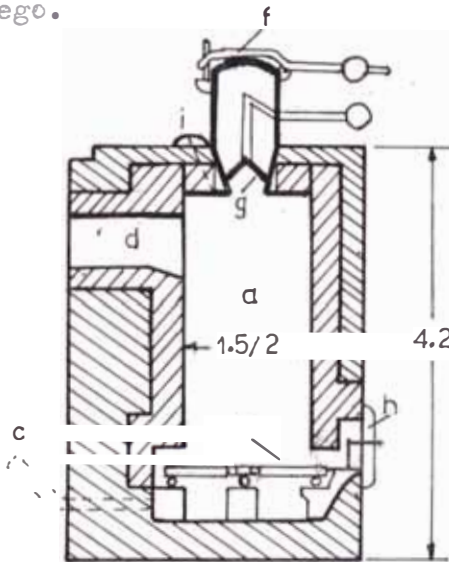


Fig. 5.2

Estructura del gasógeno

### 5.1.3.2. Marcha en estado de régimen

Sobre la parrilla se forma una capa de carbón que, poco a poco, se repone a la capa de combustible y candelilla que hay encima. Sobre ésta, a su vez, hay una columna de combustible, de mayor o menor altura según las circunstancias; cuanto más uniforme se repartan las distintas capas, en toda la sección transversal de la cuba, tanto mejor trabajar el gasógeno. En esta uniformidad influyen la manera de cargar el combustible y de extraer la escoria, la buena distribución del aire y la granulación del combustible empleado.

### 5.1.3.3. Conducción del aire

Para conseguir una buena gasificación, es preciso que el aire se distribuya por igual en toda la sección transversal; por consiguiente la velocidad del aire ha de ser igual en todos los puntos de una misma capa.

En la práctica, esta condición sólo puede cumplirse de modo satisfactorio empleando un carbón relativamente grueso, sobre todo cuando, la escoria contribuye a igualar la distribución del aire y a producir una capa de incandescencia uniforme, obteniéndose un escape regular de toda la columna de carbón y un gas de buena calidad. De todos modos, aun quemando carbones gruesos, el aire tiende a caer junto a las paredes de la cuba, porque allí encuentra la mínima resistencia.

El aire es inyectado por un ventilador de fuerza centrífuga (a veces, por un ventilador de capullos); los inyectores con chorro de vapor se emplean sólo como recurso excepcional. La presión del aire varía - según la clase de combustible, las condiciones de marcha (sobrecarga), y la altura de la columna de carbón - de 30 a 300 mm de columna de agua o más.

#### 5.1.3.4. Carga de gasógeno

En todos los gasógenos y con todos los combustibles, la gasificación es más energética en los bordes (junto a las paredes) que en el resto de la sección transversal, y por consiguiente allí es más intensa, también la producción de escoria. Conviene, pues, adoptar aparatos de alimentación que lancen la combustión pequeña hacia la periferia.

La altura de carga (escoria, más capa incandescente, más combustible de recubrimiento), empleando coque, antracita o hulla de tamaño corriente, varía de 0.8 a 1.5 m o más (para briquetas de lignito 1.2 a 1.6 m o más). A fin de gasificar grandes cantidades de combustible por hora, en la actualidad se construyen (para carbones adecuados) gasógenos que trabajan con alturas de carga de tres metros o más. El espesor de la capa de escoria, debajo de la zona incandescente, ha de tener de 10 a 30 cm.

#### 5.1.4. Gasificación de los distintos combustibles

##### 5.1.4.1. Coque y antracita

Toda vez que gasificar es convertir el carbono sólido del combustible en óxido de carbono, los combustibles más adecuados serán aquellos que se componen esencialmente de carbono, es decir, que no contienen materias volátiles (sobre todo alquitrán); en este caso se hallan el coque y la antracita. El mejor carbón para un gasógeno es el coque (destilado a baja temperatura) de lignito o de hulla, de tamaño corriente, sobre todo por sus excelentes condiciones de combustión.

Dichos combustibles pueden gasificarse, incluso granulados en tamaño relativamente pequeño (mientras no sean pulverulentos); puede llegarse a tamaños de 5 a 10 mm, pero este último no se empleará solo.

El carbón vegetal (que en definitiva es un coque), aunque reúne excelentes condiciones para ser gasificado, resulta caro.

#### 5.1.4.2. Carbones con materia volátil

Pueden gasificarse si se presentan en trozos, y a condición de que no se pulvericen en el fuego. Antes de que estos carbones experimenten, dentro del gasógeno, la gasificación propiamente dicha, es preciso que se hallen expuestos a una temperatura bastante alta para que desprendan toda la materia volátil. El gasógeno tiene, entonces, una zona de gasificación y otra encima de destilación.

La materia volátil destilada se compone de gas (hidrocarburos) y de alquitrán; ambos componentes se mezclan con el gas procedente de la zona de gasificación. Los hidrocarburos, dada su gran potencia calorífica, enriquecen el gas.

Briquetas de lignito. Se gasifican particularmente bien, porque dan trozos de tamaño regular y por la finura de grano de la escoria, sobre todo si se tiene cuidado de cribar el menudillo originado por el transporte y descarga. Dan un gas de mucha potencia calorífica.

Hulla gruesa (galleta). Se presta a la gasificación, siempre y cuando no se trate de hullas aglutinantes (o por lo menos muy aglutinantes (o por lo menos muy aglutinantes); la más adecuada es la hulla de gas (hulla para gasógenos), que puede emplearse incluso como "todo uno" si éste no contiene mucho menudillo.

Cuando se trata de hullas aglutinantes, puede mejorarse la perturbación que producen en la marcha del gasógeno, mezclándolas con otro carbón no aglutinante (por ejemplo briquetas de lignito), aunque esta operación complica el servicio. Actualmente se construyen también gasógenos provistos de unos agitadores (refrigerados con agua

que evitan el apelmazamiento de la masa de combustible.

#### 5.1.4.3. Carbones con mucha ceniza

Estos combustibles, cuyo aprovechamiento en otra forma ofrece siempre dificultades, pueden gasificarse bien (aun cuando contengan un máximo de cenizas), si se presentan en trozos (galleta). Si su proporción de cenizas es muy crecida, requieren parrillas especiales.

Como que el peso consumido per hora, en el gasógeno, tratándose de carbones de mucha ceniza, no es mayor que empleando hulla, resulta que para producir la misma cantidad de gas - el número de gasógenos tendra que ser bastante mayor, es decir, mayor el coste de la instalación (compensado por el precio menor del combustible).

#### 5.1.4.4. Carbones muy húmedos

Lignitos en bruto. Pueden gasificarse con facilidad, si se emplean en tamaño de galleta. El combustible es desecado en la parte superior de la cuba por el gas que asciende, luego experimenta una destilación, y por fin se gasifica. Así pues, la humedad del carbón no llega a la zona de gasificación, y por lo tanto no puede prescindirse de inyectar vapor para obtener el gas.

En la práctica basta inyectar muy poco vapor, en algunos gasógenos basta, incluso, el vapor que se desprende del cierre hidráulico.

El calor necesario para evaporar el agua del combustible, cuando éste es muy húmedo, tiene que obtenerse a expensas de una mayor producción de CO<sub>2</sub> (con la consiguiente disminución de CO); de ahí la poca potencia calorífica del gas pobre procedente de lignitos con más del 40% de humedad. El gas obtenido es muy húmedo; la eliminación de esta humedad, por enfriamiento y condensación, origina dificultades

(problema del desagüe).

Turba desecada al aire. Contiene todavía gran cantidad de agua (35 a 45 %), pero puede gasificarse bien cargándola en trozos grandes. Algunas clases de turba dan una escoria muy fusible, y esto obliga a trabajar entonces con fuerte inyección de vapor.

#### 5.1.5. Sistemas de gasógenos.

##### 5.1.5.1. Gasógenos antiguos

Nacieron en los altos hornos; los gasógenos primitivos trabajaban sangrando la escoria líquida como en un horno siderúrgico.

Los gasógenos de escoria sólida más antiguos eran de sección rectangular, con paredes de ladrillo engatilladas, y en la parte baja de la cuba tenían una parrilla plana o inclinada y cubeta de agua en el cenicero. El gasógeno de Siemens fig. (5.3), de parrilla inclinada, es el tipo más conocido de ellos, que todavía hoy se adopta para producir gas en cantidades moderadas. Ventajas: coste reducido, conducción sencilla. Producción: por metro cuadrado de parrilla y hora gasifican 70 a 80 kg de hulla; los tamaños corrientes gasifican 3000 a 4000 kg en 24 horas.

##### 5.1.5.2. Gasógenos modernos

Tienen sección circular, la cuba está formada por paredes refractarias de 250 mm. de grueso, con una camisa o envolvente exterior de palastro que, además de afianzar el conjunto, evita las fugas de gas (fig. 5.4). Entre la envolvente de palastro y el revestimiento refractario se intercala una capa de 50 ó 60 mm. de escorias, como aislante y para compensar las dilataciones. En la generalidad de



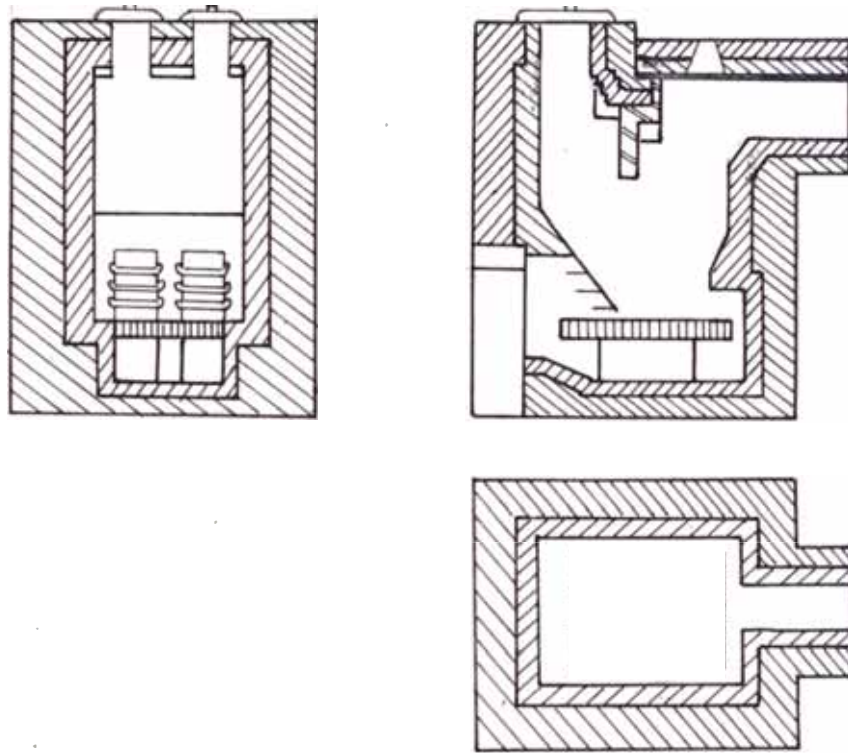


Fig. 5.3

Gas ge o Sieme s

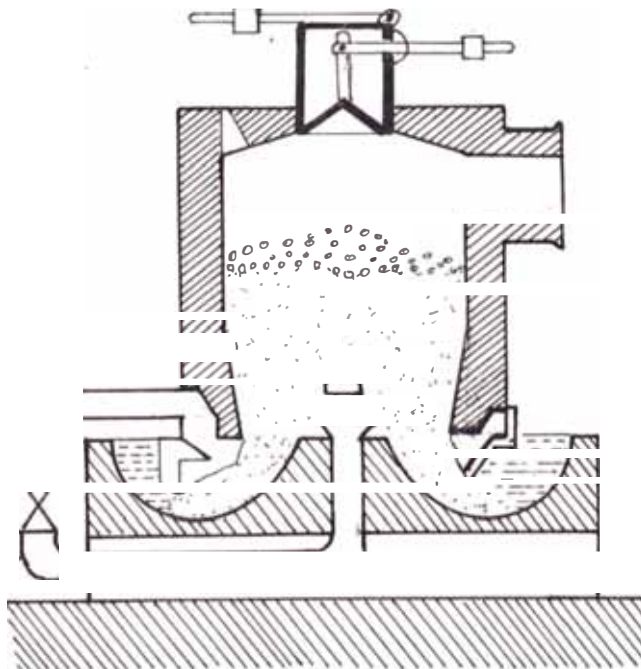


Fig. 5.4

G sògeno Lurgi

### 5.1.5.3. Gasógeno de parrilla giratoria

Véase la figura 5.5; esta primitiva construcción de KERPELY (muy generalizada) ha sido objeto de numerosas variantes, que no ofrecen ventajas sensibles.

El cenicero de estos gasógenos es una cubeta rotatoria, con la cual gira (céntrica o excéntrica) la parrilla, que tiene planta circular, elíptica, poligonal o de otra forma. El movimiento relativo de la parrilla, con respecto a la parte inferior del gasógeno (corona e inversió), produce una fragmentación de la escoria gruesa que hace posible su salida y extracción. Por debajo de la corona inferior las escorias y cenizas forman un talud natural muy tendido, causado por la rotación del cenicero y el peso de la columna de carbón que lleva al cubo; una vertedera oblicua recoge la escoria y la hecha al exterior, por encima del borde de la cubeta (extracción automática). De este modo se extrae la totalidad de la escoria que se forma, en cantidad particularmente grande, junto a las paredes de la cubeta; pero, además, la rotación de la parrilla y la forma cóncava o piramidal de ésta expulsan también una buena parte de la escoria central, de modo que estos gasógenos se prestan incluso para carbones con muchas cenizas. En cambio, la parrilla giratoria ordinaria reduce el apelmazamiento de las hullas aglutinantes, no influyen o tampoco de modo decisivo en la formación de la escoria.

La cubeta giratoria descaja en una corona de rodillos o de bolas dispuesta y calculada de modo que resiste el fuerte empuje lateral que está sometida. Transmisión del movimiento: por corona dentada helicoidal y tornillo sin fin (impulsado por un mecanismo de trinquete).

La cámara de aire (debajo de la parrilla) ha de ser accesible por una galería, para poder extraerla cuando en cuando los residuos que

Los gasógenos modernos, la parte inferior de la cuba (zona de gasificación) es un cuerpo de palastro de pared doble, con circulación de agua (fig. 5.6)

A fin de poder extraer la escoria, sin interrumpir el funcionamiento, estos gasógenos tienen cierre hidráulico, para lo cual la columna de carbón descansa, principalmente, en el fondo de una cubeta de agua. La mezcla de aire y vapor casi siempre es inyectada, sólo, por el eje de la cuba, moderadamente se inyecta, en forma regulable, tanto por el centro como por la periferia de la cuba (fig. 5.4)

La extracción de la escoria se efectúa a mano; la que se forma en el centro de la cuba resulta inaccesible o de extracción muy difícil; por esta razón, tales gasógenos no se prestan sino para combustibles que den poca escoria. Para ellos y tratándose de gasificar cantidades moderadas, resultan muy adecuados, y además muy seguros por carecer de órganos en movimiento o sujetos a grandes esfuerzos.

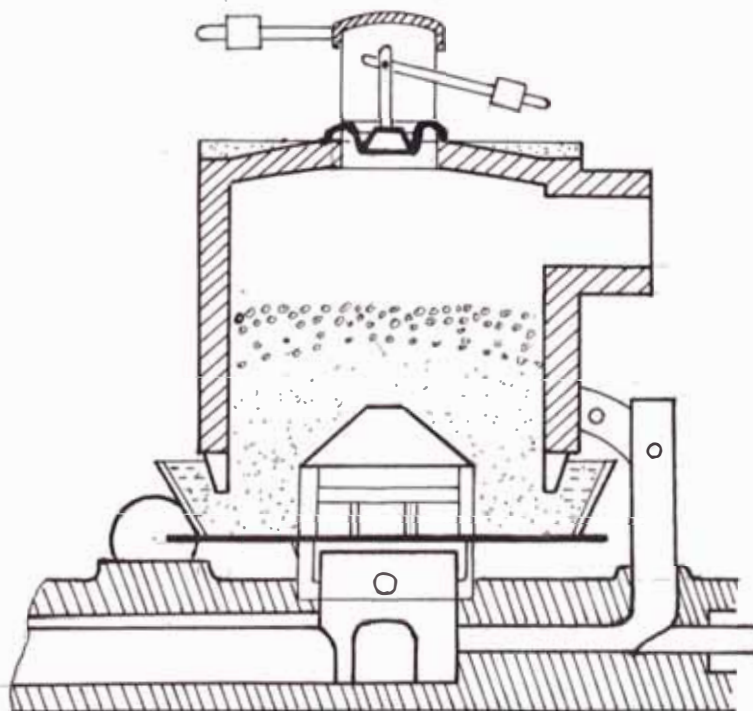


Fig. 5.5

caen por entre los barrotos. Las tres o cuatro hiladas inferiores del revestimiento refractario de la cuba han de poderse sustituir, sin tocar las de encima; para ello, éstas deseansan en un anillo exprefeso. La cubeta, la corona de inmersión y la parrilla han de estar formados por varios sectores, para contrarrestar las tensiones térmicas que grietarian estas piezas (de hierro colado).

En los gasógenos con envolvente refrigerada (fig. 5.6); ésta se halla en comunicación con un colector lateral de vapor; esto origina una circulación del agua del modo que indican las flechas. El calor absorbido por el agua, en la envolvente, determina su evaporación en el colector. Gasificando coque, cada kilogramo de éste da lugar a 0.8 kg de vapor; con briquetas de lignito, la evaporación es de 0.4 a 0.5 kg/kg<sup>2</sup>

#### 5.1.6. Balance térmico del gasógeno para briquetas de antracita

##### 5.1.6.1. Calor Q<sub>1</sub> aportado al gasógeno por kilogramo de carbón

- Potencia calorífica de las briquetas:

$$1 \text{ kg. } 4800 \text{ Kcal/kg} \dots\dots\dots = 4800.00 = 99.74\%$$

- Calor sensible del aire inyectado:

$$1.48 \text{ m}^3/\text{kg} \times 20^\circ \times 0.312 \text{ Kcal/m}^3 \dots\dots = 9.23 = 0.20\%$$

- Calor sensible del vapor inyectado:

$$0.053 \text{ kg/kg} \times 120^\circ \times 0.464 \text{ Kcal/kg} \dots\dots = 2.95 = 0.06\%$$

$$Q_1 = 4812.18 = 100.00\%$$

##### 5.1.6.2. Calor Q<sub>2</sub> devuelto por el gasógeno por kilogramo de carbón.

- Gas, potencia calorífica:

- 2.4 m<sup>3</sup>/kg x 1490 Kcal/m ..... = 3576.00 = 74.3%
- Gas, calor sensible:  
2.4 m<sup>3</sup>/kg x 400° x 0.337 Kcal/m<sup>3</sup>-° ..... = 323.52 = 6.74%
- Alquitrán, potencia calorífica:  
2.4 m<sup>3</sup> x 0.021 kg/m<sup>3</sup> x 9000 Kcal/kg.... = 453.60 = 9.44%
- Alquitrán, calor sensible:  
2.4 m<sup>3</sup> x 0.021 kg/m<sup>3</sup> x 400° x 0.300 Kcal/kg-° 6.05 = 0.12%
- Humedad del gas, calor sensible:  
2.4 m<sup>3</sup> x 0.110 kg/m<sup>3</sup> x 400° x 0.470 Kcal/kg-° 49.63 = 1.03  
L<sub>1</sub> = 4408.80 = 91.63%
- Transmisión de las paredes (por diferencia= 319.44 = 6,63
- Fugas
- Carbón arrastrado por el gas y las cenizas:  
0.0103 kg/kg x 8150 Kcal/kg ..... = 83.94 = 1.74%  
Q<sub>2</sub> = 4812.18 = 100.00%

Rendimiento del gasógeno  $n = \frac{L_1}{Q_1} = \frac{4408.80}{4812.18} = 91.63\%$

5.2. Uso del oxígeno como  
perspectiva futura  
en la combustión

El empleo de este elemento implica hacer una instalación de una planta de oxígeno; el cual es de un costo inicial elevado, para ser instalado desde un comienzo en una planta. Motivo por el cual, en esta sección haremos la evaluación de ahorro de combustible para el horno diseñado; variando la cantidad del aire y oxígeno añadido; con el fin de obtener, una curva, que muestre objetivamente la tendencia de ahorro de combustible al variar el % de oxígeno al aire desde, (0% a 100%).

5.2.1. Características de la  
Combustión en el horno

QL = 167,343 Kcal/HR	Calor para fundir el vidrio
QN = 283,962 Kcal/HR	Calor necesario en el horno
TP = 1750°C	Temperatura promedio de los gases en el horno.
ε% = 36%	Exceso de aire.
TA = 2151°C	Temperatura de la llama diabática
Ta = 500	Temperatura del aire a la entrada del quemador.

Es más la reacción estequiométrica de la combustión estará dada por la siguiente relación:



5.2.2. Balance térmico de la  
Combustión en el horno

Empleando la relación estequiométrica, establecido en la sección anterior y las fórmulas empleadas en la sección 3.3.5; determinaremos la masa de gas que pasa por el recuperador para calentar el aire a los 500°C, el gas que pasa por la chimenea principal y el número de moles de combustible para cada caso de porcentaje de oxígeno, el horno que se toma como volumen de control es el que aparece en la Fig. (3.8).

5.2.2.1. Cálculo de masas por el  
recuperador y chimenea

Empleando la misma terminología desarrollada en la sección 3.3.5 para determinar la masa de gas en el recuperador tenemos la siguiente fórmula:

$$MR = \frac{NC \times (24 \times (\Delta h_{s'})_{O_2} + 90.24 \times (1 - \%) \times (\Delta h_s)_{N_2}) \times MF}{A} \quad (5-1)$$

Para el caso de la reacción de combustión, el valor de "A" será:

$$A = \left[ \begin{array}{l} 12 \times (\Delta hi)_{CO_2} + 13 \times (\Delta hi)_{H_2O} + 5.5 \times (\Delta hi)_{O_2} \\ + 90.24 \times (1 - \%) \times (\Delta hi)_{N_2} - 12 \times (\Delta hs)_{CO_2} - 13 \times (\Delta hs)_{H_2O} \\ - 90.24 \times (1 - \%) \times (\Delta hs)_{N_2} - 5.5 \times (\Delta hs)_{O_2} \end{array} \right]$$

(5-2)

El valor de la masa de gases que sale por la chimenea principal y el de la mezcla de masa aire-oxígeno, están dados por las siguientes relaciones:

$$MC = (938 + (1 - \%) \times 2526.72) \times NC - MR \quad (5-3)$$

$$M_M = (768 + (1 - \%) \times 2526.72) \times NC$$

5.2.2.2. Determinación del consumo de combustible

En esta sección determinaremos valores posibles, del número de moles y masa del combustible quemado, para diferentes porcentajes de oxígeno introducidos al aire; y pre calentada. La mezcla a 500°C; a su vez la temperatura promedio del gas en el horno ha sido considerada a 1750°C. Para este cálculo se hará uso de la ecuación 3.9; empleando su misma terminología.

$$NC = (QN / (\sum H_p N_p - \sum H_r N_r)) \quad (5.5)$$

Donde:

$$\sum H_p N_p = \left[ \begin{aligned} &(12 \times MR/MT) \times (h_{CO_2}^{\circ} + (\Delta h_s)_{CO_2}) + (13 \times MR/MT) \times \\ &(h_{H_2O}^{\circ} + (\Delta h_s)_{H_2O}) + (90.24 \times (1 - \%) \times MR/MT) \times (\Delta h_s)_{N_2} \\ &+ 5.5 \times MR/MT \times (\Delta h_s)_{O_2} + (12 \times MC/MT) \times (h_{CO_2}^{\circ} + (\Delta hi)_{CO_2}) \\ &+ (13 \times MC/MT) \times (h_{H_2O}^{\circ} + (\Delta hi)_{H_2O}) + (90.24 \times (1 - \%) \\ &\times MC/MT) \times (\Delta hi)_{N_2} + (5.5 \times MC/MT) \times (\Delta hi)_{O_2} \end{aligned} \right]$$

$$\sum H_r N_r = (h_{C_{12}H_{26}}^{\circ}) + 24 \times (\Delta h_s')_{O_2} + 90.24 \times (1 - \%) \times (\Delta h_s')_{N_2}$$



Donde:

$h^{\circ}_{CO_2} = 94,854$	cal/grm-mol	Entalpía de formación del $CO_2$ a 1 atmósfera y $25^{\circ}C$
$(\Delta h_s)_{CO_2} = 5,748$	cal/grm-mol	Entalpía del $CO_2$ a $550^{\circ}C$ a 1 Atmosf.
$h^{\circ}_{H_2O} = -57,794$	cal/grm-mol	Entalpía de formación del $H_2O$ a 1 atmósfera y $25^{\circ}C$
$(\Delta h_s)_{H_2O} = 4,516$	cal/grm-mol	Entalpía del $H_2O$ a $550^{\circ}C$ y a atmósfera.
$(\Delta h_s)_{N_2} = 3,770$	cal/grm-mol	Entalpía del $N_2$ a $550^{\circ}C$ y 1 atmósf.
$(\Delta h_s)_{O_2} = 3,973$	cal/grm-mol	Entalpía del $O_2$ a $550^{\circ}C$ y 1 atmósf.
$(\Delta h_i)_{CO_2} = 22,189$	cal/grm-mol	Entalpía del $CO_2$ a $1750^{\circ}C$ y a atmósfera.
$(\Delta h_i)_{H_2O} = 17,655$	cal/gr.mol	Entalpía del $H_2O$ a $1750^{\circ}C$ y 1 atmósfera.
$(\Delta h_i)_{N_2} = 13,613$	cal gr-mol	Entalpía del $N_2$ a $1750^{\circ}C$ y 1 atmósfera.
$(\Delta h_i)_{O_2} = 14,357$	cal/grm-mol	Entalpía del $O_2$ a $1750^{\circ}C$ y 1 atmósfera.
$(\Delta h_s')_{N_2} = 3,395$	cal/grm-mol	Entalpía del $N_2$ a $500^{\circ}C$ y 1 atmósfera.
$(\Delta h_s')_{O_2} = 3,570$	cal/grm-mol	Entalpía del $O_2$ a $500^{\circ}C$ y 1 atmósfera.
$h^{\circ}_{C_{12}H_{26}} = -144,322$	cal/grm-mol	Entalpía de formación del $C_{12}H_{26}$ a 1 atmósfera y $25^{\circ}C$

Reemplazando estos valores en las fórmulas (5-1), (5-2), (5-3), (5-4) y (5-5); obtenemos las siguientes relaciones:

$$A = 4253.97 + 8882.32.32 \times (1 - \%)$$

$$MR = MT \times NC \times (85680 + 306364.8 \times (1 - \%))/A$$

$$MC = (938 + (1 - \%) \times 2526.72) \times NC - MR$$

TABLA 5.2

% ●	MT	A	MR/NC	MG/NC	NC	M <sub>PI</sub>	MO	MG
					# moles/HR	Kgr/HR	Kgr/HR	Kg/HR
8	3464.72	1313539.3	1833.88	243.84	396.12	1304.4	67.32	1371.32
18	3212.12	1224716.1	947.88	2264.17	364.93	1172.17	62.84	1234.21
28	2959.38	1135892.8	861.77	2097.61	338.17	943.28	57.48	1000.76
38	2706.70	1047069.4	775.86	1930.84	315.07	799.24	53.56	852.80
48	2454.83	958246.4	690.18	1763.85	294.92	673.61	50.13	723.74
58	2201.36	869423.1	604.79	1596.57	277.19	563.07	47.12	610.19
68	1948.69	780599.9	519.81	1428.88	261.48	465.09	44.45	509.54
78	1696.62	691776.7	435.39	1266.63	247.45	377.61	42.07	419.68
88	1443.34	602953.4	351.77	1091.57	234.85	299.04	39.92	338.96
98	1190.67	514130.2	269.37	921.3	223.47	228.09	37.99	266.08
100	938	42537	188.96	749.04	213.14	163.69	36.23	199.92

$$M_M = (768 + (1 - \%) \times 2526.72) \times NC$$

$$MT = 938 + 2526.72 \times (1 - \%)$$

$$NC = \frac{-283962.9 \times 1000}{\frac{1}{MT} \times \frac{MR}{NC} \times (-1730566 + 340204.8 \times (1 - \%) + \frac{MC}{NC} \times (-1305223.5 + 1228437.1 \times (1 - \%))) - 144322 + 85680 + 306364.8 \times (1 - \%)}$$

De acuerdo a estas fórmulas elaboraremos la tabla (5.2), la cuál muestra los diferentes porcentajes de oxígeno añadido al aire, los número moles-gramo/hora de combustible y otras informaciones, que ayudan al cálculo de la masa de combustible necesario.

De acuerdo a la tabla (5.2); elaboraremos la figura (5.6); el cuál muestra la variación de combustible con respecto a la variación de oxígeno; en la combustión, siendo la temperatura de entrada de la mezcla aire oxígeno de 500°C.

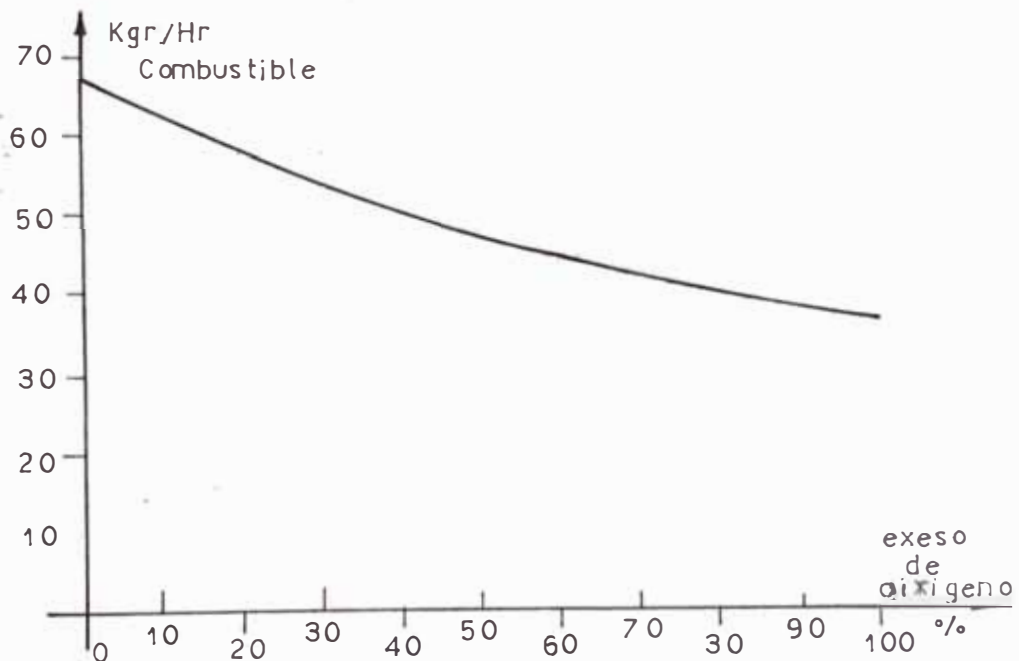


Fig. 5.6

De acuerdo a esta información obtenida, veré que el uso del oxígeno puede reducir el consumo de electricidad desde 67.32 Kgr/HR a 36.23 Kgr; por el diseño de nuestro horno. Lo cual significaría

- Ahorro por mes	26, 18.28 Kgr/ es
- Porcentaje ahorrado	6.18%
- Consumo de oxígeno	117,856.8 Kg./ es

Luego, esto se llevará al taller; que se haga un estudio de una nueva tesis sobre el uso del oxígeno en los hornos; con la finalidad de originar ahorro de combustible. En las inversiones planteadas en fundición.

## COSTOS

El estudio de Costos se efectúa, con la finalidad de determinar; si el costo de inversión, es rentable con respecto a la instalación de una fábrica de vidrios, instalada en la Localidad de Huancayo. Para éste estudio se vió por conveniente usar como moneda el dólar fijo; ya que nuestra moneda actualmente esta sufriendo un desorden devaluativo, lo cual conduciría a un estudio económico muy complejo o quizás imposible.

Con el fin de poder obtener costos de los equipos a usar en la planta, y asimismo del área del terreno a utilizar para la misma se elaboró la tabla (6.1); de dimensionamiento de equipos. Lo cual también puede ser observada objetivamente en el plano (P-1); siendo ésta última la que nos proporcionará el área de terreno, que requerirá nuestra fábrica. Y, asimismo la energía eléctrica que requiere ésta.

El estudio de costos estará dividido en las siguientes secciones; a) Puesta en operación inversión inicial; b) Costos fijos; c) Costo variable Y, d) Rentabilidad. Todas estas secciones serán tratadas a continuación.

### 6.1. Puesta en Operación

Mucho antes que una fábrica empiece a ser rentable es necesario hacer inversiones iniciales tales como;

- Inversiones de constitución de empresa.
- Gastos de terreno y edificio.

TABLA (6.1) DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO

ITEM	EQUIPO	Largo	Ancho	Alto	Diametro	RPM	KW	Kg/HR	M <sup>3</sup>
1	Lavador de Silice	2.0	0.6	1.2	- . -		1.5	2187	1.92
2	Secador eléctrico	3.0	0.6	1	- . -		212	2041	0.036
3	Chancadora	1.5	0.6	1.5	- . -	275	5	502	-.-
4	Molinc	-.-	-.-	1.5	0.6	60	4	502	-.-
5	Cangilon para Sílice (SiO <sub>2</sub> )	0.65	0.25	5.00	0.25	187	1.0	2187	
6	Cangilon para Carbonato Calcio	0.65	0.25	5.00	0.25	150	0.5	437	
7	Cangilon para Carbonato Sodio	0.65	0.25	4.20	0.25	150	0.5	437	
8	Cangilon para óxido de boro	0.65	0.25	4.20	0.25	150	0.5	437	
9	Cangilon para vidrio Reciclado	0.65	0.25	4.20	0.25	150	0.5	437	
10	Silo para Sílice			3.17	3.16				32
11	Silo para Carbonato Calcio			2.00	2.00				7
12	Silo para Carbonato Sódico			2.00	2.00				7
13	Silo para óxido de boro			2.00	2.00				7
14	Silo para vidrio reciclado			2.00	2.00				7

ITM	EQUIPO	■	■	■	■	■	■	RPM	KW	Kg/HR	m <sup>3</sup>
		Long	Ancho	■	■	■	Diámetro		Potencia	Flujo	Capacid.
15	Mezcladora	1.5					1.00	53	2	417	0.32
16	Fajas Transport. de Sflize	4	0.4			0.5			1	312	
17	Faja Transp. Carbonato Calcio	3.5	0.3			0.5			0.5	0.3	
18	Faja Transport. Carbonat. Sodio	3	0.3			0.5			0.5	0.3	
19	Faja Óxido de Bario	3.5	0.2			0.5			0.3	41	
20	Faja vidrio reciclado	4	0.4			0.5			0.5	0.3	
21	Gusano Transportador	2							1.5	417	
22	Horno de recocido	5	2			2			260	417	
23	Máquina para vidrio plano	6	2			1.5			260	417	
24	Máquina para botellas					0.0			10	417	
25	Máquina para utencilios					0.0			10	417	
26	Tanque petfolec	7					3.0			70	50
27	Horno Fundición	4.5	3.20			5.40			1012		
28	Compresora	1.5	1			1.0			60		
29	Transformador (2300 - 220)	2	2			2			650		

- Gastos de equipos mecánicos e instalación.
- Gastos de equipos de servicio de planta
- Gastos de equipos de servicio administrativos.
- Gastos de pre operación de la planta.

Todos estos gastos son de gran importancia en el estudio de recuperación de capital. Los cuales son distribuidos de acuerdo a una política de recuperación de inversión, los períodos de recuperación de gastos de inversión son los siguientes:

- Gastos de constitución de empresa ..... 5 años
- Gasto de edificio ..... 30 años
- Gasto de equipos mecánicos y eléctricos ..... 10 años
- Gasto de equipos de servicio de planta ..... 5 años
- Gasto de equipo de administración ..... 5 años
- Gasto pre operativos ..... 5 años
- El costo de terreno entra como alquiler.
- El costo de horno de fundición ..... 5 años

Es importante hacer notar que el terreno no tiene un costo de depreciación, pero si se le puede imputar un costo de alquiler, cercano a una tasa de interés bancario.

También en caso del horno de fundición, se ha hecho una excepción en cuanto al período de recuperación de 10 años, ya que éste sólo tiene un período máximo de campaña de 5 años de operación real. Es más, debido a que éste es el rubro; que ha sido desarrollado a lo largo de esta tesis, el análisis de su costo tendrá un tratamiento especial.

6.1.1. Costo de Constitución de empresa

- Libros de Contabilidad ..... \$ 100
- Notario..... 1000



- Licencia de Salud .....	\$ 100
- Licencia Municipal .....	100
- Registro Industrial .....	500
- Certificado del Centro Nacional de Trabajo.....	400
- Libros de planilla .....	300
- Otros .....	200
	2,700

6.1.2. Costos de Construcciones Civiles

Para determinar este costo se elaboró la tabla (6.2), donde aparece en forma global los costos de edificación de la planta de acuerdo a un metraje obtenido en el Plano (P-1).

TABLA 6.2

COSTOS DE CONSTRUCCIONES CIVILES

ITM	DESCRIPCION	CANT.	UNID.	C/U.	COSTO
1	Terreno	3000	m <sup>2</sup>	8	24,000
2	Edificación de oficinas	480	m <sup>2</sup>	250	120,000
3	Cercado	780	m <sup>2</sup>	50	39,000
4	Edificación de planta	600	m <sup>2</sup>	300	180,000
5	Costo de pozo de petróleo	30	m <sup>3</sup>	400	12,000
6	Costo de Cimentación	20	m <sup>3</sup>	420	8,400
7	Obras sanitarias	Est.			20,000
8	Mano de Obra				60,000
TOTAL					463,400

6.1.3. Costo de Instalación Mecánica

Las máquinas mecánicas que serán usadas; han sido dimensionadas según la tabla (6.1), En este rubro de costos globales, no ha sido considerado el del horno por lo que será determinado posteriormente en la siguiente sub sección. Al igual que el caso anterior se elaboró la siguiente tabla.

TABLA 6.3

COSTO DE INSTALACIONES MECANICAS

ITM	DESCRIPCION	CANT.	UNID.	c/u.	COSTO
1	Tanque de petróleo	1	EA	4,000	4,000
2	Bomba de petróleo	1	EA	1,000	1,000
3	Sistema de combustibler	1	ST	4,000	4,000
4	Queanador de petróleo	1	EA	5,000	5,000
5	Compresor	1	EA	30,000	30,000
6	Chancadora	1	EA	10,000	10,000
7	Mezcladora	1	EA	3,000	3,000
8	Fajas Transportadoras	5	EA	4,000	20,000
9	Balanzas	5	EA	3,000	15,000
10	Sistema aire			4,000	4,000
11	Silo de SiO <sub>2</sub>	1	EA	4,000	4,000
12	Silo de CO <sub>2</sub> Na	1	EA	2,000	2,000
13	silo de CO <sub>2</sub> Ca	1	EA	2,000	2,000
14	Silo de BO <sub>2</sub>	1	EA	2,000	2,000
15	Silo de vidrio roto	1	EA	2,000	2,000
16	Gusano alimentador al horno	1	EA	3,000	3,000
17	Molino de reciclaje	1	EA	3,000	3,000

ITM	DESCRIPCION	CANT.	UNID.	c/u.	COSTO
18	Cangilon SiO <sub>2</sub>	1	EA	3,000	3,000
19	Cangilon	4	EA	2,000	8,000
20	Máquina para botella	1	EA	80,000	80,000
21	Máquina para envases	1	EA	40,000	40,000
22	Recuperador	1	EA	20,000	20,000
TOTAL.					265,000

6.1.4. Costo de Construcción de Horno

TABLA 6.4

ITM	DESCRIPCION	CANT.	UNID.	c/u.	COSTO
1	Refractario para paredes	6200	EA	1.2	7,440
2	Lad. Aislante para pared	3100	EA	3.6	1,116
3	Lad. Zirconio para cuba.	100	EA	60	6,000
4	Lad. Refractario piso	4750	EA	1.2	5,700
5	Lad. Refractario techo	3100	EA	1.3	4,030
6	Aislante para techo	800	Kg.	1.0	800
7	Ladrillo para chimenea	800	EA	1.0	800
8	Viga 6 13 x 20	8	EA	200	1,600
9	Viga 10WF25	4	EA	300	1,200
10	Templadores fe 1" ø	20	m	30	600
11	Madera bóveda	40	Pie <sup>3</sup>	10	400
12	Plancha fe de 3/16	5	m	80	400
13	Mortero	300	kg.	8	2,400
14	Viga 8WF40	1.5	EA	200	300
15	Mano de Obra	Est.			6,000

39,530

6.1.5. Costo de Máquinas y

Instalaciones eléctricas

En este rubro se incluyen tanto las instalaciones de planta como las de oficina administrativa; ya que para ambas se ha considerado que su período de recuperación es de 1 años.

TABLA 6.5

ITM	DESCRIPCION	CANT.	UNID.	c/u.	COSTO
1	Motor de Chancadora	1	EA	3,000	3,000
2	Motor para Cagilon SIO	1	EA	1,500	1,500
3	Motor para Cagilones	4	EA	1,200	4,800
4	Motor-Faja Transp. SiO <sub>2</sub>	1	EA	2,000	2,000
5	Motor-Faja Transp.	4	EA	1,200	4,800
6	Motor para compresora	1	EA	15,000	15,000
7	Motor para Bomba-petróleo	1	EA	1,000	1,000
8	Motor-Alimentador Horno	1	EA	3,000	3,000
9	Motor para secadora	1	EA	3,000	3,000
10	Motor para Mezcladora	1	EA	3,000	3,000
11	Motor para Horno de recocción	1	EA	2,000	3,000
12	Focos 200 W	210	EA	3	630
13	Focos 100 W	210	EA	2	420
14	Horno eléctrico Vid. Plano	1	EA	150,000	100,000
15	Toma corrientes	60	EA	10	600
16	Transformador (2300-440)	1	EA	180,000	80,000
17	Transformador (440-220)	1	EA	40,000	30,000
18	Contactores	Est.			20,000
19	Cables	Est.			10,000

ITM	DESCRIPCION	CANT.	UNID.	c/u.	COSTO
20	Secador Eléctrico	1	EA	30,000	30,000
21	Centrales eléctricas	Est.			6,000
22	Mano de Obra	Est.			20,000
KTOTAL					327,750

6.1.6. Costo de Servicios Administrativos

TABLA 6.6

ITM	DESCRIPCION	CANT.	UNID.	c/u.	COSTO
1	Máquinas de escribir	6	EA	1,000	6,000
2	Escritorios	8	EA	500	4,000
3	Tablero	1	EA	200	200
4	Equipo de dibujo	1	ST	1,500	1,500
5	Micro Computadora	1	EA	3,000	3,000
6	Horno para Laboratorio	1	EA	15,000	15,000
7	PH-	1	EA	4,000	4,000
8	Micróscopio	1	EA	4,000	4,000
9	Otros equipos Lab.				10,000
TOTAL					47,700

6.1.7. Costo de Servicios de planta

TABLA 6.7

ITM	DESCRIPCION	CANT.	UNID.	c/u.	COSTO
1	Tecla 2 TN	2	EA	1,000	2,000

ITM	DESCRIPCION	CANT.	UNID.	c/u.	COSTO
2	Máquina de soldar	1	EA	4,500	4,500
3	Llaves Boca	1	ST	3,000	3,000
4	Llaves Creyson	1	ST	1,000	1,000
5	Llaves Stylson	1	ST	1,000	1,000
6	Otras herramientas				1,500
7	Repuestos				20,000
TOTAL					33,000

Todos estos costos serán distribuidos dentro de los costos fijos de acuerdo a los períodos de recuperación ya planteados.

## 6.2. Costo Fijo

Dentro de estos costos se encuentran los gastos de inversión distribuidos de acuerdo a la política de recuperación de capital, Mano de Obra, y costo de mantenimiento. Siendo, estos recuperados al final de cada año, siguiendo un tratamiento económico independiente en cada caso.

### 6.2.1. Costos de recuperación

#### Anual de inversión

Los gastos de inversión serán recuperados anualmente, de acuerdo a períodos de recuperación predeterminados y a una tasa de interés del 15%, que es mejor que cualquier tasa de interés que pagan los bancos de países con economía estable. Los valores distribuidos de la inversión inicial aparece en la tabla (6.4); siendo estos valores de costo de recuperación, determinados anualmente, ajustándose a la siguiente,

TABLA 6.6  
CUADRO DE GASTOS DE RECUPERACION

ITM	DESCRIPCION	INVERSION INICIAL	PERIODO RECUP.	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10	VALOR RESCATE
1	Terreno	248000	Alquil.	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	24000
2	Const. Emp.	2700	5	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305	---
3	Edificación	439400	30	66920	66920	66920	66920	66920	66920	66920	66920	66920	66920	292940
4	Inst. Mecán.	265000	10	52001	52001	52001	52001	52001	52001	52001	52001	52001	52001	13250
5	Gosto Horne	39536	Periodo (3) 1	17313	17313	17313	---	---	---	---	---	---	---	---
6	Gosto Horne	45000	Periodo (3) 2	---	---	---	19709	19709	19709	---	---	---	---	---
7	Cesto Horne	50000	Periodo (4) 3	---	---	---	---	---	---	17513	17513	17513	17513	---
8	Inst. Elect.	327750	10	65304	65304	65304	65304	65304	65304	65304	65304	65304	65304	16387
9	Serv. Adm.	47700	5	14229	14229	14229	14229	14229	14229	14229	14229	14229	14229	4770
10	Serv. Planta	33000	5	9844	9844	9844	9844	9844	9844	9844	9844	9844	9844	---
	Totales	1274000		239816	230816	230816	233212	233212	232407	230211	230211	230211	230211	551347

relación:

$$CR = P \times \frac{i \times (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

En forma objetiva podemos apreciar la política seguida para esta recuperación de capital en la figura (6.1)

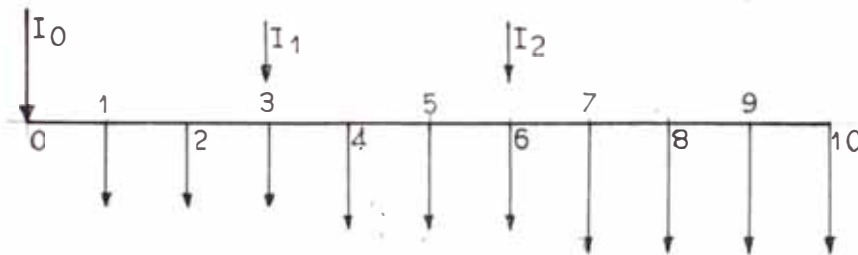


Fig. 6.1

### 6.2.2. Costo de Mano de Obra

Para este rubro nos remitiremos al organigrama de la sección 2.6; fig. (2.26), la cual indica el personal necesario para el funcionamiento de la fábrica diseñada.

El personal de operaciones desde el nivel de supervisor de planta trabajarán en tres turnos; cada uno de ocho horas.

El personal de mantenimiento, sólo para los turnos de tarde y noche trabajarán, un mecánico con su ayudante y un electricista.

En el turno de día el personal en la fábrica trabajará de acuerdo al organigrama planteado.

De acuerdo a esto tendremos los siguientes gastos en Mano de Obra

### 6.2.3. Costo Mantenimiento anual

Esto implica haber hecho un análisis de acuerdo a diferentes recomendaciones de fabricantes y estadísticas de fallas de los diferentes



TABLA 6.9 MANO DE OBRA

ITM	OCUPACION	CANT.	NIVEL	SUELDO	BONIFICACION	IMPUESTO	COSTO/Hom.-mes	COSTO ANUAL
1	GERENTE	1	20	800	173	192	1165	13,980
2	JEFE	4	18	600	136	144	800	42,240
3	SUPERVISOR	3	16	400	99	96	595	21,420
4	ASESOR	2	16	400	99	96	595	14,280
5	SOBRESTANTE	5	14	300	76	72	456	27,600
6	SECRETARIA	1	14	300	76	72	456	5,400
7	OFICINISTA	6	12	200	57	48	305	21,960
8	OPERARIOS	40	10	150	45	36	231	110,800
								257,160

Bonificación incluye:

- Dos sueldos por fiestas
- Temperatura
- Altura
- Asignación familiar

Impuesto = 24% (pago al fisco).

Costo/Hombre-mes = Sueldo + Bonificación + Impuestos

Costo Anual = 12 x N° Hombre x Costo/Hombre-mes

SECRETARÍA DE ECONOMÍA  
ESTADÍSTICA  
ESTADÍSTICA DE PRECIOS Y COSTOS

equipos que serán usados en la planta. Los costos de mantenimiento, en una planta son normalmente de tres tipos tal como sigue:

- Mantenimiento preventivo o correctivo.
- Mantenimiento de reparación parcial.
- Mantenimiento general.

Hacer un análisis de este rubro en una forma analítica escapa al propósito de esta tesis, motivo por el cual hemos tomado porcentajes de los diferentes rubros de costos de edificación, maquinarias de producción y de servicios, con el propósito de evaluar los costos.

Edificio y Rerreno	463,400 x 3% =	13,980
Mantenimiento Mecánico	265,000 x 10% =	26,500
Mantenimiento Eléctrico	327,750 x 10% =	32,750
Equipo de servicio.		<u>1,614</u>
	TOTAL	<u>74,844</u>

#### 6.2.4. Costo Energía Eléctrica

##### Para uso de servicios

- Iluminación	259
- Computadoras	87
- Máquinas de escribir	172
- Herramientas	<u>778</u>
	<u>1,296 \$/AÑO.</u>

#### 6.3. Costos Variables

Se considera como costo variable aquellos que dependen de la mayor o menor cantidad de producción; siendo los valores de producción

determinados través de un estudio de demanda en el mercado, tal como se elaboró en el Capítulo 2, sección 2.5.1., de acuerdo a este estudio se pudo determinar la proyección de crecimiento en la demanda de los productos a fabricar, en base a muestreos realizados en diferentes dependencias y empresas que harían uso de los productos a fabricarse.

En esta sección se evaluó el consumo de energía eléctrica y combustible como gasto variable ya que estos dependen de una mayor o menor producción.

La cantidad de vidrio a producirse al final de cada período dependerá de la capacidad de reinversión del capital inicial, más las ganancias obtenidas de ésta, teniendo como límite máximo de producción al valor de demanda, en su período correspondiente, determinados en el estudio de mercado.

### 6.3.1. Proyección de la Demanda en

Peso del vidrio a fabricar.

Con estos valores de demanda que aparecen con su respectivo valor proyectado, para cada período; estará limitando la producción a un límite máximo, ver tabla (6.10). Estos valores son una buena base, para determinar la política de recuperación del capital.

### 6.3.2. Cálculo del Costo de

Combustible por Kg. de vidrio

De acuerdo a cálculos realizados en el capítulo 3, sección 3.6 se determinó que para fundir 345 kg. de vidrio se necesitaba 18GL/KG de combustible. El precio de petróleo DIESEL 2, tiene un precio promedio de \$ 0.60/GAL. Luego el Costo de Combustible por Kgr. será:

T B L A 6.10

PROYECCIONES FUTURAS DE DEMANDA  
PARA CADA PERIODO.

	Unid./sem	Und./día	m /mes	kgr/HR	Tn/año
Año	Vidrio Utencilios	Vidrio Envase	Vidrio Plano	Peso Total /HR	Producción /Año.
1	2206	1034	22884	345	2981
2	2224	1157	24980	369	3188
3	2278	1280	27076	396	3421
4	2368	1403	29172	425	3672
5	2494	1526	31268	456	3939
6	2656	1649	33364	489	4225
7	2854	1772	35460	524	4527
8	3088	1895	37556	560	4838
9	3358	2018	39652	599	5175
10	3664	2141	41748	640	5529
	$X_p = X_0 + n \cdot f$	$X_p = X_0 + f$	$X_p = X_0 + f$		
FORMULAS DE PROYECCION					

Donde:

$X_p$  = Producción Proyectoado

$X_0$  = Producción en el año (1)

$f$  = 18 para vidrios de utencilio

$f$  = 123 Para vidrios de botellas

$f$  = 2096 para vidrios planos

= Períodos

= Factor de crecimiento.

Costo Comb./kgr. de vidrio =  $18/345 \times 0.60 = 0.0313$  \$/kg.

### 6.3.3. Cálculo del Costo de energía

#### Eléctrica por Kilogramo de

Vidrio Fundido.

La cantidad de energía eléctrica que influye directamente en la producción es tal como sigue:

<u>MAQUINA</u>	<u>KW-HR</u>
- Horno secador	212
- Equipo de transporte	7.5
- Horno de recocido	173
- Máquina para hacer vidrio plano	87
- Máquinas de molienda	9
- Compresora de aire	0
- Lavador	1.5
	550

El costo de energía eléctrica por KW-HR; es de 0.01 \$/KW-HR; luego el costo de energía eléctrica por kilogramo de vidrio fundir será:

Costo Energía Eléct./kg de vidrio =  $550/345 \times 0.01 = 0.016$  \$/kg.

### 6.3.3. Cálculo del Costo de vidrio

A Fundirse en unidad de Peso

Para determinar el costo por cada Kg. de materia prima para fabricar vidrio; retornamos al capítulo 3, sección 3.2.4.1. (Tabla 3.4) la cuál nos proporciona el % de Cada componente a usar. Esto permiti

nuestro fin hemos tomado como precio de venta de 0.35 (\$/Kg).

6.4.1. Alternativa inicial  
de recuperación

Elaboraremos la tabla (6.12); la cual permitirá determinar la rentabilidad del capital inicial.

6.4.2. Cálculo de tasa interna  
de retorno para el caso 1

El capital inicial de la fábrica, con el que se cubre los gastos variables totales del primer año y parcialmente de los siguientes años:

$$CI = 406,283$$

La renta neta total, obtenida al final de los diez años de operación es la suma de todas las rentas netas obtenidas en cada año más el valor de rescate en el décimo año. Lo cual implica que:

$$RN = 3'286,932$$

El capital de salida en el décimo año estará dada por la siguiente ecuación:

$$F = CI + RN$$

$$F = \$ 3'693,215$$

Luego la tasa interna de retorno será la siguiente:



Fig. 6.2

TABLA 6.12

ALTERNATIVA PRIMARIA DE RECUPERACION DE CAPITAL

AÑO	Kg/HR	\$/AÑO Costo Fijo	\$/AÑO Costo Variable	\$/AÑO Egreso Total	\$/AÑO Ingreso	\$/AÑO Renta	\$/AÑO Renta Neta	\$/ Gasto	\$/ Rescate
1	345	564116	406283	970399	1043280	72881	44618	28263	
2	369	564116	454546	998662	1115856	117194	85398	31796	
3	396	564116	466342	1030458	1197504	167046	132895	34151	
4	425	566512	500494	1067007	1285200	218194	181688	36506	
5	456	566512	537000	1103512	1376344	275432	236571	36812	
6	489	565707	575862	1141569	1478736	337167	295950	41217	
7	524	563511	617079	1180590	1584576	403986	361592	42594	
8	560	563511	659474	1222985	1693440	470455	424528	45927	
9	599	563511	705401	1268912	1811376	542464	494181	48263	
10	640	563511	753684	1317195	1935360	618165	969512		351347

Costo Fijo = Valor obtenido de la tabla (6.6)

Costo Variable = Producción x 0.1363 x 24x30x12

Egreso = Costo Fijo + Costo variable

Ingreso = Producción x 0.35x24x30x12

Gasto = Producción - Producción x 0.1363x12x24x30

Renta = Ingreso - Egreso (año n) (año n-1)

Renta Neta = Renta - Gasto + Rescate

$$i = (F/CI)^{1/10} - 1$$

$$i = (3693215/406283)^{1/10} - 1$$

$$i = 24.69\%$$

Este valor se puede mejorar, elaborando una segunda alternativa de recuperación de capital. Tal como se presenta en la siguiente sección:

#### 6.4.3. Segunda Alternativa de Recuperación de Capital

Por este fin hemos obtenido no pagar todos los gastos de inversión en un tiempo más corto, lo cual conlleva a modificar el pago anual de cada una; cubriendo estas con las rentas netas obtenidas al final de cada año; hasta cubrir el costo de la inversión inicial, ver tabla (6.13)

#### 6.4.4. Cálculo de la Tasa Interna de Retorno Por el Caso (2)

El Capital inicial de la fábrica, con el que se cubre los gastos variables totales del primer año y parcialmente de los siguientes años es:

$$CI = \$ 406,283$$

La renta neta total, obtenida al final de los 10 años de operación de la fábrica, es la suma de todas las Rentas Netas obtenidas en cada año, más el valor de rescate en el décimo año; lo cual implica



TABLA 6.17

## SEGUNDA ALTERNATIVA DE RECUPERACION DE CAPITAL

AÑO	Prod. Kg/HR	Devol. Invers.	Costo Fijo	Costo Variable	Egreso	Ingreso	Renta	Gasto	Valor actual	Rescate
1	345	275434	608734	406283	1015017	1043280		28263	1034573	
2	369	316214	649514	434546	1084060	1115856		31796	795470	
3	396	363711	697011	466342	1163353	1197504		34151	556324	
4	425	414900	748200	500494	1248694	1285200		36506	319104	
5	456	469783	803083	537000	1340083	1378944		38862	85539	
6	489	197857	531157	575862	1107019	1478736	371717	41217		
7	524		333300	617079	950379	1584576	634197	42394		
8	560		333300	659474	992774	1693440	700666	45927		
9	599		333300	705401	1038701	1811376	772675	48283		
10	650		333300	753684	1086984	1935360	1199723			351347

qu :

$$RN = \$ 4'030,325$$

El Capital de salida en el décimo año estará dada por la siguiente relación:

$$F = CI + RN$$

$$F = 4'436,608$$

Luego la tasa interna de retorno será la siguiente; (Referirse a la figura 6.2)

$$i = (F/CI)^{1/10} - 1$$

$$i = (4'436,608/406,283)^{1/10} - 1$$

$$i = 27\%$$

Luego, la segunda alternativa de recuperación de Capital es la más rentable.

## CONCLUSIONES

- 1.- El aspecto Histórico demuestra que hacer artesanía dentro de la Industria; genera un Misticismo de ésta; al grado que el arte presenta manifestaciones de un avance técnico con la Industria; En caso nuestro la artesanía vidriera, lograría muchos alcances en nuestro País.
- 2.- Los tipos de vidrio a fabricar en la Zona de Huancayo son el vidrio plano, vidrio para envases y vidrio para utensilios. Ya, que en este tiempo, hay gran demanda; y con proyecciones de crecimiento de los mismos, tal como se muestra en las proyecciones Estadísticas. Siendo la producción inicial del primer año de 345 kg/HR de vidrio a producir.
- 3.- El tipo de energía a usarse para fundir los vidrios, es la de productos Petroquímicos, debido a su mejor manejabilidad que el que el carbón; y asimismo su disponibilidad.
- 4.- La composición de los vidrios a fundir son las siguientes:
  - . Vidrio envases y plano  $\text{SiO}_2$ (71%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%),  $\text{Na}_2\text{O}$ (14%),  $\text{K}_2\text{O}$ (2%),  $\text{CaO}$ (9%), son básicos.
  - . Vidrio para utensilios  $\text{SiO}_2$ (71%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%),  $\text{Na}_2\text{O}$ (14%),  $\text{K}_2\text{O}$ (2%),  $\text{MgO}$ (2%),  $\text{CaO}$ (7%),  $\text{B}_2\text{O}_3$ (2%), Neutro.
- 5.- La cantidad de calor necesaria para fundir, los 345 kg/HR de la mezcla de vidrio; es 167,037 kcal/HR, a una temperatura de fusión de 1450°C.
- 6.- El calor perdido por las paredes del horno es de 116,926 kcal/HR. (Esto de acuerdo al balance termodinámico); esto ocurre a una tem

temperatura promedio de los gases  $1750^{\circ}\text{C}$ .

- 7.- La temperatura del aire del ingreso del horno es de  $500^{\circ}\text{C}$ , y con un exceso del 30% de aire, con lo cual se obtiene una temperatura de llama de  $2200^{\circ}\text{C}$ .
- 8.- Se ha elegido como temperatura de ingreso del aire a  $500^{\circ}\text{C}$ , debido que si se aumenta la temperatura de esta, se obtendrán mayores temperaturas de llama, lo cual traería como consecuencia un aumento de disociación de los gases, este aumento de disociación es perjudicial en la transmisión de calor; y que el  $\text{CO}_2$  al descomponerse en  $\text{CO} + \text{O}$  origina, en éste último, un proceso endotérmico; lo cual conllevaría a una deficiencia en la combustión.
- 9.- La temperatura promedio de los gases de  $1750^{\circ}\text{C}$ , en el funcionamiento del horno; es una temperatura bastante adecuada, ya que los refractarios del horno, lo soportan bastante bien.
- 10.- La cantidad de combustible, Diesel N<sup>o</sup>2, requerido para fundir los 345 Kg/HR de vidrio a una temperatura promedio de gases de  $1750^{\circ}\text{C}$  a una temperatura promedio de gases de  $1750^{\circ}\text{C}$  a una temperatura de aire caliente de  $500^{\circ}\text{C}$  es de aproximadamente 69 Kg/HR.
- 11.- El tipo de horno para la fundición es de cuba, con llama longitudinal, puente-pantalla y recuperador para calentar el aire.
- 12.- El tipo de quemador seleccionado, es el de media presión con una capacidad de (18-24) Gal/HR.
- 13.- La cantidad de oxígeno necesaria para quemar una molécula de  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$  (Hidrocarburo promedio del petróleo Diesel N<sup>o</sup>.2); es de 24 moléculas de  $\text{O}_2$ , considerando el 30% de exceso de oxígeno, para conseguir una combustión perfecta.
- 14.- Las dimensiones técnicas del horno en su zona de fusión son alto 2.53, ancho 2.74m y largo 4.11; y las dimensiones totales del mismo

mo considerando su zona de acondicionamiento del vidrio es alto 2.53m, ancho 2.74m y largo 6.10m.

- 15.- Para las dimensiones térmicas del horno, proporcionadas en el párrafo anterior, el calor producido en la zona de fusión es de 178,647 Kcal/HR, para ser transmitidos al vidrio y a la zona de trabajado.
- 16.- La cantidad de calor que ingresa a la zona de trabajado y mantiene la transmisión de calor en estado estable es de 11,856 Kcal/HR
- 17.- El calor perdido por las paredes del horno en la zona de fusión es de (98,807 Kcal/HR 94,353 Kcal/HR) 116,925Kcal/HR; manteniendo la temperatura de superficie en las paredes y techo de 250°F y 300°F en la solera.
- 18.- En la zona de gases, la pared estará conformada por ladrillo refractario sílice aluminoso, con un espesor de 0.229 m y ladrillo rojo, como aislante de 0.114m. El techo será de ladrillo silicoso con un espesor de 0.229m y aislante de 0.114m de tierra diatómea.
- 19.- En la zona de cuba, la pared en su parte exterior esta forrada de ladrillo rojo de 0.114 m, el ladrillo refractario es sílico aluminoso de 0.229 m, de espesor. Forrado en la parte interior por ladrillo de zirconio silicoso de 0.050m. Y, asimismo el piso de solera esta forrado por ladrillo o solera esta forrado por ladrillo de zirconio silicoso de 0.050 m de espesor, y conformado por ladrillo refractario de sílice aluminoso con un espesor total de 0.320 m.
- 20.- El calor que se llevan los gases por la chimenea es de 407,163Kcal/HR; a una temperatura de 1049°C a la salida del recuperador.
- 21.- La cantidad de calor entregada al aire por el gas es de 180,198

Kcal/HR; para poder elevar la temperatura del aire desde la temperatura ambiente aproximadamente 550°C.

22.- La eficiencia térmica del horno es de  $= 24\%$ ; esto indica que el horno diseñado esta dentro de los hornos más eficientes, dentro de los ya existentes.

23.- La estructura metálica que soporta el horno es tal como sigue:

- . Dos canales 8C x 8 x 7; para sostener los Salmer
- . Cuatro tirantes de  $\phi = 1"$
- . Ocho vigas de 8WF40 x 3.20; que soportan a su vez a los dos canales 8C x 8 x 7, con ayuda de los cuatro templadores (partes).
- . Se usa 4 pórticos contruidos con vigas 10WF25; los cuáles soportan toda la carga del horno.
- . Las vigas que soportan la solera del horno son canales 6C x 13 x 8,5; separados a distancia de 0.286 m, una de otra.

24.- Las dimensiones iniciales del cimiento del horno según cálculo fueron de 8.50 m, de largo por 4.45 m de ancho y 0.30 m de alto. Los cuáles por construcción se modificaron en 8.90 de largo por 4.5 m de ancho y por 0.40 m. de alto. La cantidad de fierro a usar de 27 varillas de fe' de 3/8" en dirección Y-Y y 35 varillas fe' de 5/8" en dirección X-X.

25.- Los recuperadores de calor se encuentran ubicadas en las chimeneas del horno, de manera que estas trabajen en forma alternada; según requerimientos.

26.- La cantidad de calor que transmite el gas al aire en el recuperador es de 180,198 Kcal/HR, siendo las temperaturas de gas, a la entrada de 1450°C y la salida de 1049°C; las temperaturas del aire a la entrada aproximadamente 100°C y a la salida del recuperador de

550°C.

- 27.- El volumen de gas que pasa por el recuperador es de 8196 m<sup>3</sup>/HR y el de aire es en masa de 132638 Kg/HR a una presión de dos atmósferas y a una temperatura promedio de aproximadamente 260°C.
- 28.- La chimenea debería tener una altura de 11.28 mts; para que esta tenga el tiro suficiente para vencer todas las pérdidas de presión originadas por las diferentes restricciones (10.14mm H<sub>2</sub>O); de tal manera que el horno se mantenga a la presión atmosférica. Pero sin embargo nosotros sólo hemos colocado una chimenea de 3 metros de altura; ya que las fuerzas de aplastamiento del ladrillo base de la chimenea se harían grandes y esto traería como consecuencia hacer el diseño del horno con paredes bastantes anchas; lo cuál implicaría tener dimensiones muy desproporcionadas con respecto a las dimensiones del horno.
- 29.- El tiro adicional que debe vencer la chimenea de 3 mts, para que el horno permanezca a presión atmosférica y ésta no se ahogue es de: 0.000768 Kg/cm<sup>2</sup>, ó 28 mm. de H<sub>2</sub>O; implicando esto hacer uso de un extractor de gases.
- 30.- El costo de inversión inicial de la fábrica es de \$ 1'274,080; el cuál será financiado en 10 años con una tasa de interés al 15%. Este pago se efectuará a partir del primer año de producción.
- 31.- El capital inicial es de \$406,283; el cuál siguiendo la primera alternativa de recuperación de capital; nos proporciona una tasa interna de retorno de 24.69% y siguiendo una segunda alternativa de recuperación de capital obtenemos una tasa interna de retorno del 27%; lo cuál nos indica que el proyecto es bastante rentable, obteniéndose al final del decimo año un capital de \$ 4'436,608.

## BIBLIOGRAFIA

- R.1 "El Vidrio"
- . Autor: José María Fernández N.
  - . Editorial: Gaez, S.A. (España)
  - . Año: 1985
  - . Edición: Unica
- R.2 "Los Vidrios"
- . Autor: Eduardo A. Mari
  - . Editorial: América Lee (Argentina)
  - . Año: 1982
  - . Edición: Primera
- R.3 "Principios de  
Transferencia de Calor"
- . Autor: Frank Kreith
  - . Editorial: Herrero Hns., sucesores  
S.A. (México)
  - . Año: 1970
  - . Edición: Segunda
- R.4 "Resistencia de  
Materiales"
- . Autor: Tiro Shenco
  - . Editorial:
  - . Año:
  - . Edición:



- R.5 "Ingenieria Metalurgica" . Autor: Reinhardt Schuhmann Jr.  
. Editorial: AID (México)  
. Año: 1968  
. Edición: Primera
- R.6. "Hornos Industriales" . Autor: W. Trinks  
. Editorial: Urmo S.A. (España)  
. Año: 1975  
. Edición: Primera
- R.7 "Transferencia de Calor  
Aplicada a la Ingenieria" ; utor: James R. ecty  
. Editorial: Li usa (Mexico)  
. Año: 1978  
. Edición: Primera
- R.8 "Fundamentos de  
Termodinámica" . Autor: Gordon J. Van Wyleo  
. Editorial: Limusa (Mexico)  
. Año: 1972  
. Edición: Primera
- R.9 "Programación BASIC" . Autor: Byron S. Gottfried  
. Editorial: Mcgraw - Hill  
. Año: 1983  
. Edición: Segunda

- R.10 .Pórticos y Arcos
- . Autor; Valerian Leontovich
  - . Editorial; Continental S.A. (Mexico)
  - . Año; 1983
  - . Edición; Décimo Tercero
- .11 Reglamento de Construcciones de Concreto Reforzado (ACI 318-83).
- . Editorial; Instituto Mexicano del Concreto.
  - . Año; 1985
  - . Edición; Primera
- R.12 Ingeniería Económica
- . Autor; George Taylor
  - . Editorial; Limusa (Mexico)
  - . Año ; 1986
  - . Edición; Décimo
- R.13 Manual del Ingeniero
- . Autor; Hütte
  - . Editorial; Gustavo Gili S.A.
  - . Año; 1950
  - . Edición; Segunda