



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO DE UN HORNO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO DEL RODETE  
DE LA TURBINA FRANCIS (CELEC UNIDAD DE NEGOCIO  
HIDROAGOYÁN)”**

**Verónica Paulina López Pérez**

**Wilson Andrés Ramírez Montesdeoca**

**TESIS DE GRADO**

**PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**Riobamba – Ecuador**

**2011**

**Espoch**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

**CONSEJO DIRECTIVO**

Agosto, 03 de 2011

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**VERÓNICA PAULINA LÓPEZ PÉREZ**

---

Titulada:

**“DISEÑO DE UN HORNO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO DEL RODETE DE LA TURBINA FRANCIS (CELEC UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYÁN)”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Geovanny Novillo A.  
DECÁNO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Ramiro Valenzuela S  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Mario Pástor.  
ASESOR DE TESIS

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** VERÓNICA PAULINA LÓPEZ PÉREZ

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DISEÑO DE UN HORNO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO DEL RODETE DE LA TURBINA FRANCIS (CELEC UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYÁN)”

**Fecha de Examinación:** Agosto 03 de 2011.

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
ING. EDUARDO VÁSQUEZ. (Presidente Trib. Defensa)			
ING. RAMIRO VALENZUELA S. (Director de Tesis)			
ING. MARIO PÁSTOR (Asesor)			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

**Espoch**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

**CONSEJO DIRECTIVO**

Agosto, 03 de 2011

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**WILSON ANDRÉS RAMÍREZ MONTESDEOCA**

---

Titulada:

**“DISEÑO DE UN HORNO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO DEL RODETE DE LA TURBINA FRANCIS (CELEC UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYÁN)”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Geovanny Novillo A.  
DECÁNO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Ramiro Valenzuela S  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Mario Pástor.  
ASESOR DE TESIS

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** WILSON ANDRÉS RAMÍREZ MONTESDEOCA

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DISEÑO DE UN HORNO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO DEL RODETE DE LA TURBINA FRANCIS (CELEC UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYÁN)”

**Fecha de Examinación:** Agosto 03 de 2011.

### RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
ING. EDUARDO VÁSQUEZ. (Presidente Trib. Defensa)			
ING. RAMIRO VALENZUELA S. (Director de Tesis)			
ING. MARIO PÁSTOR (Asesor)			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Verónica Paulina López Pérez.**

---

**Wilson Andrés Ramírez Montesdeoca**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco de manera especial a mis padres Wilson R. Ramírez O. y Rosa Angélica Montesdeoca V. quienes me educaron con amor y cariño, tratando siempre de mostrarme el camino correcto a seguir en la vida; agradezco a mis hermanas por el apoyo moral que me brindan el cual me incentiva para seguir superándome; agradezco también a la Virgencita, María Auxiliadora a quien le he pedido salud y vida para poder cumplir mis objetivos.

**Andrés Ramírez M.**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por haber sido mi guía espiritual en todo momento y porque ha permitido que las metas y anhelos se cumplan en mi vida, a mis padres por haberme dado la vida y la oportunidad de superarme siendo un ejemplo de vida, responsabilidad y lucha diaria; a mis hermanos por su constante apoyo y ejemplo de superación.

Y como olvidar a mis queridos amigos con quienes compartimos momentos de triunfos y derrotas durante nuestra carrera, en especial a aquellos que demostraron lealtad y cariño sinceros.

Agradezco también a mis profesores y a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, que con su aporte nos permiten formarnos como profesionales para la sociedad.

**Verónica López P.**

## **DEDICATORIA**

Dedico la presente tesis a mis padres y hermanas ya que ellos son el motivo por el cual quiero seguirme superando, han sido las personas que siempre me han extendido su mano cuando he caído, se alegran de mis aciertos y ponen sus hombros cuando hay tristezas.

**Andrés Ramírez M.**

## **DEDICATORIA**

Dedico la presente tesis a mis queridos padres y hermanos, quienes depositaron su confianza en mí y que con su apoyo, esfuerzo y sacrificio hicieron posible para que cumpla este gran objetivo en mi vida, así como a todas las personas que siempre me brindaron su afecto y optimismo.

**Verónica López P.**

## TABLA DE CONTENIDOS

<u>CAPÍTULO</u>		<u>PÁGINA</u>
<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Introducción.....	3
1.3	Justificación técnico económica.....	4
1.4	Objetivos.....	5
1.4.1	General.....	5
1.4.2	Específicos.....	6
<b>2</b>	<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>7</b>
2.1	Hidroagoyán (Unidad de negocio de Generación Hidroeléctrica).....	7
2.2	Definición .....	9
2.2.1	Turbinas Hidráulicas .....	9
2.2.2	Clasificación.....	9
2.3	Turbina tipo Francis.....	11
2.3.1	Componentes de la turbina Francis.....	11
2.3.1.1	Tubería forzada .....	14
2.3.1.2	Cámara espiral o voluta.....	14
2.3.1.3	Distribuidor.....	16
2.3.1.4	Tubo de aspiración.....	17
2.3.1.5	Eje de turbina.....	18
2.3.1.6	Equipo de sellado del eje de turbina.....	18
2.3.1.7	Cojinete guía de turbina.....	19
2.3.1.8	Cojinete de empuje.....	19
2.3.1.9	Rodete .....	20
2.4	Funcionamiento de la turbina Francis.....	22
2.4.1	Margen de funcionamiento de las turbinas.....	23
2.5	Formas de deteriorarse el Rodete de la turbina Francis.....	24
2.5.1	Cavitación .....	24
2.5.2	Erosión .....	26
2.5.3	Corrosión.....	28
2.6	Reparación del Rodete de la Turbina Francis.....	29
2.6.1	Generalidades sobre Tratamientos Térmicos.....	29
2.6.2	Procedimiento para la reparación del rodete de la turbina Francis de la central Agoyán.....	32
2.6.3	Simulación del comportamiento de la masa del rodete frente a las temperaturas y tiempos del tratamiento térmico en un software.....	39
2.7	Hornos Industriales.....	41
2.7.1	Partes principales de los hornos.....	42
2.7.2	Hornos de Tratamientos Térmicos.....	47
2.7.3	Hornos eléctricos.....	50

2.7.4	Hornos de Resistencia.....	52
2.8	Selección de la mejor alternativa para el diseño del horno.....	57
2.8.1	Horno eléctrico de forma cuadrada con solera móvil.....	58
2.8.2	Horno eléctrico de forma cuadrada con solera fija.....	61
2.8.3	Horno eléctrico de forma cuadrada con tapa superior y solera fija.....	63
<b>3</b>	<b>DISEÑO TÉRMICO DEL HORNO.....</b>	<b>64</b>
3.1	Parámetros de diseño.....	64
3.2	Dimensiones internas del horno.....	65
3.3	Temperaturas de diseño.....	66
3.4	Materiales para las paredes, solera y techo del horno.....	69
3.4.1	Refractarios.....	69
3.4.1.1	Características de los materiales refractarios.....	71
3.4.1.2	Clasificación .....	71
3.4.1.3	Tipos de material refractario.....	73
3.4.1.4	Mortero refractario.....	75
3.4.1.5	Junta de dilatación.....	75
3.4.2	Fibra cerámica .....	76
3.4.3	Aislamiento térmico.....	78
3.4.4	Selección de los materiales aislantes y refractarios para el horno.....	80
3.5	Cálculo de los espesores para cada uno de los elementos que conforman el horno.....	93
3.5.1	Espesor de las paredes del horno .....	93
3.5.2	Cálculo del espesor de la solera.....	101
3.5.3	Cálculo del espesor del techo del horno.....	108
3.6	Simulación térmica de la pared del horno en un software.....	123
3.7	Calor perdido en el horno.....	125
3.7.1	Calor que se transfiere a través de los elementos que conforman el horno.....	125
3.7.2	Calor necesario para el calentamiento del rodete [16].....	127
3.7.2.1	Cálculo del calor para calentar el rodete.....	131
3.7.3	Cálculo del calor necesario para el calentamiento de la estructura base del rodete .....	132
3.7.4	Cálculo del calor necesario para el calentamiento de la solera del horno.....	133
3.7.5	Cálculo del calor necesario para el calentamiento de las paredes y techo del horno .....	135
3.8	Cálculo del rendimiento del Horno ( $\eta$ ).....	139
3.9	Cálculo de la potencia del Horno.....	139
<b>4</b>	<b>DISEÑO MECÁNICO DEL HORNO.....</b>	<b>148</b>
4.1	Generalidades.....	148
4.2	Techo del horno.....	150
4.2.1	Cálculo de la deformación de la viga principal del techo del horno.....	151
4.2.2	Simulación de la estructura del techo en un software.....	160
4.2.3	Simulación de deformación en la chapa metálica del techo en un software.....	170

4.3	Paredes del horno.....	172
4.3.1	Simulación de la estructura del horno en un software.....	176
4.3.2	Simulación de deformación en la chapa de la pared del horno en un software.....	179
4.4	Simulación de la base donde descansará el rodete.....	182
<b>5</b>	<b>CONTROL AUTOMÁTICO DEL HORNO.....</b>	<b>186</b>
5.1	Conexión y Disposición le las Resistencias Eléctricas.....	186
5.1.1	Selección de las Resistencias.....	190
5.2	Sistemas automáticos de control.....	197
5.2.1	Representación de los sistemas de control.....	198
5.2.2	El control de acción PID.....	200
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTO DEL HORNO.....</b>	<b>210</b>
6.1	Introducción .....	210
6.2	Análisis de costos del Horno.....	210
6.2.1	Costos directos .....	210
6.2.1.1	Materiales directos.....	211
6.2.1.2	Costos por mano de obra.....	213
6.2.1.3	Costos por equipos utilizados.....	213
6.2.2	Costos indirectos .....	214
6.2.2.1	Costos de materiales y accesorios indirectos.....	214
6.2.2.2	Costos por alquiler de maquinaria y equipos utilizados.....	215
6.2.2.3	Costos por transporte.....	215
6.2.2.4	Costos de diseño .....	216
6.2.3	Costos totales.....	216
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>217</b>
7.1	Conclusiones.....	217
7.2	Recomendaciones.....	217

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

### **BIBLIOGRAFÍA**

### **LINKOGRAFÍA**

### **ANEXOS**

### **PLANOS**

## TABLA DE CONTENIDO

<u>CAPÍTULO</u>	<u>PÁGINA</u>
<b>1 INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Introducción .....	3
1.3 Justificación técnico económica.....	4
1.4 Objetivos:.....	5
1.4.1 General	5
1.4.2 Específicos .....	6
<b>2 GENERALIDADES</b> .....	<b>7</b>
2.1 Hidroagoyán (Unidad de negocio de Generación Hidroeléctrica) .....	7
2.2 Definición.....	9
2.2.1 Turbinas Hidráulicas .....	9
2.2.2 Clasificación.....	9
2.3 Turbina tipo Francis .....	11
2.3.1 Componentes de la turbina Francis .....	11
2.3.1.1 Tubería forzada. ....	14
2.3.1.2 Cámara espiral o voluta. ....	14
2.3.1.3 Distribuidor.....	16
2.3.1.4 Tubo de aspiración. ....	17
2.3.1.5 Eje de turbina.....	18
2.3.1.6 Equipo de sellado del eje de turbina.....	18
2.3.1.7 Cojinete guía de turbina.....	19
2.3.1.8 Cojinete de empuje.....	19
2.3.1.9 Rodete. ....	20
2.4 Funcionamiento de la turbina Francis.....	22
2.4.1 Margen de funcionamiento de las turbinas. ....	23
2.5 Formas de deteriorarse el Rodete de la turbina Francis.....	24
2.5.1 Cavitación.....	24
2.5.2 Erosión	26
2.5.3 Corrosión .....	28
2.6 Reparación del Rodete de la Turbina Francis.....	29
2.6.1 Generalidades sobre Tratamientos Térmicos .....	29

2.6.2	Procedimiento para la reparación del rodete de la turbina Francis de la central Agoyán. ....	32
2.6.3	Simulación del comportamiento de la masa del rodete frente a las temperaturas y tiempos del tratamiento térmico en un software. ....	39
2.7	Hornos Industriales.....	41
2.7.1	Partes principales de los hornos.....	42
2.7.2	Hornos de Tratamientos Térmicos.....	47
2.7.3	Hornos eléctricos.....	50
2.7.4	Hornos de Resistencia.....	52
2.8	Selección de la mejor alternativa para el diseño del horno.....	57
2.8.1	Horno eléctrico de forma cuadrada con solera móvil.....	58
2.8.2	Horno eléctrico de forma cuadrada con solera fija.....	61
2.8.3	Horno eléctrico de forma cuadrada con tapa superior y solera fija. ....	63
<b>3</b>	<b>DISEÑO TÉRMICO DEL HORNO. ....</b>	<b>64</b>
3.1	Parámetros de diseño.....	64
3.2	Dimensiones internas del horno. ....	65
3.3	Temperaturas de diseño.....	66
3.4	Materiales para las paredes, solera y techo del horno. ....	69
3.4.1	Refractarios.....	69
3.4.1.1	Características de los materiales refractarios.....	71
3.4.1.2	Clasificación.....	71
3.4.1.3	Tipos de material refractario.....	73
3.4.1.4	Mortero refractario. ....	75
3.4.1.5	Junta de dilatación.....	75
3.4.2	Fibra cerámica.....	76
3.4.3	Aislamiento térmico. ....	78
3.4.4	Selección de los materiales aislantes y refractarios para el horno. ....	80
3.5	Cálculo de los espesores para cada uno de los elementos que conforman el horno. ....	93
3.5.1	Espesor de las paredes del horno. ....	93
3.5.2	Cálculo del espesor de la solera.....	101
3.5.3	Cálculo del espesor del techo del horno.....	108
3.6	Simulación térmica de la pared del horno en un software. ....	123
3.7	Calor perdido en el horno. ....	125
3.7.1	Calor que se transfiere a través de los elementos que conforman el horno. ....	125
3.7.2	Calor necesario para el calentamiento del rodete [16].....	127
3.7.2.1	Cálculo del calor para calentar el rodete.....	131

3.7.3	Cálculo del calor necesario para el calentamiento de la estructura base del rodete.	132
3.7.4	Cálculo del calor necesario para el calentamiento de la solera del horno.	133
3.7.5	Cálculo del calor necesario para el calentamiento de las paredes y techo del horno.	135
3.8	Cálculo del rendimiento del Horno ( $\eta$ ).	139
3.9	Cálculo de la potencia del Horno.	139
<b>4</b>	<b>DISEÑO MECÁNICO DEL HORNO.</b>	<b>148</b>
4.1	Generalidades.	148
4.2	Techo del horno.	150
4.2.1	Cálculo de la deformación de la viga principal del techo del horno.	151
4.2.2	Simulación de la estructura del techo en un software.	160
4.2.2.1	Simulación de deformación en la chapa metálica del techo en un software.	170
4.3	Paredes del horno.	172
4.3.1	Simulación de la estructura del horno en un software.	176
4.3.2	Simulación de deformación en la chapa de la pared del horno en un software.	179
4.4	Simulación de la base donde descansará el rodete.	182
<b>5</b>	<b>CONTROL AUTOMÁTICO DEL HORNO.</b>	<b>186</b>
5.1	Conexión y Disposición de las Resistencias Eléctricas	186
5.1.1	Selección de las Resistencias	190
5.2	Sistemas automáticos de control.	197
5.2.1	Representación de los sistemas de control.	198
5.2.2	El control de acción PID.	200
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTO DEL HORNO.</b>	<b>210</b>
6.1	Introducción.	210
6.2	Análisis de costos del Horno.	210
6.2.1	Costos directos	210
6.2.1.1	Materiales directos.	211
6.2.1.2	Costos por mano de obra.	213
6.2.1.3	Costos por equipos utilizados.	213
6.2.2	Costos indirectos.	214
6.2.2.1	Costos de materiales y accesorios indirectos.	214

6.2.2.2	Costos por alquiler de maquinaria y equipos utilizados .....	215
6.2.2.3	Costos por transporte. ....	215
6.2.2.4	Costos de diseño. ....	216
6.2.3	Costos totales. ....	216
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>217</b>
7.1	Conclusiones. ....	217
7.2	Recomendaciones. ....	217
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>218</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>228</b>

## LISTA DE TABLAS

<b><u>TABLA</u></b>	<b><u>PÁGINA</u></b>
1. Características de la turbina instalada en la Central Agoyán. ....	12
2. Composición química. ....	33
3. Propiedades mecánicas. ....	34
4. Propiedades físicas. ....	34
5. Designaciones del material.....	34
6. Composición típica de todas las soldaduras de metal.....	35
7. Tratamientos térmicos. ....	36
8. Condiciones que deben soportar los materiales refractarios. ....	70
9. Medidas disponibles de la manta de fibra cerámica. ....	82
10. Límites de temperatura del perno kao-lok sujeridos por la API. ....	83
11. Parámetros de soldeo recomendados.....	85
12. Medidas disponibles de la lana AW.....	89
13. Conductividad térmica del ladrillo refractario UA 20. ....	91
14. Resumen de resultados.....	114
15. Costos de los materiales del horno.....	211
16. Costos por mano de obra. ....	213
17. Costos de equipos utilizados .....	213
18. Total costos directos.....	214
19. Costos de materiales y accesorios indirectos.....	214
20. Costos por alquiler de maquinaria y equipos utilizados.....	215
21. Costos por transporte. ....	215
22. Costos de diseño.....	216
23. Costos indirectos totales.....	216
24. Costos totales.....	216

## LISTA DE FIGURAS

<b><u>FIGURA</u></b>	<b><u>PÁGINA</u></b>
1. Casa de Máquinas de la Central Agoyán.....	7
2. Represa de la Central Agoyán.....	8
3. Elementos principales de la turbina Francis de eje vertical. ....	13
4. Esquema general de la cámara espiral de una turbina Francis. (Vista superior) .....	15
5. Álabes móviles de la turbina Francis de la Central Agoyán.....	17
6. Eje de la unidad 1 de la turbina Francis de la Central Agoyán. ....	18
7. Rodete de la turbina Francis de la Central Agoyán. ....	21
8. Ubicación de los principales componentes de la turbina Francis. ....	22
9. Selección de turbinas hidráulicas. ....	23
10. Diagrama presión – temperatura.....	25
11. Rodete erosionado de la turbina Francis de la central Agoyán. ....	28
12. Partes del Rodete corroído de la turbina Francis de la central Agoyán. ....	29
13. Esquema de las curvas para cada tipo de tratamiento térmico. ....	30
14. Esquema para el rango de contenido de Cr y Ni en aceros inoxidables, resistentes a la corrosión y a altas temperaturas. ....	33
15. Rodete a los 15 minutos de tratamiento térmico. ....	39
16. Gráfica Temperatura vs Tiempo del proceso de tratamiento térmico en el rodete. ....	40
17. Rodete a las 22,44 horas de tratamiento térmico. ....	41
18. Hornos de solera móvil y fija.....	43
19. Bóveda de Arco. ....	44
20. Bóveda suspendida. ....	45
21. Tipos de puertas para el horno.....	46
22. Horno del tipo “Dentro-Fuera”.....	49
23. Horno continuo con descarga por un extremo. ....	50

24.	1) Horno radiante de resistencia no metálica, 2) horno de crisol con resistencia metálica, 3) horno de cámara con resistencia metálica. ....	52
26.	Horno de resistencia con calentamiento indirecto. ....	53
27.	Resistencias en el interior de un horno. ....	55
28.	Horno eléctrico de forma cuadrada con solera móvil. ....	58
29.	Hornos industriales para tratamientos térmicos con solera móvil. ....	60
30.	Horno eléctrico con solera móvil. ....	61
31.	Horno eléctrico de forma cuadrada con solera fija. ....	61
32.	Tipos de hornos con estructura móvil y vagoneta fija en el suelo. ....	62
33.	Horno de forma cuadrada de tapa superior. ....	63
34.	Dimensiones del rodete. ....	65
35.	Medidas internas del Horno. ....	66
36.	Representación de los componentes de las paredes del horno. ....	68
37.	Aplicaciones de los refractarios. ....	69
38.	Junta de dilatación. ....	76
39.	Forma de instalar la fibra cerámica. ....	77
40.	Sistema de anclaje. ....	83
41.	Construcción con Junta a Tope. ....	86
42.	Arreglo vertical de tornillos. ....	87
43.	Representación del área de la pared. ....	96
44.	Circuito térmico equivalente de la pared posterior del horno. ....	97
45.	Superficie de la pared de fibra cerámica. ....	98
46.	Flujo calorífico en la solera y en la cimentación. ....	102
47.	Superficie de la solera. ....	104
48.	Extrapolación para obtener la conductividad térmica. ....	105
49.	Medidas del ladrillo refractario. ....	107
50.	Representación del área del techo del horno. ....	109
51.	Componentes del techo del horno. ....	110
52.	Superficie de fibra cerámica. ....	111
53.	Circuito térmico de las paredes y techo del horno. ....	118

54 .	Representación del material de la solera. ....	121
55.	Circuito térmico de la solera. ....	122
56.	Resultados del análisis térmico de la pared del horno. ....	124
57.	Curva de calentamiento de la pared interna y externa respectivamente. .....	125
58.	Efecto del porcentaje de carbono sobre el contenido de calor del hierro y el acero.....	127
59.	Conductividad térmica de los metales. ....	129
60.	Relación de las conductividades térmicas a una temperatura cualquiera y a la temperatura de congelación del agua (0 °C).....	129
61.	Conductividad térmica de las aleaciones férricas.....	130
62.	Contenido calorífico de los materiales refractarios. ....	133
63.	Representación de la cantidad de calor necesario para el horno. ....	138
64.	Diagrama de transformación de enfriamiento continuo para el acero CA6NM.....	141
65.	Representación de la estructura del techo del horno. ....	150
66.	Representación de las fuerzas sobre la viga principal. ....	151
67.	Representación de las fuerzas para el método de la doble integración. .	154
68.	Análisis de la viga para hacer el diagrama de Fuerza Cortantes y de Momentos Flectores. ....	156
69.	Diagrama de Fuerza Cortante. ....	157
70.	Diagrama de Momento flector. ....	158
71.	Perfil de la viga, denominación IPE. ....	158
72.	Perfiles de Estructura del Techo.....	161
73.	Resultados en el software para el techo del horno (primer caso).....	163
74 .	Deformación máxima en el punto medio de estructura del techo del horno (primer caso). ....	164
75.	Razón de esfuerzo en los perfiles estructurales del techo del horno (primer caso). ....	165
76.	Deformación en perfil Omega.....	167

77 .	Resultados del análisis en el software (segundo caso). .....	168
78.	Deformación máxima en el punto medio de la estructura (segundo caso).....	169
79.	Razón de esfuerzo en los perfiles estructurales (segundo caso). .....	169
80.	Peso de 80Kg en chapa de acero. ....	170
81.	Tensiones de Von Mises de la chapa de acero. ....	171
82.	Desplazamiento de la chapa de acero. ....	172
83.	Estructura del horno. ....	176
84.	Carga aplicada a la estructura.....	177
85.	Resultado del análisis de la estructura del horno. ....	178
86.	Razón de esfuerzo en los perfiles de la estructura del horno. ....	179
87.	Diagrama de fuerzas. ....	180
88.	Cargas en la chapa de la pared del horno.....	181
89.	Desplazamiento de la pared del horno. ....	182
90.	Base de descanso del rodete. ....	182
91.	Resultados de Temperaturas en la base donde descansará el rodete. .....	183
92.	Resultados de la deformación de la base del rodete.....	185
93.	Disposición de las resistencias en el horno.....	187
94.	Representación del circuito trifásico para las resistencias. ....	187
95.	Alambre en espiral sobre tubos.....	191
96.	Diagrama de bloque. ....	199
97.	Elementos de automatización.....	204
98.	Circuito de control.....	205
99.	Pantalla de visualización de datos.....	208
100.	Circuito de potencia.....	209

## LISTA DE ABREVIACIONES

AWS	American Welding Society
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CELEC	Corporación Eléctrica del Ecuador
Pv	Presión de vapor
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización).
SMAW	Shield Metal Arc Welding
API	American Petroleum Institute
AISC	American Institute of Steel Constructions
DAQ	Data Acquisition
PID	Proporcional Integral Derivativo
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
EPA	Agencia de Protección Ambiental

## LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A:** Especificaciones técnicas de la fibra cerámica.
- ANEXO B:** Manual de montaje de la fibra cerámica.
- ANEXO C:** Especificaciones técnicas de la lana AW.
- ANEXO D:** Especificaciones técnicas de las planchas de acero.
- ANEXO E:** Especificaciones técnicas de ladrillos refractarios aislantes UA 20.
- ANEXO F:** Formas de los ladrillos refractarios.
- ANEXO G:** Especificaciones técnicas del mortero refractario Aerofrax.
- ANEXO H:** Valores representativos del coeficiente convectivo de transferencia de calor.
- ANEXO I:** Propiedades de aceros estructurales.
- ANEXO J:** Especificaciones técnicas de los perfiles laminados IPE.
- ANEXO K:** Especificaciones técnicas de los perfiles estructurales Omega.
- ANEXO L:** Propiedades mecánicas del acero estructural a temperaturas altas.
- ANEXO M:** Características principales de aleaciones de base Ni-Cr.
- ANEXO N:** Carga específica máxima de las resistencias.
- ANEXO O:** Corriente / Tabla de temperatura - Ni Cr A (80) y Ni Cr C (60).
- ANEXO P:** Características de la tarjeta de adquisición de datos DAQ.
- ANEXO Q:** Controlador digital de ángulo trifásico.
- ANEXO R:** Termocuplas CAMSCO.
- ANEXO S:** Proforma de resistencias Ohmio.
- ANEXO T:** Proforma de productos de acero DIPAC.
- ANEXO U:** Proforma de pernos.
- ANEXO V:** Proforma de materiales refractarios.

## SUMARIO

Se ha realizado el Diseño de un Horno para Tratamiento Térmico del rodete de la turbina Francis para la empresa CELEC Unidad de negocio Hidroagoyán.

El objetivo de la empresa es implementar un taller donde se puedan reparar los rodetes que están sometidos a continuo desgaste debido principalmente a los fenómenos de erosión y cavitación, evitando la realización de estos trabajos fuera del país, optimizando tiempo y costos que conlleva este proceso. En la reparación se aporta material de soldadura siendo necesario el tratamiento térmico para aliviar tensiones internas.

Mediante un software se ha simulado el comportamiento del rodete frente a las temperaturas y tiempos del tratamiento.

La alternativa más adecuada es un horno eléctrico intermitente, que para su calentamiento utiliza resistencias eléctricas colocadas en la solera del mismo, controladas automáticamente por medio de un sistema PID (Proporcional, Integral, Derivativo). La cámara del horno tiene un recubrimiento de material aislante, que permite un considerable ahorro energético en este proceso y garantiza una temperatura exterior segura para los operadores del taller, mientras que la solera tiene ladrillo refractario; su estructura está hecha de perfiles metálicos que en su mayoría están unidos mediante pernos y para el revestimiento exterior se utiliza chapa metálica.

Con este diseño se estableció una potencia necesaria de 270 kw y un rendimiento de 91,51% para el horno. Finalmente se determina el costo de construcción del mismo.

## SUMMARY

It has done the Design of a Heat Treatment Furnace for the Francis turbine runner for the company CELEC Hidroagoyán business unit.

The company's goal is to implement a workshop that can repair rims that are subject to continuous wear due mainly to erosion and cavitation, preventing the completing of these works abroad, optimizing time and costs involved in this process. In the repair is provided welding material required to be heat treatment being necessary to relieve internal stresses.

Using software we have simulated the behavior of the impeller against the temperature and time of the treatment.

The best alternative is an electric oven intermittently that for heating uses electric heaters placed on the still of the same, automatically controlled through a PID (Proportional, Integral, Derivative). The Furnace chamber has a coating of insulating material, which allows considerable energy savings in this process and ensures a safe outdoor temperature for operators in the workshop, while the sill is firebrick, its structure is made of metal profiles that are mostly connected by bolts and for the cladding sheet metal is used.

This design established a 270 kw power requirement and a yield of 91,51% for the oven. Finally, determine the cost of construction.

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1 Antecedentes.

La Central Agoyán, cuenta con dos turbinas hidráulicas tipo Francis, que generan 78 MW cada unidad. Las mismas que disponen de rodets que por desgaste son susceptibles de reparación; para lo cual se utiliza alta tecnología y equipamiento especial, debido a la magnitud de la pieza, la precisión en el acabado y el control de esfuerzos internos [1].

Los rodets de las turbinas hidráulicas empleadas en la generación eléctrica, están sometidos a un continuo desgaste producido por el permanente contacto con el agua que impulsa su rotación, produciéndose dos fenómenos, la erosión y cavitación, que son el principal problema para el desgaste del rodete.

Antes de soldar el rodete para repararlo, necesita un tratamiento de alivio de tensiones para eliminar la fatiga en el material, [2] luego de ello se realiza el aporte de soldadura utilizando el procedimiento apropiado con el electrodo AWS A5.4-92 E410 NiMo-25 [3], que son compatibles con el material base, siendo éste un acero inoxidable martensítico 1.4313 G-X5CrNi13.4 en las normas DIN equivalente al acero ASTM A743, grado CA-6NM, cuyas especificaciones relacionadas corresponden al acero ASTM A352. Por lo tanto la temperatura pre-soldadura

deberá ser de  $(100 - 160)^{\circ}\text{C}$  y el tratamiento térmico de alivio de tensiones post-soldadura por el electrodo que se utiliza debe hacerse a una temperatura de  $(580 - 620)^{\circ}\text{C}$ . Para lo cual se requiere de un horno con las dimensiones de la pieza a tratarse y con un diseño de control de temperatura preciso.

Se ha verificado que el reparar fuera del país implica una inversión de 20,6 % en relación a una pieza nueva, cuyo costo es de 3 844 196 dólares, el reparar en sitio se aspira sea un 12 %, lo que justificaría plenamente la inversión, ya que Hydroagoyán tiene proyectado la implementación de un taller industrial con máquinas herramientas para piezas que sobrepase las 20 toneladas y diámetros de hasta 4 m, incluido el horno, además el servicio que se daría a las otras empresas y el desarrollo tecnológico que todo este proceso significa para los profesionales y técnicos nacionales [4].

En la Facultad se han realizado estudios previos sobre diseño de hornos para Panificación, Rediseño del sistema de calentamiento de un Horno para Tratamientos Térmicos, Diseño de hornos a Tambor rotatorio y en forma general estudios de los sistemas que componen a un Horno, su eficiencia y rendimiento. Sin embargo, no se ha abordado el problema de diseño de hornos industriales de gran tamaño, en vista de ello nuestra propuesta de estudio permitirá mejorar el conocimiento actual del diseño de este tipo de equipo [5].

## 1.2 Introducción

En el presente trabajo se realiza el Diseño de un Horno para Tratamiento Térmico del rodete de la turbina Francis (CELEC Unidad de negocio Hidroagoyán).

Los rodetes de las turbinas Francis con los que cuenta la empresa, requieren de reparación ya que el principal problema en el rodete es el desgaste que se produce por la erosión y cavitación. El primer fenómeno se produce cuando los sedimentos que arrastra el caudal impactan sobre la superficie de la turbina, mientras que el segundo se debe a un descenso local de la presión.

La reparación del rodete se realiza a través de un relleno en las zonas afectadas con una soldadura adecuada, sin embargo esto produce una acumulación de tensiones internas que pueden ocasionar daños aún mayores en este elemento.

Mediante los tratamientos térmicos se pueden modificar las propiedades físicas de los metales, para tal efecto existen distintos tipos de hornos para tratamientos térmicos que actualmente se utilizan en la industria, se presta especial atención a los hornos eléctricos que utilizan resistencias eléctricas para su calentamiento.

En el diseño térmico del horno se aplican conocimientos de la Transferencia de Calor, permitiendo seleccionar los materiales refractarios más adecuados y necesarios para el revestimiento del horno, que soporten las temperaturas a las que debe alcanzar durante el tratamiento térmico en los tiempos especificados, tanto para paredes, techo y solera del horno.

En cuanto a su estructura está diseñada a base de perfiles metálicos que en su mayoría están unidos mediante pernos, y para el revestimiento exterior se utiliza chapa metálica.

Para el control del calentamiento de las resistencias se utilizará un PID (Proporcional, Integral, Derivativo), el cual estará programado en un software.

Se realizará además un análisis de costos para visualizar la factibilidad económica que implicaría la construcción del horno para el taller que implementará la empresa.

A su vez, se darán una serie de indicaciones, con su cita bibliográfica, para la ampliación de cualquiera de los apartados que incluye el presente diseño.

### **1.3 Justificación técnico económica**

La iniciativa de diseñar un Horno para Tratamientos Térmicos surge de la necesidad que presentan las centrales hidroeléctricas en el país, de tener a su disposición equipos que cubran sus necesidades a menor costo.

CELEC Unidad de negocio Hydroagoyán es una empresa cuyos servicios cubren un porcentaje de la demanda de energía a nivel nacional, por tal motivo es de interés de la empresa realizar un estudio en el que se diseñe un horno para tratamientos térmicos del rodete de la turbina Francis, el mismo que forme parte de

su planta, de ésta forma se repararía localmente éstas piezas de tamaño considerable que en algún momento fallarán.

En el país no existe un Horno con las características requeridas para este tipo de trabajo. Al momento la empresa cuenta con un horno para tratamientos térmicos con dimensiones adecuadas para álabes móviles de la turbina, que son muy diferentes para el rodete, es por eso la necesidad de diseñar un horno para el rodete cuya función es mejorar las propiedades físicas del mismo y lo que es mejor asegure un bajo costo en el mantenimiento y reparación del rodete prolongando la vida útil del mismo, lo que implica el aprovechamiento de los recursos de la empresa y el ahorro significativo para la misma, puesto que se evita la importación de equipos costosos y optimiza tiempos de reparación, a la vez apoya a la investigación en el país dentro del campo de la energía a través de un diseño adecuado y eficiente.

#### **1.4 Objetivos:**

##### **1.4.1 General**

Diseñar un horno para tratamiento térmico del rodete de la turbina Francis (CELEC Unidad de Negocio Hidroagoyán).

### 1.4.2 Específicos

- Investigar la teoría existente sobre hornos eléctricos para tratamientos térmicos que ayude a la comprensión de su funcionamiento.
- Determinar la mejor alternativa de diseño del horno.
- Desarrollar el diseño del horno para tratamiento térmico seleccionado.
- Seleccionar las resistencias eléctricas y el Sistema de Control Automático.
- Determinar el costo de la construcción del horno.

## CAPÍTULO II

### 2 GENERALIDADES

#### 2.1 Hidroagoyán (Unidad de negocio de Generación Hidroeléctrica)

La Unidad de Negocio Hidroagoyán domiciliada en el cantón Baños de Agua Santa, provincia de Tungurahua, forma parte de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC E.P., empresa estratégica del Estado, creada para la producción eficiente de energía eléctrica, en beneficio de todo el país.



**Figura 1. Casa de Máquinas de la Central Agoyán.**

La Central Agoyán fue concebida para aprovechar el caudal del Río Pastaza, localizada en la provincia de Tungurahua a 180 Km. al Sureste de Quito y a 5 Km. al

este de la ciudad de Baños en el sector denominado Agoyán de la parroquia Ulba, en la vía principal de entrada al sector amazónico ecuatoriano.

Su misión es “Contribuir al Desarrollo Integral del País, generando y suministrando energía eléctrica, mediante el aprovechamiento óptimo y responsable de los recursos naturales.”

La central Agoyán aporta con 156 MW al sistema nacional, con 78 MW en cada unidad.

En la actualidad, **Hidroagoyán** es una de las siete Unidades de Negocio de CELEC E.P., se encarga de la administración de la producción de las centrales Agoyán y Pucará, y mantiene un contrato con la Empresa Pública Estratégica Hidropastaza E.P. para la operación y mantenimiento de la central San Francisco, también ubicada en el cantón Baños de la Provincia de Tungurahua [6].



**Figura 2. Represa de la Central Agoyán.**

## 2.2 Definición.

### 2.2.1 Turbinas Hidráulicas

Una turbina hidráulica es una turbomáquina motora hidráulica, que aprovecha la energía de un fluido que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación, que transferido mediante un eje, mueve directamente una máquina o bien un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica, así son el órgano fundamental de una Central hidroeléctrica.

### 2.2.2 Clasificación

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar de acuerdo al cambio de presión en el rodete o al grado de reacción, de este modo tenemos:

- **Turbinas de acción:** Son aquellas en las que el fluido de trabajo no sufre un cambio de presión importante en su paso a través de rodete.
- **Turbinas de reacción:** Son aquellas en las que el fluido de trabajo si sufre un cambio de presión importante en su paso a través de rodete. Para clasificar a una turbina dentro de esta categoría se requiere calcular el grado de reacción de la misma.

Las turbinas de acción aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua, mientras que las de reacción aprovechan además la pérdida de presión que se produce en su interior.

Otra manera de clasificar a las turbinas hidráulicas es de acuerdo al tipo de rodete puesto que es la más determinista, ya que entre las distintas de cada género las diferencias sólo pueden ser de tamaño, ángulo de los álabes o cangilones, o de otras partes de la turbomáquina distinta al rodete. Los tipos más importantes son:

- **Turbina Kaplan:** son turbinas axiales, que tienen la particularidad de poder variar el ángulo de sus palas durante su funcionamiento. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua pequeños y con grandes caudales.(Turbina de reacción)
- **Turbina Hélice:** son exactamente iguales a las turbinas kaplan, pero a diferencia de estas, no son capaces de variar el ángulo de sus palas.
- **Turbina Pelton:** Son turbinas de flujo transversal, y de admisión parcial. Directamente de la evolución de los antiguos molinos de agua, y en vez de contar con álabes o palas se dice que tiene cucharas. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua muy grandes, pero con caudales pequeños.(Turbina de acción)
- **Turbina Francis:** Son turbinas de flujo mixto y de reacción. Existen algunos diseños complejos que son capaces de variar el ángulo de sus álabes durante su funcionamiento. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua medios y caudal medios.

Ya que la presente tesis trata exclusivamente sobre el diseño de un horno para el tratamiento térmico del rodete de la turbina Francis, a continuación explicaremos más detalladamente el funcionamiento de la misma y sus componentes principales, así como también las causas y formas de desgaste del rodete.

### **2.3 Turbina tipo Francis**

Fue desarrollada por James B. Francis. Se trata de una turbomáquina motora a reacción y de flujo mixto.

Las turbinas Francis son turbinas hidráulicas que se pueden diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos de desnivel que van de los diez metros hasta varios cientos de metros. Esto, junto con su alta eficiencia, ha hecho que este tipo de turbina sea el más ampliamente usado en el mundo, principalmente para la producción de energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas.

#### **2.3.1 Componentes de la turbina Francis**

Las turbinas utilizadas en la Central Hidroeléctrica Agoyán son tipo Francis de eje vertical, conocidas también como turbinas de sobrepresión por ser variable la presión en la zona del rodete, o de admisión total ya que éste se encuentra sometido a la influencia directa del agua en toda su periferia, están conectadas a un generador vertical suministrado por Mitsubishi Electrical Corp.

Las características básicas de las Turbinas instaladas en la Central Hidroeléctrica Agoyán se muestran en la tabla 1.

**TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA INSTALADA EN LA CENTRAL AGOYÁN.**

Tipo de Turbina	Francis
Cantidad de Turbinas	2
Diámetro del rotor de la Turbina	3500 mm
Diámetro del rodete en la salida	2800 mm
Número de Alabes del Rodete	17 álabes
Número de Alabes Directrices	20 álabes directrices
Rotación de la Turbina	225 rpm
Rotación de disparo	348.75 rpm
Potencia nominal	78 MW
Caída neta nominal	149 m
Eficiencia máxima	96 %
Sentido del Giro	Horario (Visto de arriba)
Eje	Vertical
Número de cojinetes de la turbina	10
Tipo de cojinete	SEGMENTOS TIPO PATIN
Diámetro de la Válvula Mariposa	2.7 m
Tipo de accionamiento	Accionamiento por los servomotores y cierre por contrapeso
Densidad del agua	0,99985 g/cm <sup>3</sup>
Aceleración de la gravedad	9,777m/s <sup>2</sup>
Temperatura del agua	16°C

Los componentes principales de la Turbina Francis, en forma general son los que se muestran en la figura 1 y se enumeran a continuación:

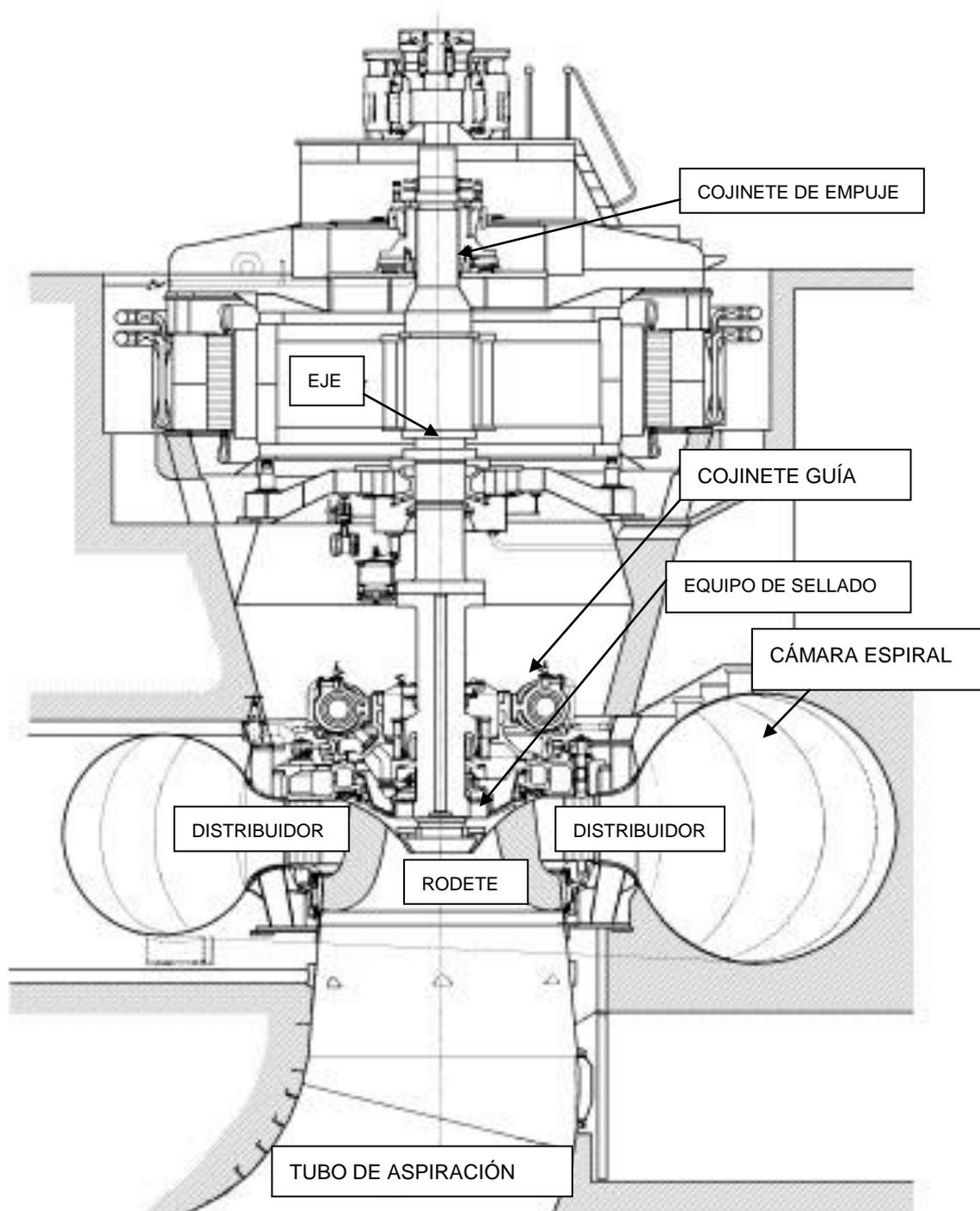
- 1.- Tubería Forzada
- 2.- Cámara espiral.
- 3.- Distribuidor.
- 4.- Rodete.
- 5.- Tubo de aspiración

6.- Eje.

7.- Equipo de sellado del eje de turbina.

8.- Cojinete guía de turbina.

9.- Cojinete de empuje.



**Figura 3. Elementos principales de la turbina Francis de eje vertical.**

### **2.3.1.1 Tubería forzada.**

Conducto de entrada del agua a la máquina a alta presión.

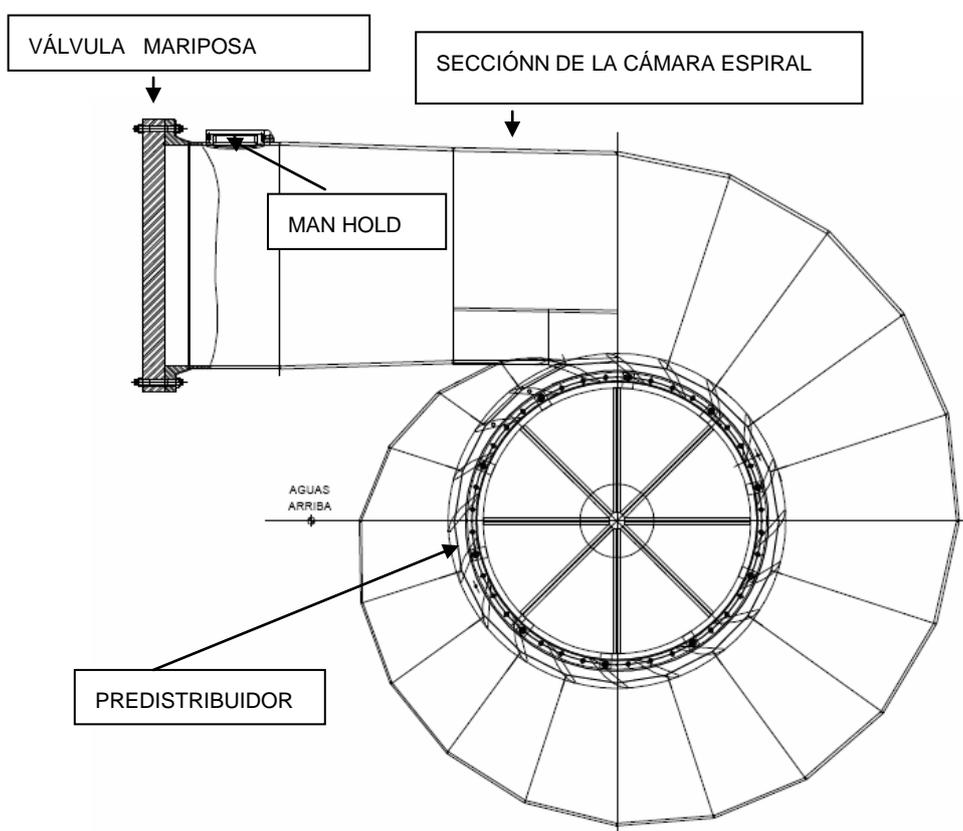
### **2.3.1.2 Cámara espiral o voluta.**

Está constituida por la unión sucesiva de una serie de virolas tronco-cónicas, cuyos ejes respectivos forman una espiral. Desde el acoplamiento con la tubería forzada, donde el diámetro interior de la virola correspondiente alcanza su valor máximo, la sección interior circular en la mayoría de los casos, va decreciendo paulatinamente hasta la virola que realiza el cierre de la cámara sobre sí misma, cuyo diámetro interior se reduce considerablemente. Esta disposición se conoce como el caracol de la turbina, en el que, debido a su diseño, se consigue que el agua circule con velocidad aparentemente constante y sin formar torbellinos, evitándose pérdidas de carga.

En la zona periférica interna, totalmente concéntrica con el eje de la turbina, y siguiendo planos paralelos, perpendiculares a dicho eje, se encuentra una abertura circular, formando un anillo, cuyos extremos están enlazados perpendicularmente por una sucesión de álabes fijos, situadas equidistantemente unas de otras, a lo largo del contorno de la circunferencia descrita por dicho anillo, a través del cual, y por toda su periferia, fluirá el agua, cubriendo la totalidad de los orificios así formados. La zona mencionada, se suele denominar pre distribuidor.

El pre distribuidor es parte integrante de la cámara espiral, está formado por anillos superior e inferior rígidamente ínter ligados por medio de álabes fijos que tienen la forma y arreglo adecuados para orientar el flujo de agua para los álabes directrices e introducir un mínimo de pérdida de carga.

En la siguiente figura se puede ver la cámara espiral y sus componentes principales:



**Figura 4. Esquema general de la cámara espiral de una turbina Francis. (Vista superior)**

### 2.3.1.3 Distribuidor.

El distribuidor propiamente dicho, está formado por un determinado número de paletas móviles. Su función es la de distribuir y regular o cortar totalmente el caudal de agua que fluye hacia el rodete desde la cámara espiral.

Para las turbinas axiales existen tres tipos de distribuidores: el cilíndrico, el cónico y el axial; de éstos el último es el que presenta más facilidades para su diseño y construcción en vista de sus dimensiones y de su peso más pequeño que en otros casos.

Los álabes directrices sirven para regular el caudal de agua que entra en el rodete.

El conjunto de directrices del distribuidor se acciona por medio de un anillo móvil al que están unidas todas las paletas móviles, las mismas que al estar cerradas totalmente no permiten el ingreso del agua y a medida que giran un cierto ángulo sobre sus ejes se abren y pueden llegar a la posición de máxima apertura.

La turbina de la hidroeléctrica consta de 20 álabes móviles para cada unidad, cuyo diámetro circunferencial es 3920 mm y una altura de 560 mm, se encuentran separados entre ellos con una holgura de 0,24 – 0,53 mm.



**Figura 5. Álabes móviles de la turbina Francis de la Central Agoyán.**

Los álabes son girados por medio del mecanismo de regulación con anillo de regulación actuado por dos servomotores trabajando en direcciones paralelas y opuestas.

#### **2.3.1.4 Tubo de aspiración.**

Es la tubería de salida del agua a baja presión ya que debido a su forma tronco-cónica crea una depresión.

Este tiene dos funciones, una es facilitar que la turbina sea instalada debajo del nivel de descarga de modo que no se pierda altura produciéndose un vacío en la parte superior del tubo de aspiración, el cual es compensado por la altura a la cual el rodete de la turbina es instalado, la segunda es reducir la velocidad de descarga en la salida del rodete a la de la salida del tubo, reduciéndose así las pérdidas finales de energía cinética en la descarga.

### 2.3.1.5 Eje de turbina.

En el eje se montan diferentes elementos, todos ellos claves para que el funcionamiento de la turbina sea óptimo, siendo su pieza clave el rodete, el mismo que al estar rígidamente unido mediante acoplamiento al eje alternador, se transmite al rotor de éste el movimiento de rotación necesario.

En determinados grupos, y por características constructivas de los mismos referidos a condiciones de peso y sustentación, o aireación del rodete, el eje es hueco y su diámetro externo es 810mm.



**Figura 6. Eje de la unidad 1 de la turbina Francis de la Central Agoyán.**

### 2.3.1.6 Equipo de sellado del eje de turbina.

Como su nombre indica, está destinado a sellar, en definitiva, a cerrar e impedir el paso de agua que pudiera fluir desde el rodete hacia el exterior de la turbina, por el espacio existente entre la tapa de la misma y el eje.

En esencia consta de una serie de aros formados por juntas, bien de carbón, de material sintético o grafitadas, etc., presionadas, sobre un casquillo o collarín solidario con el eje, por medio de muelles de acero inoxidable o servomecanismos convenientemente distribuidos alrededor de la periferia del mismo. Se conoce como junta del eje o junta de carbones. Según sean las características constructivas de cada turbina, la junta puede estar diseñada para trabajar radial o axialmente.

#### **2.3.1.7 Cojinete guía de turbina.**

Está situado lo más cerca posible del rodete, sobre la tapa superior de la turbina, inmediatamente por encima del cierre estanco o sellado del eje.

Consta de un anillo dividido radialmente en dos mitades o bien de una serie de segmentos, que asientan con perfecto ajuste sobre el eje. Las superficies en contacto con éste, están recubiertas de metal blanco, antifricción y suelen tener tallados, vertical o diagonalmente, unos canales sobre la superficie de contacto con el eje, para favorecer la circulación de aceite y así lograr su autolubricación.

#### **2.3.1.8 Cojinete de empuje.**

Este elemento, conocido también como soporte de suspensión, pivote, rangua o quicio, característico y necesario en todos los grupos de eje vertical, hemos considerado como un componente propio de dichos grupos en sí y no de las turbinas hidráulicas que responden a tales condiciones de instalación.

Su situación, respecto al eje del grupo, varía según los tipos de turbinas. Así, en el caso de las turbinas Francis, dicho cojinete suele encontrarse por encima del rotor del alternador.

Como más significativos, citaremos los siguientes tipos de cojinetes de empuje:

- Cojinete de empuje de zapatas rígidas.
- Cojinete de empuje de zapatas pivotantes.
- Cojinete de empuje de resortes.
- Cojinete de empuje esférico.

En todos ellos, destinados a soportar esfuerzos axiales, destacan dos partes cuyas funciones son comunes. Así tenemos, para cada cojinete, la parte giratoria, totalmente solidaria con el eje del grupo, la cual descansa sobre la parte fija, enclavada en zonas inmóviles de la estructura rígida, próximas al eje, como son puentes, etc.

#### **2.3.1.9 Rodete.**

Se trata de la pieza fundamental donde se obtiene la energía mecánica deseada.

Está unido rígidamente a la parte inferior del eje de la turbina, en situación perfectamente concéntrica con el distribuidor, ocupando el espacio circular que éste delimita.



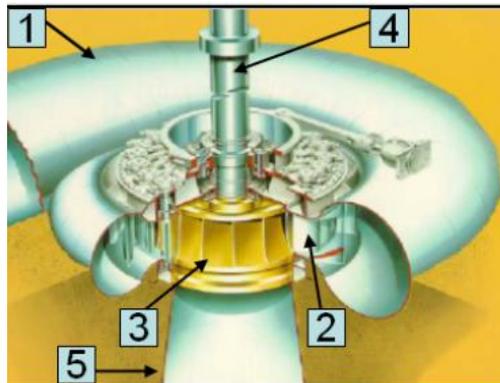
**Figura 7. Rodete de la turbina Francis de la Central Agoyán.**

Consta de un núcleo central, alrededor del cual se encuentra dispuesto un número determinado de palas de superficie alabeada, aproximadamente entre 12 y 21, equidistantemente repartidas y solidarias al mismo, formando pieza única en bloque por fundición o soldadura, es decir, sin uniones ni fijaciones accesorias. Las palas están unidas entre sí, por su parte externa inferior, mediante una llanta o banda que hace cuerpo con las mismas. Unos anillos de acero, anillos intersticiales, colocados a presión sobre el núcleo y la llanta, perfectamente centrados, realizan el cierre hidráulico al girar muy próximo a los escudos superior e inferior respectivamente.

En definitiva es una pieza esencial en cualquier turbina, según el salto que realice el agua o la velocidad específica que puede alcanzar el rodete se utilizará uno u otro [7].

## 2.4 Funcionamiento de la turbina Francis

Las turbinas Francis se encuentran situadas en la casa de Máquinas de la Central; en el caso de la Central Agoyán está ubicada a 120 m de profundidad, medido desde la carretera.



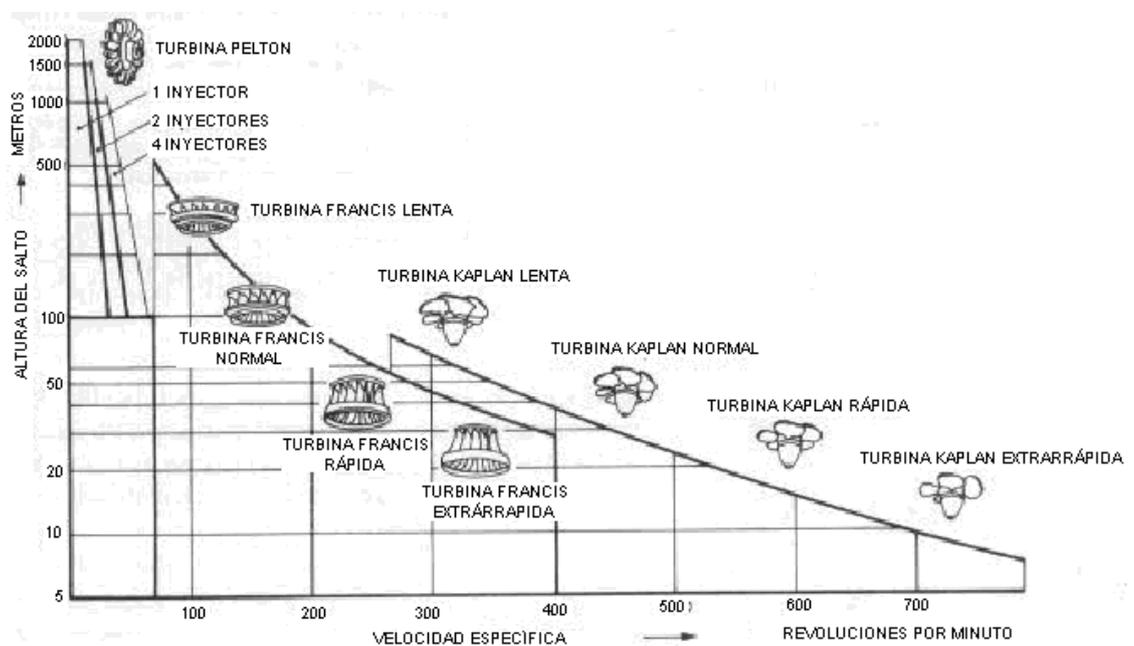
**Figura 8. Ubicación de los principales componentes de la turbina Francis.**

Basándonos en la fig. 4, su funcionamiento consiste en la entrada del agua a través de la tubería forzada hacia la voluta o caracol (1) la misma que convierte la energía potencial en energía cinética, posteriormente se dirige hacia el rodete (3), cuando el agua entra en contacto con el rodete gira gracias a las condiciones de caudal y presión del fluido, y una vez que el agua ha pasado por el rodete, sale de la turbina a través del tubo de salida o aspiración (5), cuando el rodete gira comunica su movimiento rotacional al eje de la turbina (4), que está conectado al generador, mientras que la regulación de la turbina, es decir la velocidad a la que gira el rodete es controlada por álabes directrices (2), los mismos que pueden girar permitiendo el ingreso de menor o mayor cantidad al rodete.

### 2.4.1 Margen de funcionamiento de las turbinas.

El tipo de turbina más conveniente viene dado por dos parámetros básicos de la instalación:  $H$  (la altura de salto) y  $n_s$  (la velocidad específica).

Como se puede observar en la Figura 9, la turbina tipo Francis se usa en plantas de altura media. Los ejes pueden tener su orientación horizontal ó vertical.



**Figura 9. Selección de turbinas hidráulicas.**

Su utilización es recomendable cuando nos movemos entre los siguientes valores:

- Un salto que puede oscilar entre los 18 - 520 metros
- Caudales medios (de 1 a 700 m<sup>3</sup> / s)
- Potencia: 0,1 - 80 MW [8].

Para el caso de la Central Agoyán el caudal es de 120 m<sup>3</sup>/s, con un salto de agua de 149m, y tiene una potencia de 78 MW en cada unidad.

## **2.5 Formas de deteriorarse el Rodete de la turbina Francis**

El deterioro de rodetes hidráulicos es un problema en el proceso de generación de energía eléctrica ya que causa reducciones en la eficiencia, entre otros factores que afectan al rodete de la turbina, los principales y más determinantes son los siguientes:

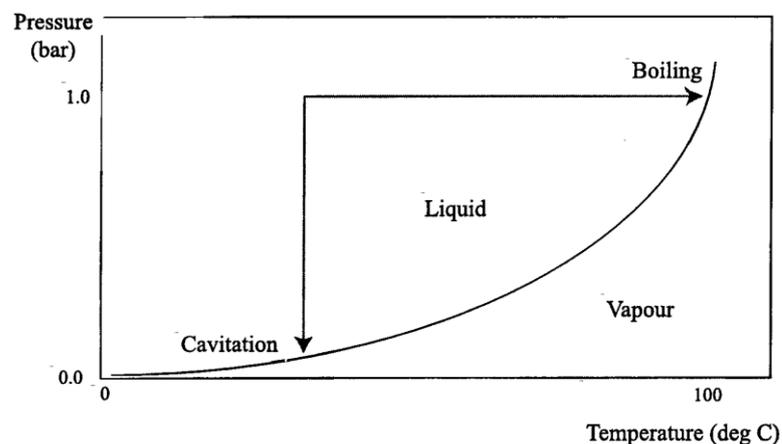
### **2.5.1 Cavitación**

La cavitación es la formación y actividad de burbujas (cavidades) en líquidos, la formación, precisamente, de estas cavidades tiene lugar cuando la presión de un líquido baja por debajo de la presión de vapor ( $P_v$ ), éstas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, lo que provoca que las burbujas implosionen bruscamente.

Si las burbujas implosionan cuando están cerca o en contacto con una pared sólida, las fuerzas ejercidas dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida. El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones.

En definitiva, la cavitación se produce por un descenso local de la presión por debajo de la de saturación del líquido que se traduce en la formación de vapor o gas y en la condensación brusca subsiguiente.

La formación de cavitación y sus consecuencias son función de muchos factores, tales como el diseño y tamaño de la máquina, la velocidad específica o el punto de funcionamiento, entre otros.



**Figura 10. Diagrama presión – temperatura.**

Se tiene referencia [8], que una burbuja en colapso rápido produce ondas de choque con frecuencias muy altas y presiones de hasta 410 MPa. Estas fuerzas son capaces de deformar varios metales hasta la zona plástica.

Las consecuencias que convierten en dañina la presencia de la cavitación son:

- La formación de inestabilidades de carga parcial, consecuencia de trabajar con caudales inferiores al de diseño (antorcha).

- Aparición de ruido y vibraciones.
- Disminución de prestaciones de la máquina hidráulica (caída del rendimiento), reduciendo la fiabilidad.
- Desarrollo de procesos erosivos.
- Incremento en los gastos de mantenimiento (no hablamos únicamente del coste asociado a la sustitución de la(s) pieza(s) afectada(s), sino en la problemática asociada a la paralización en la producción [8]).

### **2.5.2 Erosión**

El desgaste por erosión se define como el proceso de eliminación de metal provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula respecto de la superficie. Los materiales dúctiles parecen deformarse y posiblemente se endurezcan cuando se les golpea en forma perpendicular, pero a un ángulo crítico de aproximadamente  $20^\circ$ , el metal se elimina por una acción de corte.

La erosión por sedimentos es un fenómeno que afecta el rendimiento de las turbinas, debido al desgaste que provoca sobre los álabes de las mismas.

Entendemos por cavitación al fenómeno hidráulico por el cual se forman bolsas de vapor dentro del líquido a partir de una reducción de la presión hidrodinámica a temperatura constante; estas bolsas de vapor (o burbujas) son transportadas por el líquido hasta llegar a una región donde la presión sea superior, en ese instante el vapor regresa súbitamente al estado líquido provocando la “implosión” de la burbuja.

Esta implosión genera sobre las paredes sólidas tensiones elevadas que erosionan la superficie.

La erosión por sedimentos es un proceso más sencillo que el de cavitación y esencialmente se produce por el impacto de partículas que transporta el agua sobre las paredes de los álabes, provocando erosión con pérdida de material [9].

No hay que confundir los fenómenos de corrosión con los de erosión, ésta es efecto del caudal sólido que arrastran las aguas, especialmente cuando éstas van animadas de gran velocidad, como sucede en saltos de relativa gran altura, los granos de arena en suspensión hacen el efecto de esmeril, desgastando el metal sobre el que roza el agua y produciendo en él surcos con superficies lisas, como corresponde a la acción de lima de las aguas.

Este efecto es de enorme importancia y en algunas instalaciones ha revestido tanta, que en el transcurso de semanas había que sustituir rodetes o álabes de los distribuidores. Así, pues, el efecto de erosión es de carácter físico [10].

Puede observarse en las fotografías (figura 11) el efecto de la erosión sobre el rodete de la turbina, que genera una superficie irregular, angulosa (filosa al tacto) con saltación de material sólido.



**Figura 11. Rodete erosionado de la turbina Francis de la central Agoyán.**

### 2.5.3 Corrosión

La corrosión que se observa en muchas turbinas es de índole química. La superficie atacada no se presenta lisa, como en el caso de la erosión, sino que aparece esponjosa. En unas zonas el ataque es profundo mientras que en otras es apenas notorio. Siempre coincide la parte atacada con regiones en que se produce alguna depresión hidráulica; por ejemplo en la parte alta de los tubos de aspiración, especialmente cuando la altura de éstos se acerca al límite práctico, en la zona inmediata posterior a una estrangulación de la vena líquida, la que al ensancharse produce una depresión, cuando por falta de adaptación de la vena líquida a la superficie metálica queda cierta cámara de presión débil.

El aire que el agua llevaba disuelto, al pasar ésta por esas regiones de presión débil, se desprende; pero parece que primero sucede esto con el oxígeno que en estado nascente tiene gran poder corrosivo y ataca al material formando una delgada capa de óxido que la misma agua arrastra, dejando al metal dispuesto a sufrir un nuevo ataque.

Además, rebasados ciertos valores de velocidad específica, para un salto de altura determinada, hay corrosión; es tanto mayor cuanto más elevada es aquella velocidad [10].



**Figura 12. Partes del Rodete corroído de la turbina Francis de la central Agoyán.**

## **2.6 Reparación del Rodete de la Turbina Francis.**

### **2.6.1 Generalidades sobre Tratamientos Térmicos**

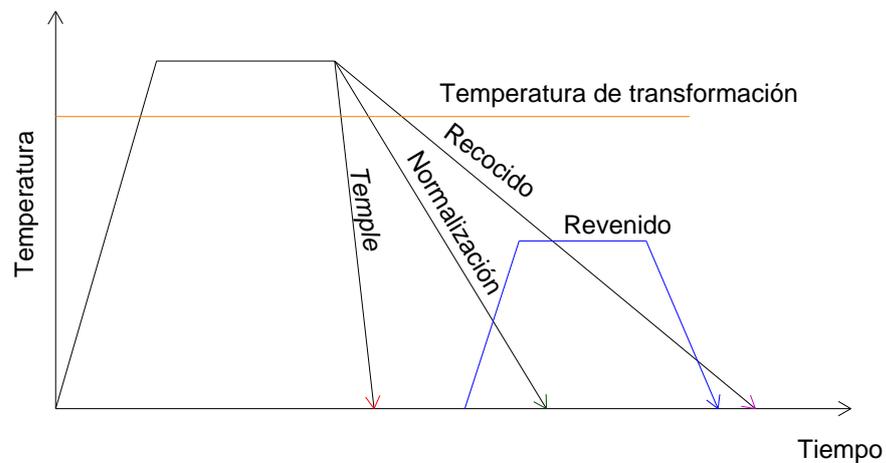
Son ciclos de calentamiento y enfriamiento a los cuales se somete un material con el fin de variar su dureza y cambiar su resistencia mecánica.

En general hay cuatro tipos básicos de tratamiento térmico:

1. Temple.
2. Revenido.
3. Recocido.
4. Normalizado.

Todos los tratamientos térmicos tienen una ruta obligatoria:

- Calentamiento del acero hasta una temperatura determinada.
- Permanencia a esa temperatura cierto tiempo.
- Enfriamiento más o menos rápido.



**Figura 13. Esquema de las curvas para cada tipo de tratamiento térmico.**

1.- **Temple:** Su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia del acero.

Para ello, se calienta el acero a una temperatura entre  $(900 - 950) ^\circ\text{C}$  ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría luego más o menos rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, etc.

Al elevar la temperatura del acero, la ferrita y la perlita se transforman en austenita, que tiene la propiedad de disolver todo el carbono libre presente en el metal. Si el acero se enfría despacio, la austenita vuelve a convertirse en ferrita y en perlita, pero si el enfriamiento es repentino, la austenita se convierte en martensita, de dureza similar a la ferrita, pero con carbono en disolución sólida.

2.- **Revenido:** Sólo se aplica a aceros previamente templados, para disminuir ligeramente los efectos del temple, conservando parte de la dureza y aumentar la tenacidad. El revenido consigue disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada. Se distingue básicamente del temple en cuanto a temperatura máxima y velocidad de enfriamiento.

3.- **Recocido:** Consiste básicamente en un calentamiento hasta temperatura de austenización (800 – 925) °C seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza. También facilita el mecanizado de las piezas al homogeneizar la estructura, afinar el grano y ablandar el material, eliminando la acritud que produce el trabajo en frío y las tensiones internas.

4.- **Normalizado:** tiene por objeto dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido.

## **2.6.2 Procedimiento para la reparación del rodete de la turbina Francis de la central Agoyán.**

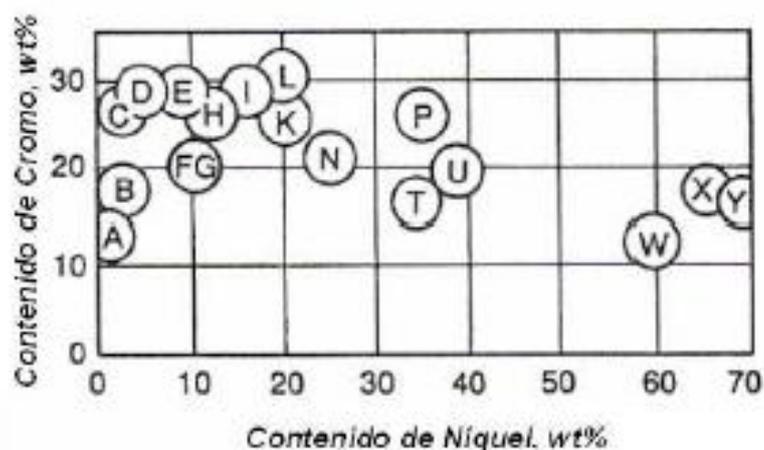
### **Material base.**

El material con el que está construido el rodete de la turbina Francis de la central Agoyán es el acero inoxidable martensítico ASTM A743 Grado CA6NM, que ofrece buena combinación de propiedades mecánicas y soldabilidad, una aceptable resistencia a la corrosión y bajo costo en relación con otros aceros inoxidables, por lo que ha tenido gran aceptación para aplicaciones como rotores de bombas, impulsores, difusores, carcasas, entre otras, sin embargo, estas propiedades dependen fuertemente de la microestructura, que está sujeta al tratamiento térmico utilizado.

Conocido también como 13-4, por sus contenidos de cromo y níquel respectivamente, pertenece a la categoría de los aceros martensíticos blandos, los cuales fueron desarrollados con el fin de proveer tenacidad y reducir la susceptibilidad al agrietamiento es decir mejorar la soldabilidad, manteniendo los niveles de resistencia requeridos.

La norma que designa este material es la ASTM A743 grado CA6NM, esta denominación brinda una idea inicial sobre su composición química, es así que la letra C indica que es una aleación resistente a ataques corrosivos a temperaturas inferiores a 650 °C; la segunda letra de la nomenclatura: A, indica la relación entre los contenidos de Cromo y Níquel, como se aprecia en la figura 14, donde la

cantidad de ambos aumenta alfabéticamente, el porcentaje máximo de carbono está representado por el número 6, multiplicado por 100, y las últimas letras indican la presencia de elementos de aleación adicionales en el acero: Níquel y Molibdeno [11].



**Figura 14. Esquema para el rango de contenido de Cr y Ni en aceros inoxidables, resistentes a la corrosión y a altas temperaturas.**

Con respecto a su composición química se basa en el análisis químico que se le ha realizado a un álabe del rodete, la tabla 2 contiene información de los resultados de éste análisis, presentando además los rangos mínimos y máximos de los porcentajes que deben estar presentes en el material [12].

**TABLA 2: COMPOSICIÓN QUÍMICA.**

Componentes	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S
Mín.	-	12,00	3,50	máx.	-	-	-	-
Máx.	0,07	13,50	5,00	0,7	1,00	1,50	0,040	0,030
Análisis de colada	0,04	12,21	3,93	0,44	0,49	0,67	0,029	0,002
Análisis de verificación	0,04	12,18	3,93	0,43	0,52	0,65	0,030	0,003

**TABLA 3: PROPIEDADES MECÁNICAS.**

Pruebas de tensión				Dureza	Impacto
Carga convencional Fluencia 0.2%	Resistencia tracción	Elongación	Reducción del área	Brinell	Charpy
N/mm <sup>2</sup> Mín. 637	N/mm <sup>2</sup> Mín. 785 - 980	% Mín. 15	% Mín. 35	HBW (10/3000) Máx. 230	J/cm <sup>2</sup> Mín. 78,5

**TABLA 4: PROPIEDADES FÍSICAS.**

Propiedad	Unidad	Cantidad
Densidad	Kg/dm <sup>3</sup>	7.7
Resistividad eléctrica a 20 °C	Ωmm <sup>2</sup> /m	0.6
Magnético		Si
Conductividad Térmica a 20 °C	W/m °k	25
Calor Específico	J/kg °k	430
Coeficiente de dilatación térmica media	10 <sup>-6</sup> k <sup>-1</sup>	
20 a 200 °C		10.9
20 a 300 °C		11.3
20 a 400 °C		11.6
Temperatura de fusión	°F	2700 – 2790

**TABLA 5: DESIGNACIONES DEL MATERIAL.**

ASTM	A743Gr. CA-6NM
UNS	J91540
DIN	1.4313 G-X5CrNi13.4

**Material de soldadura.**

El electrodo empleado como material de aporte es el electrodo AWS A5.4-92: E 410 NiMo-25, electrodo de varilla SMAW, de acero inoxidable de alta aleación.

Posee un revestimiento básico de bajo hidrógeno siendo un electrodo adecuado para aceros suaves martensíticos y ferríticos-martensíticos laminados, forjados y aceros fundidos.

Utilizado principalmente en la construcción de turbinas hidráulicas y compresores. Son resistentes a la corrosión del agua, al vapor y a la atmósfera del agua de mar.

Gracias a un óptimo equilibrio de componentes de aleación del depósito de soldadura tiene muy buena ductilidad, tenacidad y resistencia al agrietamiento.

Tiene excelentes características de funcionamiento, fácil eliminación de la escoria y la apariencia de grano suave.

BÖHLER FOX NC 13 / 4, así como la varilla de GTAW-BÖHLER NC 13/4-IG y análogos del alambre de GMAW son muy populares en la construcción de turbinas hidráulicas.

**TABLA 6: COMPOSICIÓN TÍPICA DE TODAS LAS SOLDADURAS DE METAL.**

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
% en peso	0,035	0,3	0,5	12,2	4,5	0,5

El electrodo que utilizan para reparar el rodete tiene los siguientes datos de operación:

Identificación del electrodo: FOX CN 13/4 410 NiMo-25 E13 4 B

Diámetro: 3,2 mm

Longitud: 450 mm

Amperaje: 90-130 A

El tratamiento térmico post-soldadura se puede realizar a la temperatura entre (580 – 620) °C [3].

Cuando se requiere que el material tenga la máxima confiabilidad bajo condiciones de severa corrosión, es aconsejable un tratamiento térmico para asegurar que la soldadura y la zona afectada por el calor sean restauradas plenamente hasta una estructura de óptima resistencia a la corrosión, esto asegura a la vez el alivio de eventuales tensiones residuales internas retenidas después de la soldadura que, al no removerlas, podrían ocasionar el inicio de corrosión por fatiga.

El fabricante, MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD., dice que el material del rodete de la turbina es DIN 1.4313 G-X5CrNi 13.4 y recomienda que se puede hacer los siguientes tratamientos térmicos [12].

**TABLA 7: TRATAMIENTOS TÉRMICOS.**

Recocido	610 ± 20 °C x min	3h	Enfriamiento en el horno
Temple	1025 ± 20 °C x min	3h	Enfriamiento por chorro de aire
Revenido	630 ± 20 °C x min	5h	Enfriamiento al aire

Cuyas especificaciones relacionadas corresponden al acero ASTM A352, grado CA-6NM, grupo 4, de acuerdo a las normas ASME, sección 8.

En la práctica y basado en experiencias actuales de reparación del rodete y otros elementos de la turbinas Francis de la central Agoyán en otros países como en Chile, tenemos que el material durante el tratamiento térmico de alivio de tensiones permanece a menos temperatura pero durante más tiempo; a continuación se describe el procedimiento utilizado.

1.- Temperatura de precalentamiento está entre 100 °C y 150 °C.

2.- La temperatura de interpaso entre cordones se realizará hasta una temperatura máxima de 150 °C.

3.- La temperatura alrededor de la zona a soldar debe estar entre (60 – 80)°C.

Cabe destacar que los cordones de soldadura no deberán ser “trabajados” tipo a “malla”, si no tirados normalmente en forma rectilínea.

Luego de la preparación apropiada del rodete, se efectuará el tratamiento térmico de alivio de tensiones en el horno eléctrico, el mismo que se describe a continuación:

1.- El rodete se calentará partiendo desde la temperatura ambiente a una velocidad de (40 – 50) °C / h, hasta los 580 ± 10 °C; pero debido a que BOHLER

recomienda no bajar de 580°C la temperatura en el tratamiento térmico para el aporte de soldadura; la temperatura de permanencia de tratamiento térmico será 585 ± 5 °C. Durante el calentamiento se debe tomar lectura de la temperatura cada 15 minutos, mientras que en el mantenimiento y enfriamiento tomar lectura cada 30 minutos.

2.- Estando todos los canales con lectura entre 580 y 590 °C, dar inicio al mantenimiento.

3.- La permanencia del rodete a la temperatura de alivio debe ser durante 11 horas; y no se deberá sobrepasar los 590 °C en las lecturas de las termocuplas que monitorean el rodete durante todo el distensionado.

4.- La velocidad de enfriamiento hasta los 150 °C se debe realizar entre un intervalo de 40 a 50 °C / h. Por ningún motivo abrir la puerta del horno en el proceso de calentamiento, mantenimiento o enfriamiento.

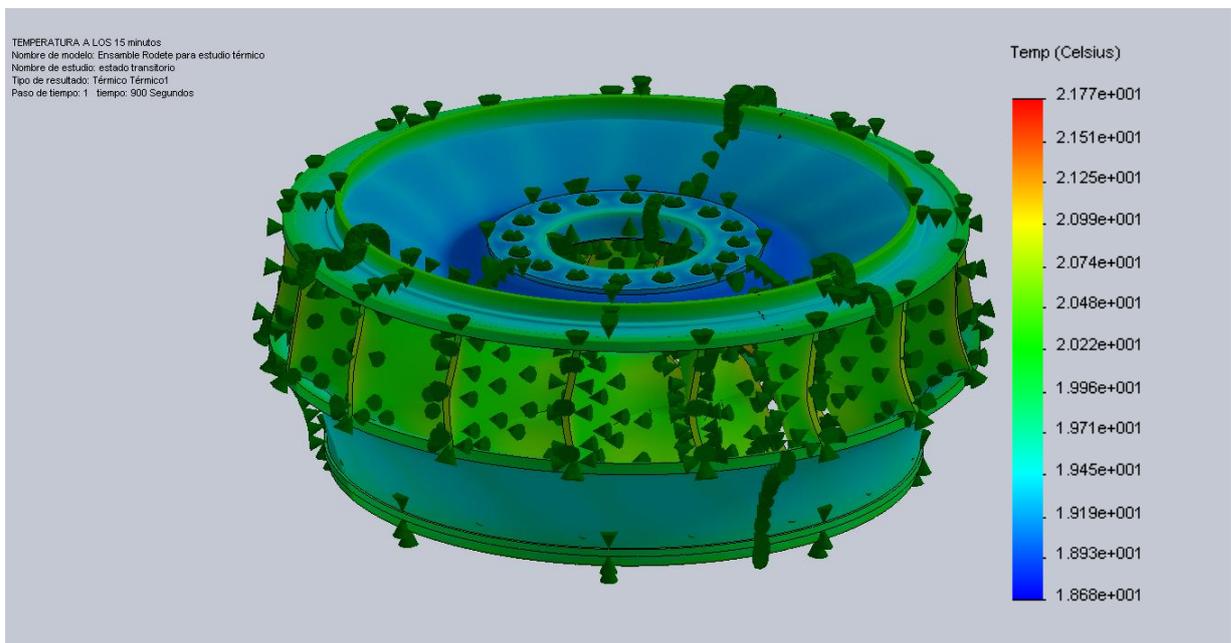
5.- Cuando la temperatura de la masa del rodete sea igual o menor a 150 °C abrir dos escotillas de la tapa del horno y posteriormente después de diez horas, abrir las otras dos siguientes; no desmontar la tapa del horno hasta cuando la temperatura en la masa del rodete descienda a 50 °C o menos [12].

6.- Después de ello se enfriara el rodete al aire libre.

### 2.6.3 Simulación del comportamiento de la masa del rodete frente a las temperaturas y tiempos del tratamiento térmico en un software.

El software permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para la producción.

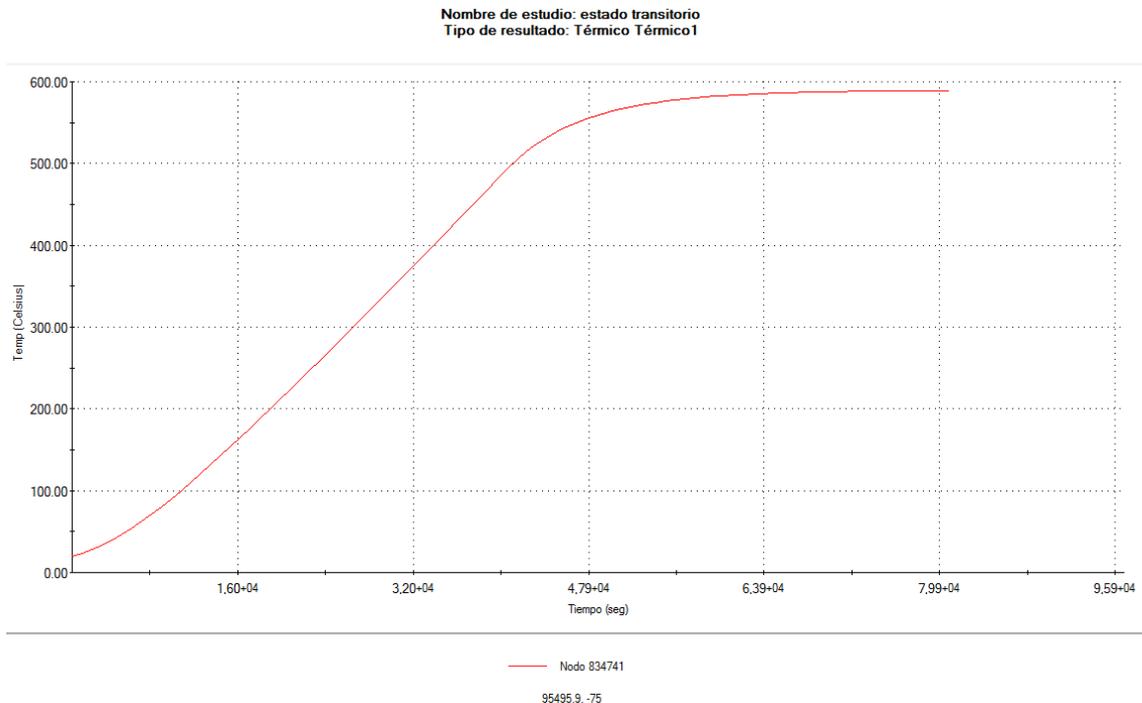
El procedimiento descrito en el apartado 2.6.2, que debe cumplir el horno en tiempo y temperatura a lo largo del tratamiento térmico, se ha simulado en el software con el propósito de comprobar la homogenización de temperatura en el rodete cuando éste haya alcanzado el estado de permanencia de temperatura a  $585 \pm 5$  °C.



**Figura 15. Rodete a los 15 minutos de tratamiento térmico.**

La figura 15, muestra el inicio del tratamiento térmico. Los valores de temperatura en grados Celsius se muestran en la parte derecha; el código de

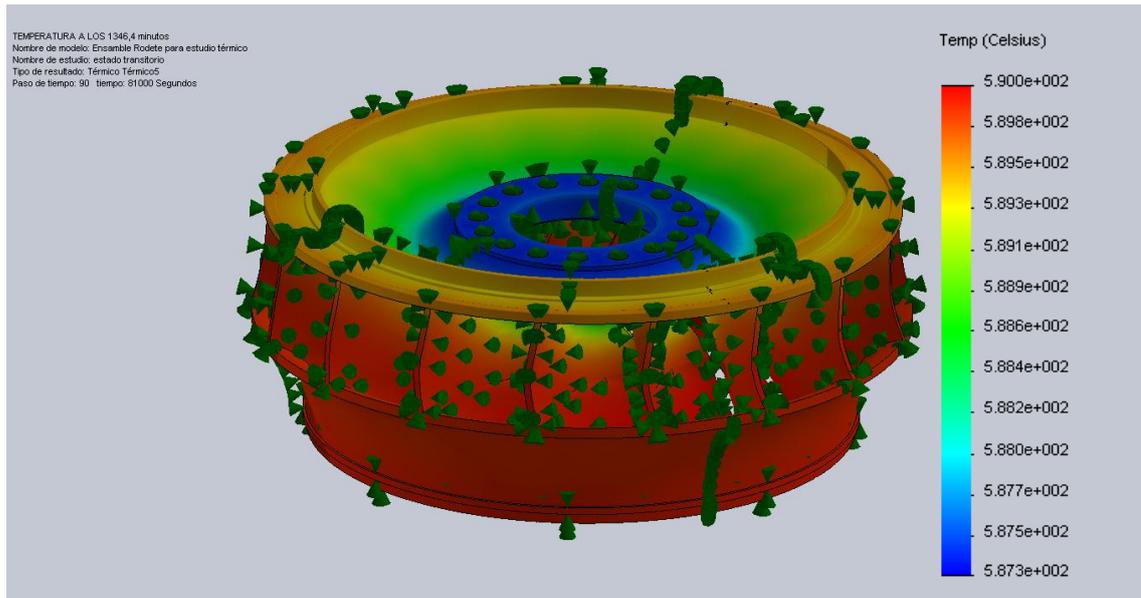
colores representa las diferentes temperaturas, en donde el color rojo indica la temperatura más alta y el color azul representa la temperatura más baja en los diferentes instantes de tiempos.



**Figura 16. Gráfica Temperatura vs Tiempo del proceso de tratamiento térmico en el rodete.**

La gráfica de la figura 16, muestra el comportamiento de un punto del rodete escogido al azar que indica de mejor manera el incremento de la temperatura con respecto al tiempo durante el tratamiento térmico. El intervalo de permanencia de 11 horas a la temperatura de  $585 \pm 5$  °C, da tiempo a que toda la masa del rodete se homogenice.

La figura 17, representa el instante final de permanencia del tratamiento térmico cuando se mantiene la temperatura a  $585 \pm 5$  °C. Se puede observar que las temperaturas están prácticamente homogéneas en todo el rodete.



**Figura 17. Rodete a las 22,44 horas de tratamiento térmico.**

## **2.7 Hornos Industriales**

Se entiende por hornos industriales los equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan las piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente, ya sea de forma directa (inducción, resistencia propia, etc.) o de forma indirecta por transmisión de calor de otros elementos (tubos radiantes, humos de combustión, resistencias eléctricas, etc.). El objeto de este calentamiento puede ser muy variado, por ejemplo:

- Fundir.
- Ablandar para una operación de conformación posterior, facilitando así las futuras operaciones de deformación por flexión, forja, extracción, estampación o laminación.
- Tratar térmicamente para impartir determinadas propiedades.

- Recubrir las piezas con otros elementos, operación que se facilita frecuentemente operando a temperatura superior a la del ambiente [13], [14].

En el presente trabajo la referencia específica será a los hornos industriales u hornos de calentamiento de metales en los que se transfiere calor a la carga de tal forma que su temperatura se eleve sin lograr ninguna reacción química o cambio de estado, concretamente; sin que llegue a producirse fusión, por ello es necesario recalcar la importancia que tiene la temperatura para el manejo adecuado en los hornos para tratamientos térmicos.

### **2.7.1 Partes principales de los hornos.**

Los hornos que se dividen de acuerdo a los fines con que fueron ideados y, por lo tanto, tienen sus estructuras apropiadas para cada caso, tienen sin embargo, toda una serie de elementos constructivos comunes, aunque con diseños distintos.

La parte principal de cada horno es la zona de trabajo, donde se efectúa el proceso tecnológico prefijado. En la mayoría de los casos, dicha zona se separa del ambiente por la bóveda, las paredes y la solera, construidas de materiales refractarios y termoaislantes. En su base tienen los cimientos, construidos de materiales comunes.

#### **Cimientos.**

Los cimientos son la parte del horno que se apoya directamente en el suelo reconocido como apto para ése fin y que sostienen todas las demás partes. Por

supuesto, lo único que se requiere de los cimientos es su absoluta solidez como para aguantar toda la carga estática de las partes del horno dispuestas encima, así como eventualmente las posibles cargas dinámicas, sin sufrir deterioro alguno. Los cimientos deben tener dimensiones suficientes, como para que la presión contra el suelo no pase los valores admisibles.

### **Plataforma.**

La plataforma es el plano inmediatamente superior a los cimientos del horno y el inferior de la mampostería. Para su construcción se emplean distintos materiales: ladrillos refractarios y termoaislantes. El tipo de construcción y el espesor de la plataforma se dictan por la estructura del horno. Su fin principal es dar una superficie sobre la cual pueden ser dispuestas todas las partes inferiores del horno.

### **Solera.**

La solera es la parte del horno sobre la cual se disponen los materiales a calentarse. Como soporta la carga del material debe ser suficientemente sólida, y químicamente estable. Existen soleras fijas y móviles.



**Figura 18. Hornos de solera móvil y fija.**

### **Paredes.**

Las paredes rodean la zona de trabajo del horno. Generalmente ellas soportan la bóveda. Deben proteger la zona interna de las pérdidas de calor, no permitir el escape ni succión del aire del interior del horno. La cara más importante de las paredes es la interior. Debe ser pareja, limpia y tener juntas delgadas.

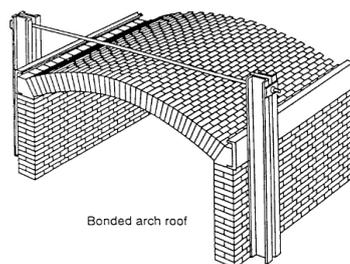
### **Bóveda.**

La bóveda es una de las partes más importantes del horno. Generalmente soporta temperaturas muy altas y se calienta mucho. Como los gases calientes en la parte superior de la zona de trabajo se encuentran bajo una presión superior a la normal, la bóveda debe ser impermeable para con los mismos.

Existen cuatro tipos de bóvedas:

- 1.- planas
- 2.- de arco
- 3.- semicirculares,
- 4.- suspendidas.

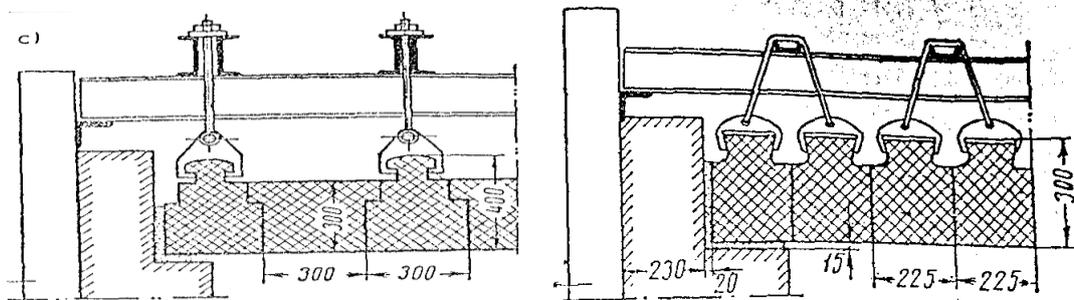
Las bóvedas de arco son las más frecuentes.



**Figura 19. Bóveda de Arco.**

Las bóvedas suspendidas se construyen con ladrillos perfilados que se fijan en las estructuras metálicas suspendidas en estribos especiales. El uso de las bóvedas suspendidas permite disminuir el consumo de calor para calentar la mampostería, porque, primero el volumen de la misma es menor y, segundo, es posible el empleo de materiales refractarios más livianos.

Sus inconvenientes estriban en la construcción más complicada que la de otras bóvedas.



**Figura 20. Bóveda suspendida.**

### **Canales**

Los canales sirven para conducir los gases hasta la chimenea y suelen ser de sección rectangular y de techo plano o abovedado.

### **Juntas térmicas.**

Las juntas térmicas deben compensar la dilatación volumétrica de la mampostería por el calor. Asegurando la integridad de la mampostería, las juntas a la vez no deben rebajar la solidez de la misma y ser causa de escapes de gases, de metales o escorias.

El ancho y la disposición de las juntas se determinan en concordancia con el calentamiento de una parte dada del horno y de los coeficientes de dilatación de los materiales por el calor.

### **Estructura metálica**

Se llama esqueleto a la estructura metálica que sujeta todas las partes del horno y absorbe los esfuerzos que se originan en la mampostería tanto durante su ejercicio, como posteriormente en los procesos de su trabajo.

El esqueleto transmite estos esfuerzos a los cimientos. Las partes del esqueleto se aprovechan también para montar sobre ellas los accesorios del horno, como: marcos, tapas, puertas, ventanas, mecheros, toberas, etc.

### **Puertas del horno.**

Las puertas de los hornos deben ser estancas, ligeras, sólidas y resistentes al calor así como también tener resistencia mecánica y duración. Permiten el paso para cargar y descargar los materiales.



**Figura 21. Tipos de puertas para el horno.**

Las puertas pueden ser de tipo levadizo o bisagra, pero ambos tipos deben garantizar la mayor hermeticidad posible. Se componen de una o más piezas moldeadas; si son más de una se sujetan por tornillos, se recubre con el material refractario más adecuado.

### **Ventanas de trabajo.**

Para vigilar el proceso a que se someten y para reglarlo, en las paredes del horno se practican diversas aberturas, llamadas ventanas de trabajo [15].

## **2.7.2 Hornos de Tratamientos Térmicos**

Se utilizan para conferir una característica especial a la pieza a tratar, como pueden ser los tratamientos térmicos superficiales de cementación o de carbonitruración, o que afecten a toda la pieza como el templado, recocido, envejecido, revenido etc.

Hay diversos tipos de hornos para realizar tratamientos térmicos, los mismos que se diferencian entre sí ya que dependerán básicamente del tratamiento térmico específico a realizarse.

Se puede clasificar a los hornos de tratamiento térmico por la manipulación del material en el proceso mismos de calentamiento dentro del horno. Es así que se pueden distinguir dos tipos básicos de hornos:

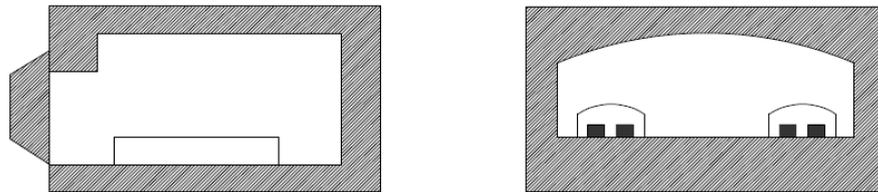
- a) El horno “Dentro-Fuera” o tipo de horno de carga por lotes o intermitente, o periódico.
- b) El horno continuo.

La principal característica del horno “**Dentro-Fuera**” (Fig.22), es la temperatura constante, prácticamente, en todo su interior. Su principio básico es colocar la pieza en el horno en una posición determinada hasta que la carga se caliente a la temperatura requerida. Una vez que el proceso de calentamiento se ha completado, la carga se retira por la misma puerta por donde fue introducida en el horno.

En los hornos intermitentes deben distinguirse los procesos en que la temperatura de regulación del horno permanece prácticamente constante (hornos de tratamiento de normalizado, temple y revenido y hornos de recalentar para forja y estampación), de los procesos en que la temperatura del horno sigue un ciclo de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento sin extraer la carga del interior del horno:

- En los primeros, al introducir la carga baja evidentemente la temperatura del horno, se enfría el revestimiento cediendo su calor a la carga y la energía cedida por los elementos calefactores se utiliza en calentar nuevamente el revestimiento y la carga hasta la temperatura de regulación del horno, cuyo valor de consigna ha permanecido constante.

- En los segundos, al introducir la carga, el horno está a baja temperatura y se calienta simultáneamente la carga y el revestimiento, con todos los elementos del interior del horno. Después de un periodo de empapado o mantenimiento a temperatura, se enfría la carga en el interior del horno, juntamente con el revestimiento. Es fundamental, por tanto, el calor almacenado por el revestimiento (durante el calentamiento y empapado) y cedido en el enfriamiento.



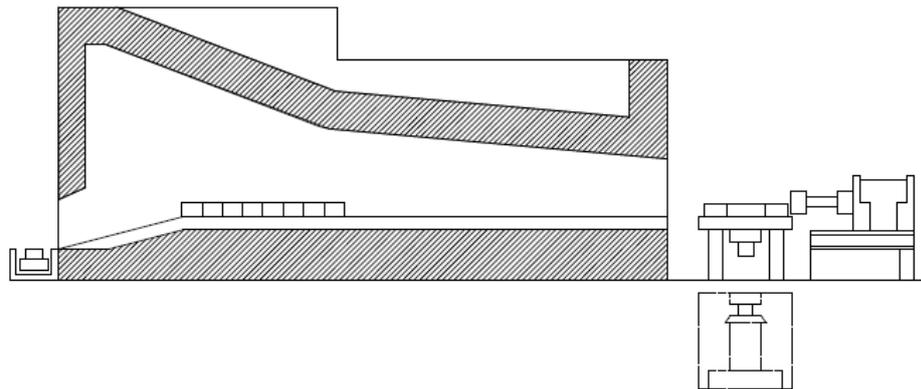
**Figura 22. Horno del tipo “Dentro-Fuera”.**

Mientras que en los **hornos continuos** (Fig. 23), el material se desplaza hacia el interior del horno y a la vez se va calentando. Las formas de transportar la carga pueden ser varias ya que la solera puede ser fija o móvil, esta última conocida también como de carretón, o puede ser transportada por medio de la acción de un tornillo.

La temperatura en los hornos continuos es prácticamente constante en cada zona a lo largo del tiempo y la temperatura de la carga varía a lo largo del tiempo, pero se mantiene relativamente constante en todo el horno en un instante dado.

Cuando se trata de los hornos de combustión, las piezas a calentar están en contacto con los productos de la combustión que para ciertos casos es muy

perjudicial, por lo que muchos hornos requieren una atmósfera especial para protección de las piezas, consiguiendo evitar la oxidación y la descarburización y se construyen con una envolvente exterior hermética al gas, que rodea al revestimiento refractario.



**Figura 23. Horno continuo con descarga por un extremo.**

El calor puede ser suministrado por tubos radiantes que queman combustible o por resistencias eléctricas que actúen como elementos calefactores.

En la industria el tipo de horno de combustión se emplea mucho más que el de horno eléctrico, sin embargo, para muchas aplicaciones se prefiere el horno eléctrico, ya que ofrece ventajas que no pueden ser medidas por el coste del combustible [16] páginas 16-17, [17].

### **2.7.3 Hornos eléctricos.**

En la actualidad este tipo de hornos son de uso muy extendido y con los sistemas de programación que se incorporan son muy útiles y fiables por su comodidad y fácil manejo.

La electricidad es un agente calefactor que permite el control más preciso en los hornos de tratamiento térmico, y consecuentemente, son los que más se usan, y tienen las siguientes ventajas:

- Pueden obtenerse temperaturas muy elevadas hasta de 3500°C en algunos tipos de hornos eléctricos.
- Puede controlarse la velocidad de elevación de temperatura, y mantener esta entre límites muy precisos, con regulaciones completamente automáticas.
- La carga queda por completo libre de contaminación del gas combustible.
- Tienen mayor duración los revestimientos que en los demás tipos de hornos.
- Se instalan en espacio reducido.
- Su operación se realiza con mayor higiene que la de los otros tipos de hornos.

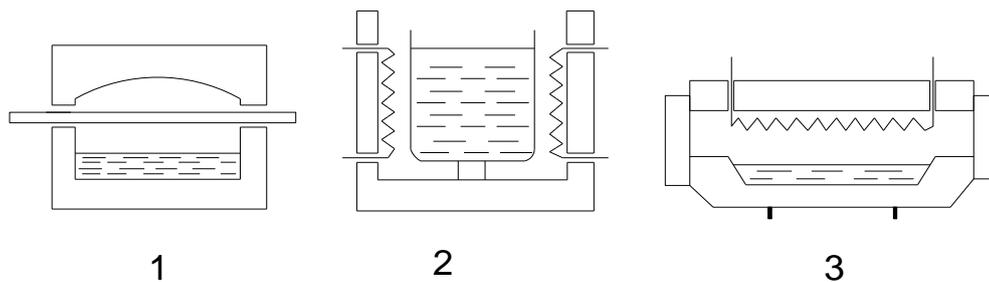
Eficiencia: El coeficiente de conversión de electricidad en calor es prácticamente 100%, lo que no ocurre con el uso de combustibles comunes, donde parte de la energía es consumida en el calentamiento del aire y de los gases calientes que son expulsados a la atmósfera.

Las partes básicas de un horno eléctrico son:

- Cámara de calentamiento: es el espacio físico donde se coloca la pieza a calentar.
- Elementos eléctricos: son numerosos y son los responsables del calentamiento de la pieza, basándose en diferentes principios físicos.

- Revestimiento aislante: es necesario para minimizar las pérdidas de calor al ambiente.

El principio para el funcionamiento de un amplio conjunto de hornos industriales destinados a tratamientos térmicos es la conversión de energía eléctrica en calor, el mismo que se desarrolla por el paso de una corriente eléctrica a través de resistencias que funcionan como unidades de calentamiento, montadas de tal forma que mantienen fuera de contacto con la carga [18].



**Figura 24. 1) Horno radiante de resistencia no metálica, 2) horno de crisol con resistencia metálica, 3) horno de cámara con resistencia metálica.**

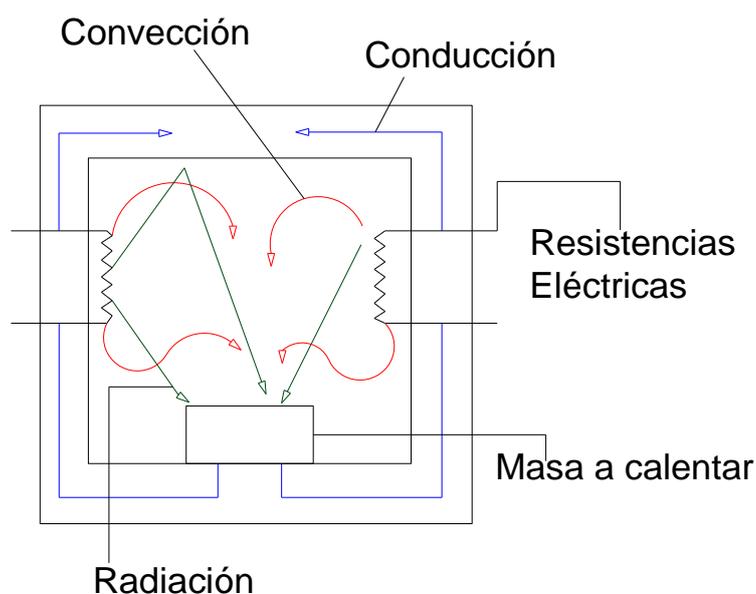
#### **2.7.4 Hornos de Resistencia.**

Los hornos de resistencia se definen como aquellos que utilizan el calor disipado por efecto Joule en una resistencia óhmica, la misma que puede estar constituida por la carga que se va a calentar (hornos de calentamiento directo) o por resistencias adecuadas independientes de la carga (hornos de calentamiento indirecto), por las cuales circula corriente eléctrica.

En los hornos de calentamiento directo, el material se coloca entre dos electrodos (en contacto directo con ellos), ofreciendo una resistencia al paso de la corriente, y calentándose. Entre otras, estos hornos encuentran aplicación en la fabricación de electrodos de grafito, en el tratamiento térmico de metales y en hornos de sales para la cementación de aceros.

En los hornos de calentamiento indirecto, el material es calentado por radiación, por convección y/o por conducción mediante resistencias colocadas de forma adecuada. La carga a calentar y las resistencias se encuentran contenidas en una cámara aislada térmicamente por medio de materiales refractarios y aislantes.

En la figura 25, se destacan los elementos principales de un horno de resistencia de calentamiento indirecto y el curso del flujo térmico.



**Figura 25. Horno de resistencia con calentamiento indirecto.**

a) Por conducción.

El calor absorbido por la superficie de la carga por radiación y/o convección pasa a su interior por conducción lo que exige un gradiente de temperatura, es decir, la temperatura en el centro de la carga será inferior a la de la superficie, no solamente durante el calentamiento (temperatura del horno mayor que la de la superficie de la carga), sino también durante una buena parte del mantenimiento a temperatura, hasta conseguir en la pieza la uniformidad de temperatura requerida.

b) Por convección

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado.

En los hornos eléctricos de tratamientos térmicos de baja y media temperatura (hasta  $750^{\circ}\text{C}$ ) es frecuente realizar el calentamiento de la carga mediante una corriente de aire o atmósfera controlada a elevada temperatura, que sede calor a la carga por convección.

En los hornos con temperaturas más bajas, los coeficientes de transmisión elevados solamente se consiguen con velocidades muy altas en los gases del horno, porque la transmisión del calor por radiación a  $537^{\circ}\text{C}$  es menor que 1/10 de la que se produce a  $1024^{\circ}\text{C}$  [16] páginas 70,71.

c) Por radiación.

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas.

Es frecuente afirmar que por encima de  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  el mecanismo de transmisión de calor por convección no es importante, mientras que por debajo de  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  se puede despreciar el mecanismo de radiación.

### **Resistencias eléctricas.**

En la elaboración de las resistencias eléctricas se utilizan materiales que deben poseer, entre otras características, una elevada resistividad eléctrica, alta temperatura de fusión, y resistencia a la oxidación en caliente y a la corrosión en el ambiente gaseoso producto de las reacciones químicas en juego. El tipo de resistencia a escoger para un horno dado se halla ligado principalmente a la temperatura de trabajo de éste.



**Figura 26. Resistencias en el interior de un horno.**

La disposición de las resistencias eléctricas dentro del horno no puede ser solamente en las paredes laterales sino que también pueden presentar resistencias colocadas en la parte posterior, parte inferior y superior del horno.

Se tienen:

a) Resistencias metálicas.

- Aleaciones de base Ni-Cr.- De todas ellas la más utilizada en resistencias de hornos eléctricos es la 80 Ni- 20 Cr.
- Aleaciones ferríticas.- Son aleaciones Cr-Fe-Al.
- Otros materiales.- empleados sobre todo en hornos de vacío de alta temperatura, como el molibdeno, tántalo y tungsteno.

b) Resistencias no metálicas.

- Tubos a base de carburo de silicio para temperaturas de hasta 1500 °C
- Silicato de molibdeno para temperaturas de hasta 1700 °C.
- Grafito y molibdeno (en pastillas, cilindros o granulados en tubos) para temperaturas de hasta 1800°C.

c) Tubos radiantes.

d) Resistencia blindadas.- típicas para calentamiento de líquidos en baños, tanques de temple, etc.

Las resistencias metálicas se utilizan en forma de hilos con diámetros variables de fracción de mm a unos 6 mm, comúnmente enrollados en forma helicoidal o en forma de cintas dispuestas en zig-zag.

Por su parte, las resistencias no metálicas están constituidas por astas (o tubos) fijados horizontalmente entre dos paredes del horno o verticalmente entre el suelo y la cubierta.

Hay que tomar en cuenta que el costo de una caloría producida por combustibles es muy bajo en comparación con una caloría procedente de la energía eléctrica, sin embargo para el presente estudio no representa mayor problema, por la disponibilidad que presenta la empresa [18].

## **2.8 Selección de la mejor alternativa para el diseño del horno.**

En esta sección se analizan los criterios de selección de un horno industrial según los condicionamientos básicos que determinan su diseño, ya que existen distintos diseños de hornos industriales, dependiendo tanto de la industria, como del proceso que se va a llevar a cabo.

De los tipos de hornos que se utilizan para los tratamientos térmicos se ha seleccionado el horno de tipo eléctrico, porque en comparación con el resto, éste presenta ventajas como: menor gasto de instalación, menor superficie ocupada, la limpieza, y gracias a la tecnología se lo puede controlar y regular con facilidad, con

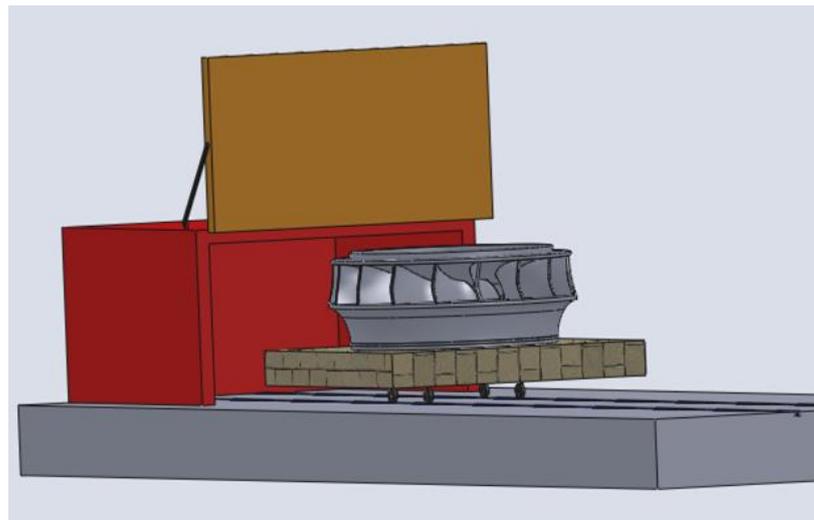
mejor precisión, y lo más importante es la disponibilidad de energía con la que cuenta la Central Hidroeléctrica Agoyán.

Se ha considerado tres formas de diseño.

1. Horno eléctrico de forma cuadrada con solera móvil.
2. Horno eléctrico de forma cuadrada con solera fija.
3. Horno eléctrico de forma cuadrada con tapa superior y solera fija.

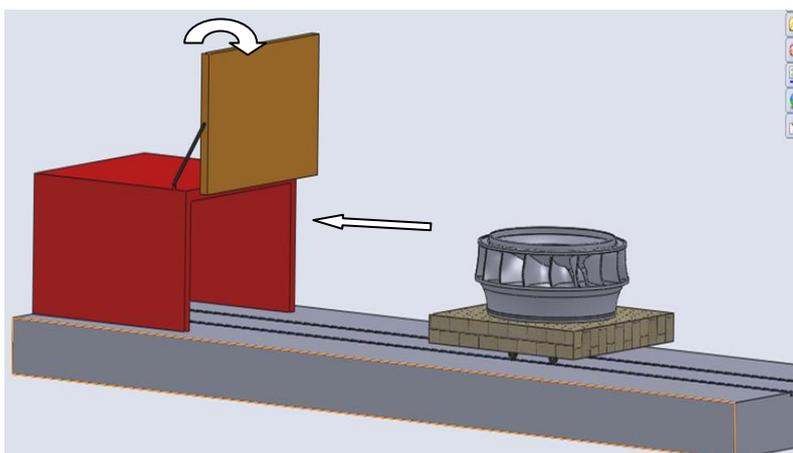
### **2.8.1 Horno eléctrico de forma cuadrada con solera móvil.**

Este diseño considera mantener la mayor parte del horno fijo, es decir techo y paredes, mientras que la solera y la puerta del horno son móviles, como se presenta en la siguiente figura:

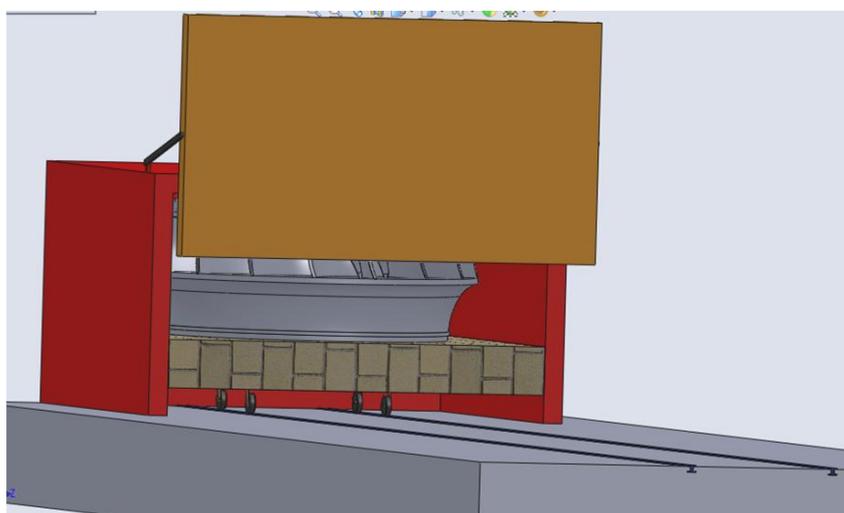


**Figura 27. Horno eléctrico de forma cuadrada con solera móvil.**

Para introducir la carga dentro del horno se debe desplazar la solera a través de rieles que encaminan hacia el interior del mismo, posteriormente se debería cerrar la puerta.



**Figura 28.1. Horno eléctrico de forma cuadrada con solera móvil.**



**Figura 28.2. Horno eléctrico de forma cuadrada con solera móvil.**

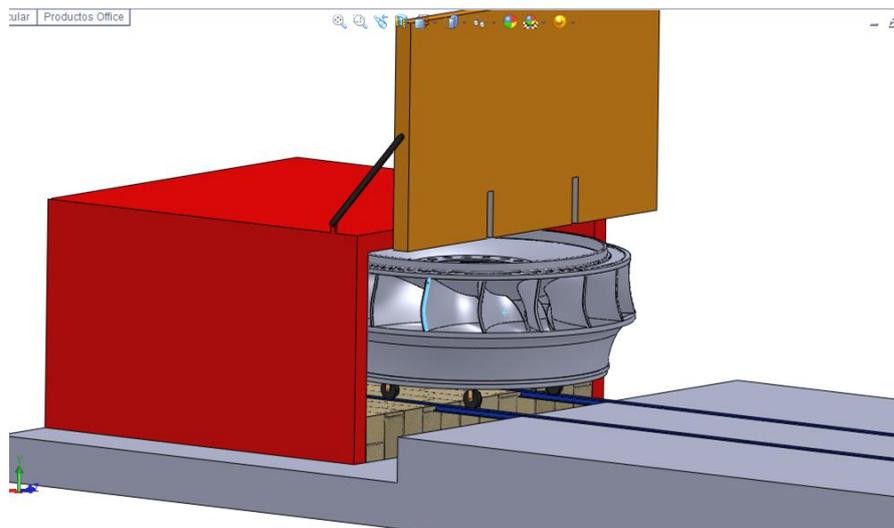
De esta manera cuando se carga el rodete sobre la solera sería de forma segura para no poner en peligro el resto del horno.



**Figura 28. Hornos industriales para tratamientos térmicos con solera móvil.**

Pero el inconveniente de esta forma de diseño es transportar 17 toneladas que es el peso del rodete más el peso de los materiales con los que se construiría la solera.

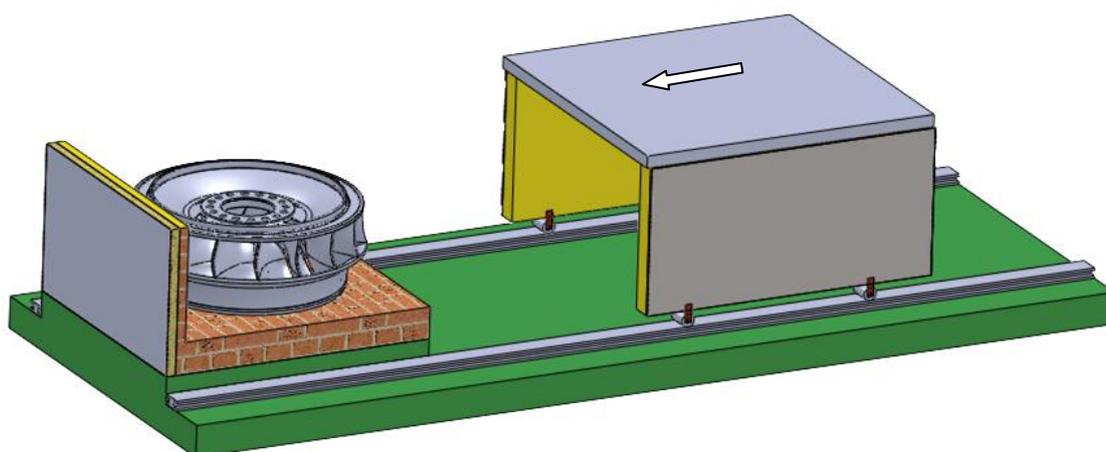
Otra forma de este diseño es mantener la solera fija con paredes y techo del horno, y transportar el rodete sobre un carretón (Fig. 29), pero para mantener buena hermeticidad se necesita que la puerta cierre, para lo cual es indispensable dejar un espacio entre la solera y la grada sobre la cual se encuentra los rieles que conducen a la carga al interior del horno, pero como podemos apreciar en la siguiente figura, una parte de los rieles estarían expuestos al máximo peso de la carga.



**Figura 29. Horno eléctrico con solera móvil.**

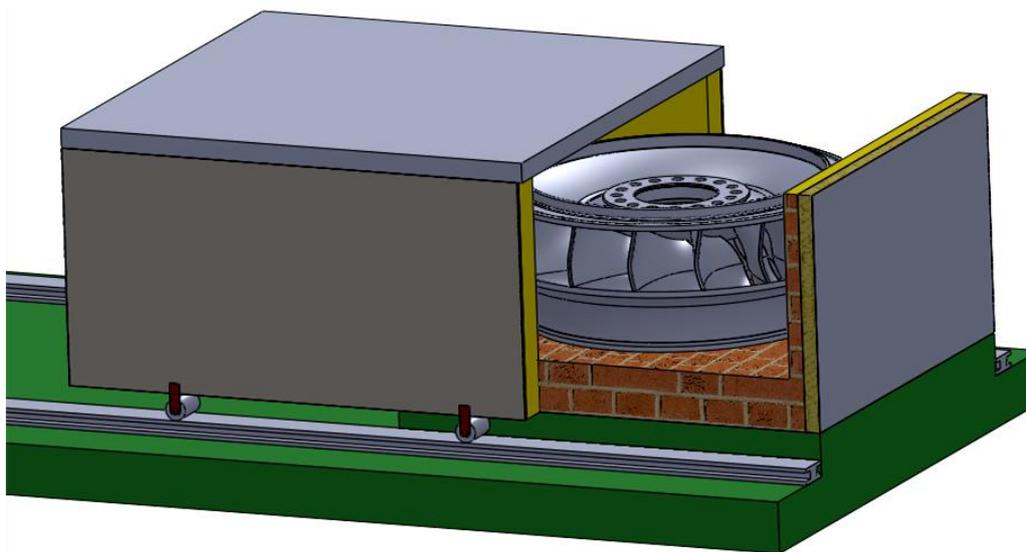
### **2.8.2 Horno eléctrico de forma cuadrada con solera fija.**

La solera y la puerta forman un solo cuerpo y se mantienen fijos; la estructura de paredes y techo formarán un cuerpo móvil que se desplazaría a través de rieles (Figura 30).



**Figura 30. Horno eléctrico de forma cuadrada con solera fija.**

De esta forma se evita transportar más de 17 toneladas de peso y en lugar de ello se transportaría el peso correspondiente a las paredes y techo del horno, que de hecho sería mucho menor.



**Figura 31.1. Horno eléctrico de forma cuadrada con solera fija.**



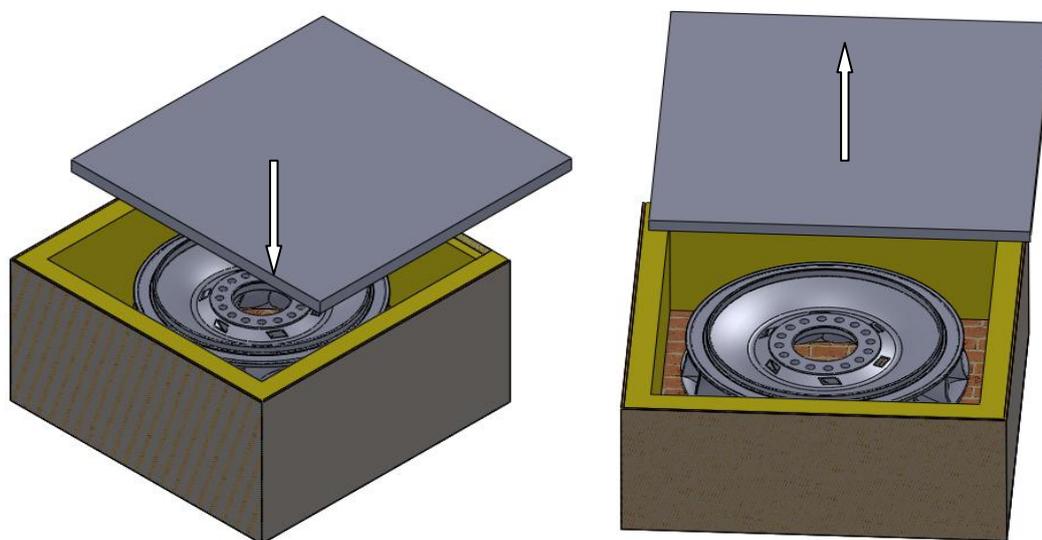
**Figura 31. Tipos de hornos con estructura móvil y vagoneta fija en el suelo.**

Se considera una buena opción esta forma de diseño, pero el inconveniente es que se necesitaría por lo menos un espacio que cubra el doble de la cámara del horno para introducir o sacar el rodete, y es esto justamente lo que debemos

optimizar, porque el diseño del taller donde se ubicará el horno no cuenta con mucho espacio.

### 2.8.3 Horno eléctrico de forma cuadrada con tapa superior y solera fija.

Debido al inconveniente que se mencionó anteriormente, se sugiere hacer un horno de forma cuadrada pero que permita introducir el rodete por la parte superior del horno con la ayuda del puente grúa (Fig. 32), por lo tanto el techo también deberá ser colocado y removido utilizando el puente grúa, de esta forma se optimiza el espacio que ocuparía dentro del taller.



**Figura 32. Horno de forma cuadrada de tapa superior.**

Es por eso que de las formas de diseño planteadas anteriormente se ha seleccionado como mejor alternativa esta última.

## CAPÍTULO III

### 3 DISEÑO TÉRMICO DEL HORNO.

#### 3.1 Parámetros de diseño

En este apartado se presentan los factores básicos a tomar en cuenta a la hora de afrontar el diseño de un horno industrial, así como también los criterios fundamentales para la elección de las principales variables del equipo, factores que especifiquen sus dimensiones y materiales de construcción, siendo importante la temperatura de operación, la misma que por tratarse de un horno intermitente variará a lo largo del tiempo, siguiendo un ciclo de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento sin extraer la carga del interior del horno.

Es por ello que estructurar el diseño básico de los hornos, tanto desde el punto de vista energético como geométrico, se requiere de una vasta tarea.

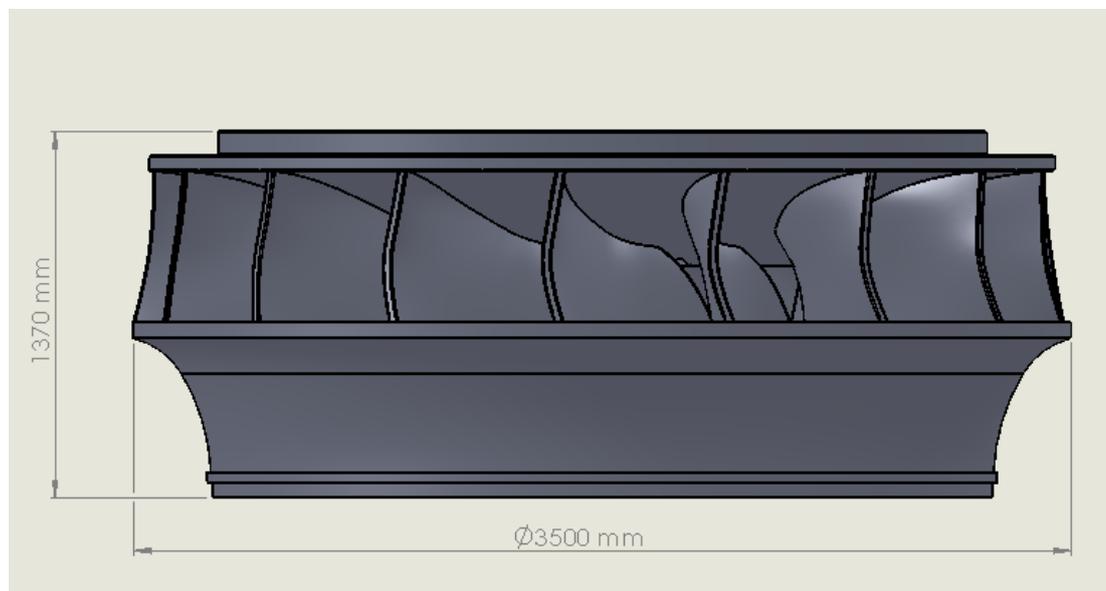
Entre los principales parámetros que se ha considerado para el diseño del horno, están los siguientes:

- Dimensiones internas del horno.
- Temperaturas de diseño
- Selección de materiales para las paredes, puerta y solera del horno
- Cálculo de los espesores para cada uno de los elementos que conforman el horno.

- Calor que se transfiere a través de los elementos que conforman el horno.

### 3.2 Dimensiones internas del horno.

La cámara interna del horno se ha diseñado en función del diámetro máximo del rodete, el mismo que es 3,5 metros y a su altura máxima de 1,370m.



**Figura 33. Dimensiones del rodete.**

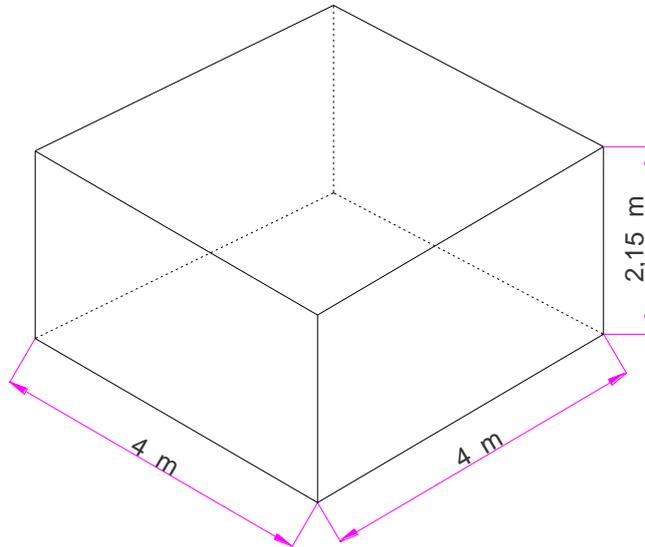
$\varphi_{m\acute{a}x}$  = diámetro máximo del rodete.

$h_{m\acute{a}x}$  = altura máxima del rodete.

$\varphi_{m\acute{a}x} = 3,5 \text{ mm}$

$h_{m\acute{a}x} = 1,37 \text{ m}$

Las medidas de la cámara interna del horno serán de 4m de largo, por 4m de ancho y por 2,15m de altura, ya que hay que considerar una distancia para la base donde se asentará el rodete.



**Figura 34. Medidas internas del Horno.**

Estas medidas dejan una holgura de 25cm, de las paredes con respecto al rodete; y una holgura de 78cm con respecto al techo, sin considerar la base donde se deberá asentar el rodete.

### **3.3 Temperaturas de diseño**

El tratamiento térmico para el rodete, implica altas temperaturas en el interior del horno, no siendo así en su exterior, lo cual exige recubrir el horno con materiales aislantes que garanticen que la temperatura en el exterior del horno sea lo suficientemente baja como para no representar un peligro para el personal que labore en sus cercanías, además una temperatura elevada en el exterior de las

paredes del horno también representaría una pérdida elevada de calor del sistema, es por ello que el recubrimiento con el material aislante es imprescindible.

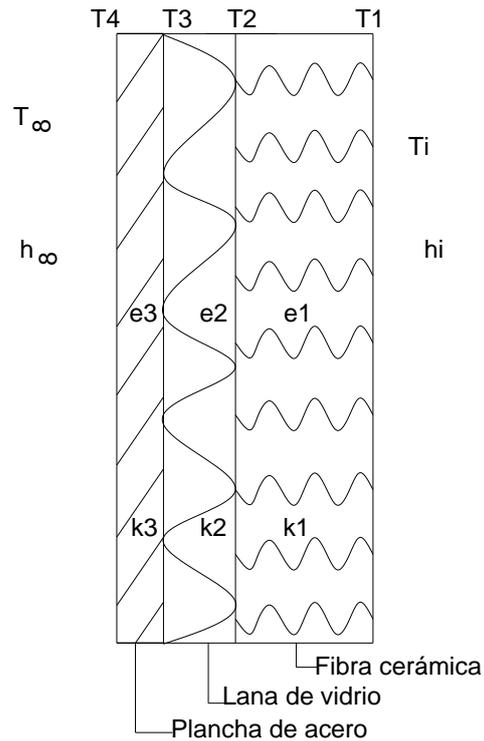
El recubrimiento con aislante supone a su vez un recubrimiento para la protección de este material, por lo tanto se utilizará para este efecto una plancha de acero.

El requerimiento para el tratamiento térmico pos-soldadura del rodete es de mantener a  $585 \pm 5$  °C durante 11 horas y para garantizar que se alcance a esta temperatura por encima de las pérdidas de calor que pudieran existir, se considera que la temperatura de diseño sea de 800 °C.

De acuerdo a la ubicación geográfica donde se encuentra la Central se ha tomado una temperatura ambiente promedio de 18 °C.

Por las razones de seguridad del personal y de eficiencia del horno la temperatura adecuada de la pared exterior debe encontrarse en un rango de 50 a 60 °C.

En la figura 35 se puede apreciar el planteamiento de las temperaturas a las que estaría sometida la pared del horno:



**Figura 35. Representación de los componentes de las paredes del horno.**

Donde:

$T_{\infty}$  = Temperatura exterior del horno en  $^{\circ}\text{C}$ .

$T_i$  = Temperatura interior del horno en  $^{\circ}\text{C}$ .

$T_1$  = Temperatura en la pared interior del horno en  $^{\circ}\text{C}$ .

$T_2$  = Temperatura en la cara caliente de la pared de la lana de vidrio en  $^{\circ}\text{C}$ .

$T_3$  = Temperatura en la cara fría de la pared de la lana de vidrio en  $^{\circ}\text{C}$ .

$T_4$  = Temperatura en la pared exterior del horno en  $^{\circ}\text{C}$ .

$h_{\infty}$  = Coeficiente convectivo del exterior del horno en  $\frac{W}{m^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$

$h_i$  = Coeficiente convectivo del interior del horno en  $\frac{W}{m^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$

$k_1 =$  Coeficiente de conductividad de la fibra cerámica en  $\frac{W}{m^{\circ}C}$

$k_2 =$  Coeficiente de conductividad de la lana de vidrio en  $\frac{W}{m^{\circ}C}$

$k_3 =$  Coeficiente de conductividad de la plancha de acero en  $\frac{W}{m^{\circ}C}$

$e_1 =$  Espesor de la pared de fibra cerámica en m.

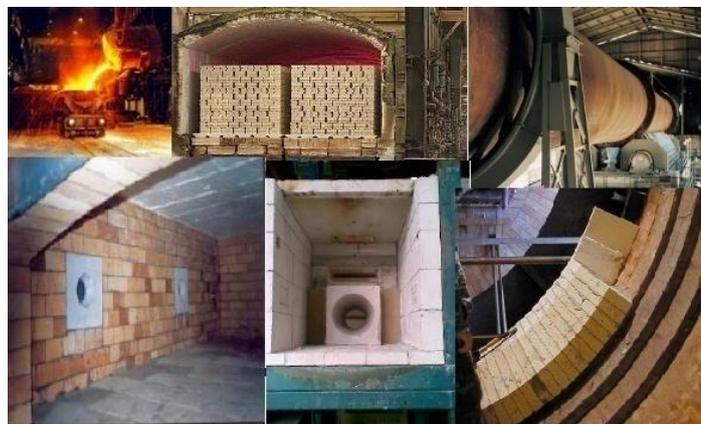
$e_2 =$  Espesor de la pared de la lana de vidrio en m.

$e_3 =$  Espesor de la pared de la plancha de acero en m.

Como ya se dijo anteriormente de la necesidad de poner materiales aislantes a continuación se indica las características de los materiales que conformarán el horno.

### 3.4 Materiales para las paredes, solera y techo del horno.

#### 3.4.1 Refractarios



**Figura 36. Aplicaciones de los refractarios.**

Son refractarios aquellos materiales no metálicos, inorgánicos y de alto punto de fusión, capaces de soportar elevadas temperaturas, manteniendo sus propiedades mecánicas, y químicas sin sufrir alteración, cuya principal característica es la resistencia al calor y son necesarias para aplicaciones de calentamiento por encima de 1000 ° F (538 ° C).

Las condiciones del medio no incluyen únicamente el efecto de la temperatura, sino también la resistencia al ataque por fundidos, al choque térmico y, en general, todas aquellas solicitaciones a las que vaya a estar sometido el material en servicio.

Las condiciones que usualmente deben soportar los materiales refractarios se encuentran clasificadas en tres grupos y hay que tener presente que en la mayoría de los casos dichas solicitaciones pueden actuar de forma simultánea.

**TABLA 8: CONDICIONES QUE DEBEN SOPORTAR LOS MATERIALES REFRACTARIOS.**

<b>TÉRMICAS</b>	<b>MECÁNICAS</b>	<b>QUÍMICAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperaturas elevadas</li> <li>- Cambios bruscos de temperatura (choque térmico)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compresión, Flexión y Tracción</li> <li>- Vibración</li> <li>- Abrasión y Erosión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Productos Fundidos</li> <li>- Ácidos</li> <li>- Gases y vapores</li> <li>- Escorias</li> </ul>

Los refractarios típicos están compuestos por diversas partículas gruesas de óxidos aglutinados con un material refractario más fino. Las características de fusibilidad vienen dadas por su composición y por su estructura física.

#### **3.4.1.1 Características de los materiales refractarios.**

En los ladrillos refractarios, existen dos tipos de ladrillos, el denso que es el refractario y el poroso que es el refractario-aislante. El primero resiste a la temperatura alta, pero ya que transmite el calor, éste se pierde cuando fabricamos el horno solo con este ladrillo, sin embargo este tipo de ladrillo posee alta resistencia mecánica lo que es una ventaja. El ladrillo refractario-aislante-poroso a parte de su alta refractariedad almacena el calor sin transmitirlo al exterior, entonces logra buena eficiencia térmica, pero por ser poroso el material no resiste al peso.

#### **3.4.1.2 Clasificación**

Los dos tipos de ladrillos (refractario-densos y refractario-aislante-poroso) por el componente podemos clasificar en tres tipos que son: silíceo, aluminoso y arcilloso.

##### **Ladrillo silíceo:**

El componente principal de este tipo de ladrillos es el bióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). El componente secundario es arcilla refractaria que normalmente es caolín ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Por la inversión de cuarzo y cristobalita que contienen los ladrillos silícicos, hay que evitar el calentamiento y enfriamiento abrupto durante (200-700) °C. Por arriba de 700 °C tiene buena resistencia al cambio drástico de las temperaturas.

Este tipo de ladrillos generalmente resisten de 1690 °C a 1730 °C.

El ladrillo silícico es menos costoso que los ladrillos altamente aluminoso, pero más caro que los ladrillos arcillosos. Químicamente es ácido.

#### **Ladrillo aluminoso:**

El principal componente del ladrillo aluminoso es alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A un ladrillo que contiene más de 45% de alúmina se reconoce como ladrillo aluminoso.

Los componentes secundarios del ladrillo aluminoso son arcilla refractaria (caolín.  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y sílice ( $\text{SiO}_2$ )

Posee mayor refractariedad que el ladrillo silícico y arcilloso y generalmente resiste a temperaturas de 1770 °C hasta 1920 °C. Por poca dilatación térmica de la alúmina, tiene mayor resistencia al choque térmico que otros ladrillos.

Químicamente es neutro, es decir que difícilmente reacciona con el mortero, por lo tanto es más durable, y con respecto a los demás ladrillos es más costoso.

**Ladrillo arcilloso:**

Su componente principal es arcilla refractaria o caolín ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y el componente secundario es sílice ( $\text{SiO}_2$ ).

En comparación con los ladrillos silícicos, el ladrillo arcilloso presenta mejor resistencia al abrupto cambio de temperaturas, es decir tiene mayor resistencia al choque térmico, no son tan refractarios como los demás ladrillos y resisten temperaturas aproximadamente de 1580 °C a 1750 °C, tienen menor costo y menor resistencia a la carga que los ladrillos silícicos y aluminosos. Químicamente son ácidos [19].

No hay refractarios buenos o malos, hay refractarios bien y mal aplicados; en el mercado existe variedad en su tamaño y forma.

Existen diversos criterios de clasificación de los materiales refractarios, atendiendo a su forma estos se clasifican en:

- Refractarios Conformados
- Refractarios no conformados

**3.4.1.3 Tipos de material refractario**

Los refractarios se dividen en cuatro grupos: ácidos, básicos, neutros y especiales con base en su comportamiento químico.

### **Refractarios Ácidos**

Incluyen las arcillas de sílice, de alúmina y refractarios de arcilla. A veces se utiliza sílice puro para contener metal derretido. Los refractarios de arcilla por lo general son relativamente débiles, pero poco costosos.

### **Refractarios Básicos**

Varios refractarios se basan en el MgO (magnesita o periclasa). El MgO puro tiene un punto de fusión alto, buena refractariedad, buena resistencia al ataque por los entornos que a menudo se encuentran en los procesos de fabricación de acero. Típicamente, los refractarios básicos son más costosos que los refractarios ácidos.

### **Refractarios Neutros**

Normalmente incluyen la cromita y la magnesita, pueden ser utilizados para separar refractarios ácidos de los básicos, impidiendo que uno ataque al otro.

### **Refractarios Especiales**

El carbono, el grafito, es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando operan en atmósfera no oxidante. Estos materiales refractarios incluyen la circonita ( $ZrO_2$ ), el circonita-siliceo ( $ZrO_2 \cdot SiO_2$ ) y una diversidad de nitruros, carburos y boruros [20].

#### **3.4.1.4 Mortero refractario.**

Se usa el mortero refractario para pegar los ladrillos; al igual que los ladrillos puede existir la misma variedad, la preferencia es escoger uno de casi la misma composición química que los ladrillos empleados. Cuando son químicamente diferentes los dos, entre sí pueden acontecer reacciones químicas o se despegan por diferente dilatación durante las quemas.

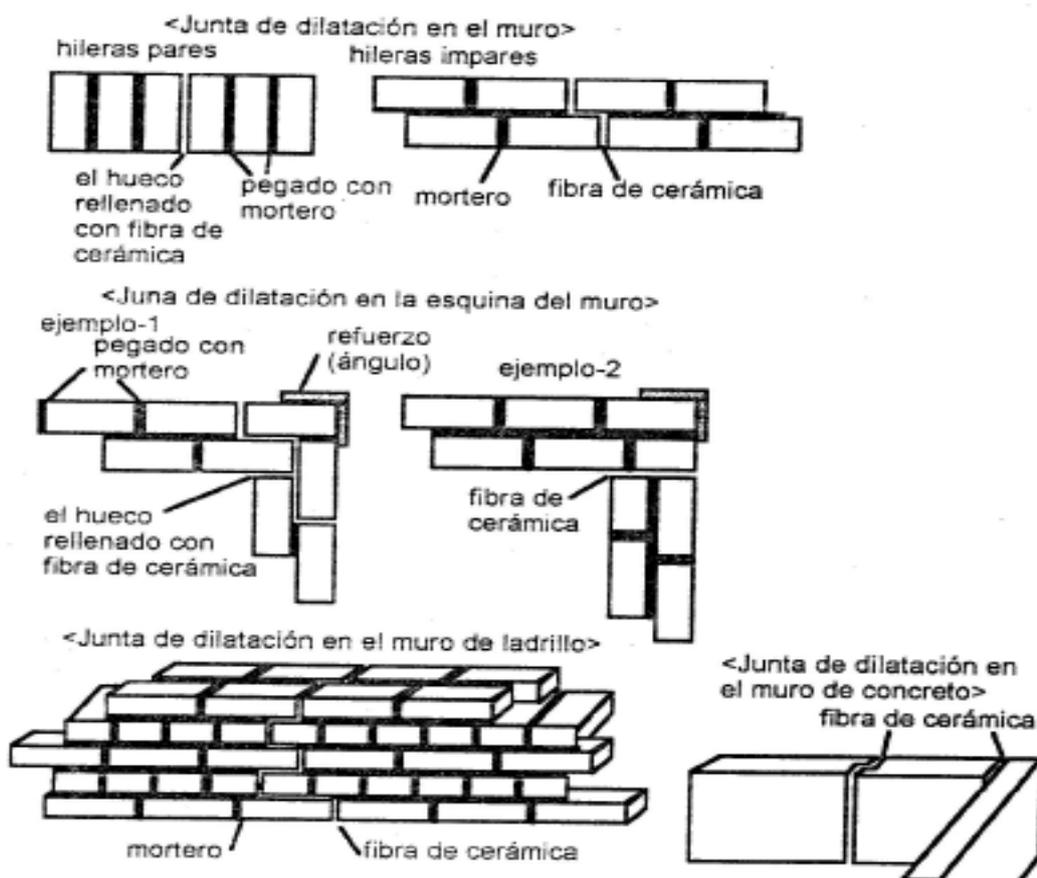
Cuando se pegan los ladrillos, siempre es necesario tener juntas delgadas es decir sin untar mucho mortero ya que este lugar es donde tiene menor fuerza mecánica estructuralmente.

#### **3.4.1.5 Junta de dilatación.**

Al calentar, el horno se dilata repentinamente expandiéndose y al enfriar se contrae, y si no se puede mover en ese momento desarrolla fisuras en los muros.

La junta de dilatación es hueco que intencionalmente se deja en algunos lugares como en los muros y la bóveda con la finalidad de absorber este movimiento, en el caso del horno de ladrillos, se proporciona estos huecos y en lugar de pegar los ladrillos con mortero se los rellena con fibra de cerámica, si es el caso de un horno de concreto, se deja un colchón de fibra de cerámica en la cara que se hace el siguiente vaciado para que cada tramo se quede dividido, la junta de dilatación se hace cada 1,5 metros aproximadamente con un espacio de 5 a 7

milímetros. En los hornos pequeños, si el ancho o altura no mide 1, 5 metros, se deja la junta de dilatación solamente en las esquinas entre el muro lateral y el trasero.



**Figura 37. Junta de dilatación.**

### 3.4.2 Fibra cerámica.

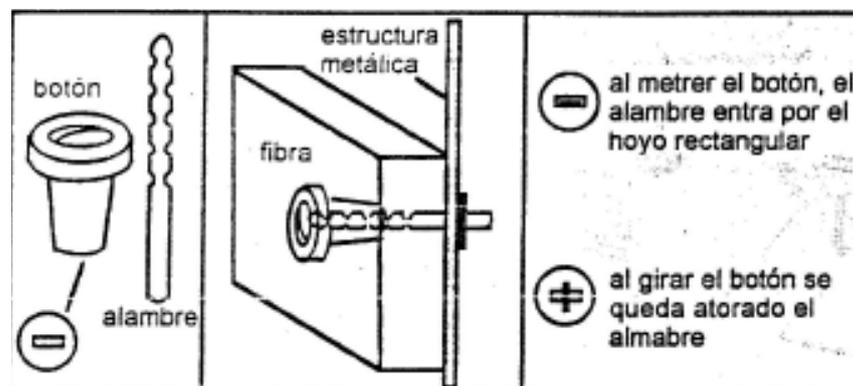
Las fibras refractarias se caracterizan por una densidad muy baja y por tanto una acumulación de calor también muy baja por unidad de volumen del aislamiento. Su resistencia al choque térmico es excelente. La baja conductividad es muy favorable para temperaturas bajas y medias, no tanto para las altas.

Tampoco es muy buena su resistencia mecánica, aunque esto no es determinante en muchos casos.

Permite estructuras aún más ligeras y facilita la fabricación modular y la puesta en servicio más rápida y económica que los hornos construidos con revestimiento en ladrillo refractario ligero.

Existen en forma de placa, colchón, módulo, a granel, pasta, lazo, etc., y ofrece mayor aislamiento que todos los materiales refractarios, por consiguiente se puede tener hornos de muros delgados.

La fibra de cerámica almacena 95% menos calor que el ladrillo refractario denso y 75% menos que el ladrillo refractario-aislante poroso, esto significa que, mientras se tiene un buen material aislante en el lado exterior del muro, el calor regresa al interior del horno sin estar almacenando dentro de la fibra, consecuentemente demuestra mejor efectividad calórica (ahorro de combustible).



**Figura 38. Forma de instalar la fibra cerámica.**

Su instalación se realiza con anclas, que es un alambre refractario de la resistencia kanthal con un botón cerámico.

A parte de la manera de instalación mostrada en la figura 38, existen otros métodos.

Con respecto al costo, del ladrillo varía dependiendo de la clase de ladrillo, mientras que el costo de la fibra de cerámica es de 5 a 20% más elevado que los ladrillos, sin embargo, por muros menos gruesos, se puede compensar el costo de construcción.

Está reportada su persistencia biológica de fibra cerámica cuando uno la inhala, es decir, posiblemente la fibra de cerámica es cancerígena [19].

### **3.4.3 Aislamiento térmico.**

Se define así a aquellos materiales cuya principal característica física es su baja conductividad térmica.

La conductividad térmica es la propiedad más importante en los materiales aislantes ya que revela su capacidad de trasmisión del calor y por lo tanto determina los costos energéticos de muchos procesos.

Un aislante térmico es un material caracterizado por su alta resistencia térmica. Establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura, impidiendo que entre o salga calor del sistema que nos interesa.

Uno de los mejores aislantes térmicos es el vacío, en el que el calor sólo se transmite por radiación, pero debido a la gran dificultad para obtener y mantener condiciones de vacío se emplea en muy pocas ocasiones. Los materiales aislantes, poseen una distribución de poros que contienen aire o gas que constituye el poder aislante del material y una marcada influencia en la conductividad como también en muchos casos en la resistencia mecánica.

En la práctica se utiliza mayoritariamente aire con baja humedad, que impide el paso del calor por conducción, por su baja conductividad térmica, y por radiación, gracias a un bajo coeficiente de absorción.

El aire sí transmite calor por convección, lo que reduce su capacidad de aislamiento. Por esta razón se utilizan como aislamiento térmico materiales porosos o fibrosos, capaces de inmovilizar el aire seco y confinarlo en el interior de celdillas más o menos estancas.

Hay tres tipos de materiales de aislamiento térmico en los que generalmente se pueden clasificar:

- Aislamientos Fibrosos.- Aquellos constituidos por fibras de diámetro muy pequeño, las cuales dividen finamente el espacio de aire.

La mayoría de los aislamientos ampliamente utilizados de este tipo son: fibra de vidrio y lana mineral

-Aislamiento Celular.- Son aislamientos que contienen pequeñas celdas individuales separadas unas de otras.

- Aislamiento Granular.- Este aislamiento tiene pequeños nódulos los cuales contienen espacios vacíos, pero permiten transferir el gas entre ellos. En combinación con un aglutinante y fibras pueden formar un aislamiento rígido [21].

#### **3.4.4 Selección de los materiales aislantes y refractarios para el horno.**

El poder aislante está habitualmente en relación inversa con la temperatura máxima de uso, por esto se utilizan comúnmente construcciones multicapa, permitiendo utilizar materiales de menor conductividad a medida que disminuye la temperatura dentro de la pared del horno.

Es así que el horno constará de paredes conformadas por una capa de fibra cerámica, una capa de lana de vidrio y el revestimiento con chapa metálica.

La primera estará formada por mantas de fibra cerámica (Ceramic Fiber Blanket), seleccionada del catálogo de productos de ERECOS (Empresa de refractarios colombianos s.a.) [22].

#### Descripción:

Manta de fibra cerámica que se compone de largas y flexibles fibras entrelazadas fabricadas a través de un proceso de hilado, manta liviana pero resistente para aplicaciones en un rango de temperaturas de 538 °C a 1260 °C, baja conductividad térmica, muy baja acumulación de calor, resistencia al choque térmico, absorción acústica, alta resistencia a la tracción, reparación rápida, no contiene amianto o asbesto, no contiene aglutinante, no contamina la atmósfera del horno.

#### Usos:

Hornos industriales, reactores, puertas, techos, paredes, chimeneas, juntas, empaques y sellos, recubrimiento sobre refractario para mejorar su eficiencia térmica y otras unidades de procesamiento sujetas a altas temperaturas y como aislante térmico en algunos casos.

#### Especificaciones Técnicas:

- Conductividad Térmica:

De acuerdo a la gráfica temperatura – conductividad y en función de la densidad de este material que nos proporciona el fabricante, se tiene que la

conductividad térmica es de 0,6 Btu-in/h-ft<sup>2</sup> F a una temperatura de 800 °C (Anexo A).

- Color: Blanco
- Densidad: 128 kg/m<sup>3</sup>
- Dimensiones:

**TABLA 9: MEDIDAS DISPONIBLES DE LA MANTA DE FIBRA CERÁMICA.**

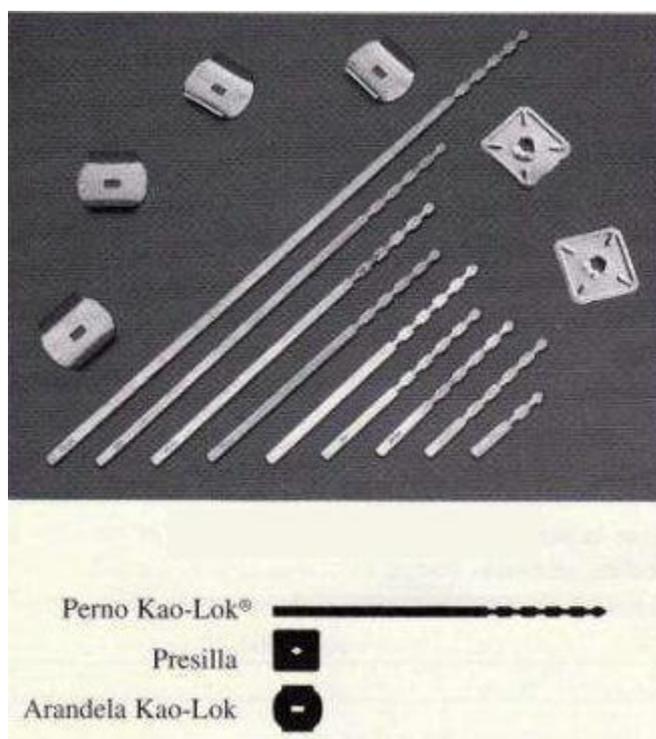
<b>Longitud (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
14640	610/1220	13
7320	610/1220	25
3660	610/1220	50

Para el montaje de las colchonetas de fibra cerámica se presentan las siguientes indicaciones sugeridas por el fabricante (Anexo B).

#### **Arreglo de anclaje.**

El arreglo de anclaje se debe hacer en el interior de la cobertura, asegurándose que el sistema de anclaje este localizado apropiadamente para el revestimiento de la manta. Este arreglo está basado en la capa expuesta o cara caliente de la manta sin considerar ninguna de las capas de respaldo de la manta, puesto que hay que asegurarse que las juntas de las siguientes capas de manta estén escalonadas.

La sujeción del material refractario en las paredes y techo del horno se lo hará con el perno kao-Lok (figura 39), de acero inoxidable 309 que es recomendable para una temperatura del horno de 816 °C, como se indica en la tabla 10.



**Figura 39. Sistema de anclaje.**

**TABLA 10: LÍMITES DE TEMPERATURA DEL PERNO Kao-Lok SUJERIDOS POR LA API.**

Temperatura del horno	304SS	316SS	309SS	310SS	Inconel 601
760 °C	X	X			
816 °C			X		
927 °C				X	
1093 °C					X

El electrodo para soldar el perno kao-Lok a la chapa de acero del revestimiento del horno es el E 312-16, cuya descripción se presenta a continuación [22].

**NORMA**

**CLASIFICACIÓN**

AWS/ ASME: SFA- 5.4

E 312-16

Posiciones para soldar: Todas excepto vertical descendente

Corriente: Alterna o Continua Polo Positivo (+).

Aplicaciones:

Soldadura de aceros al carbono, de baja, media y alta aleación con o sin tratamiento térmico, aceros de composición desconocida, aceros para herramientas de alta sensibilidad al agrietamiento. Recomendable como recargue y unión de materiales sujetos a impacto, fricción, corrosión. Uniones disímiles entre aceros al carbono e inoxidable, puede usarse como capa de transición para depósito de aleaciones contra abrasión. Las aplicaciones más frecuentes están en la reparación de dientes de engranajes, tornillos sinfín, impelentes de bombas, asientos de válvulas, ballestas, herramientas como mandriles para trabajo en caliente, estampas, troqueles y rodillos.

Descripción:

Electrodo que genera un arco suave de fácil encendido y reencendido con escasas salpicaduras, que deposita un cordón de soldadura con contornos suaves de superficie lisa, excelente acabado y fácil remoción de escoria. Las características notables de sus depósitos de soldadura son: alta resistencia a la corrosión, a la

escamación hasta temperaturas de 1100°C, al agrietamiento y a la fluencia térmica (creep) hasta 850°C.

Operación:

Prepare el área de soldadura dejándola libre de polvo, grasa o cualquier contaminante. Conduzca el electrodo con arco corto utilizando el mínimo amperaje posible.

**TABLA 11: PARÁMETROS DE SOLDEO RECOMENDADOS.**

Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Intensidad (Amp)
2.50	250	55 - 70
3.25	350	60 - 100
4.00	350	80 - 130
5.00	350	130 - 190

Composición química: C: 0.10 %, Mn: 1.00 %, Si: 0.80%, Cr: 29.0 %,Ni: 9.0 %

Resistencia a la tracción: 750 N/mm<sup>2</sup> (108.1 Ksi)

Alargamiento (L= 5d): 20%

Resistencia al impacto: No requerida por AWS

### **Construcción con junta a Tope.**

El patrón de separación horizontal en la construcción con junta a tope es 229mm-229mm-140mm. Esto será a través del ancho de la manta. Cuando esté

intersecando otra pared, ajuste la separación para asegurar que la primera hilera de tornillos de la pared adyacente sea de 76mm más el espesor del revestimiento. Mida desde la última hilera de tornillos a la esquina y substraiga 76mm más el espesor del revestimiento. Tome la mitad de la distancia para determinar la localidad de la hilera intermedia, véase las figuras 40 y 41 (Anexo B).

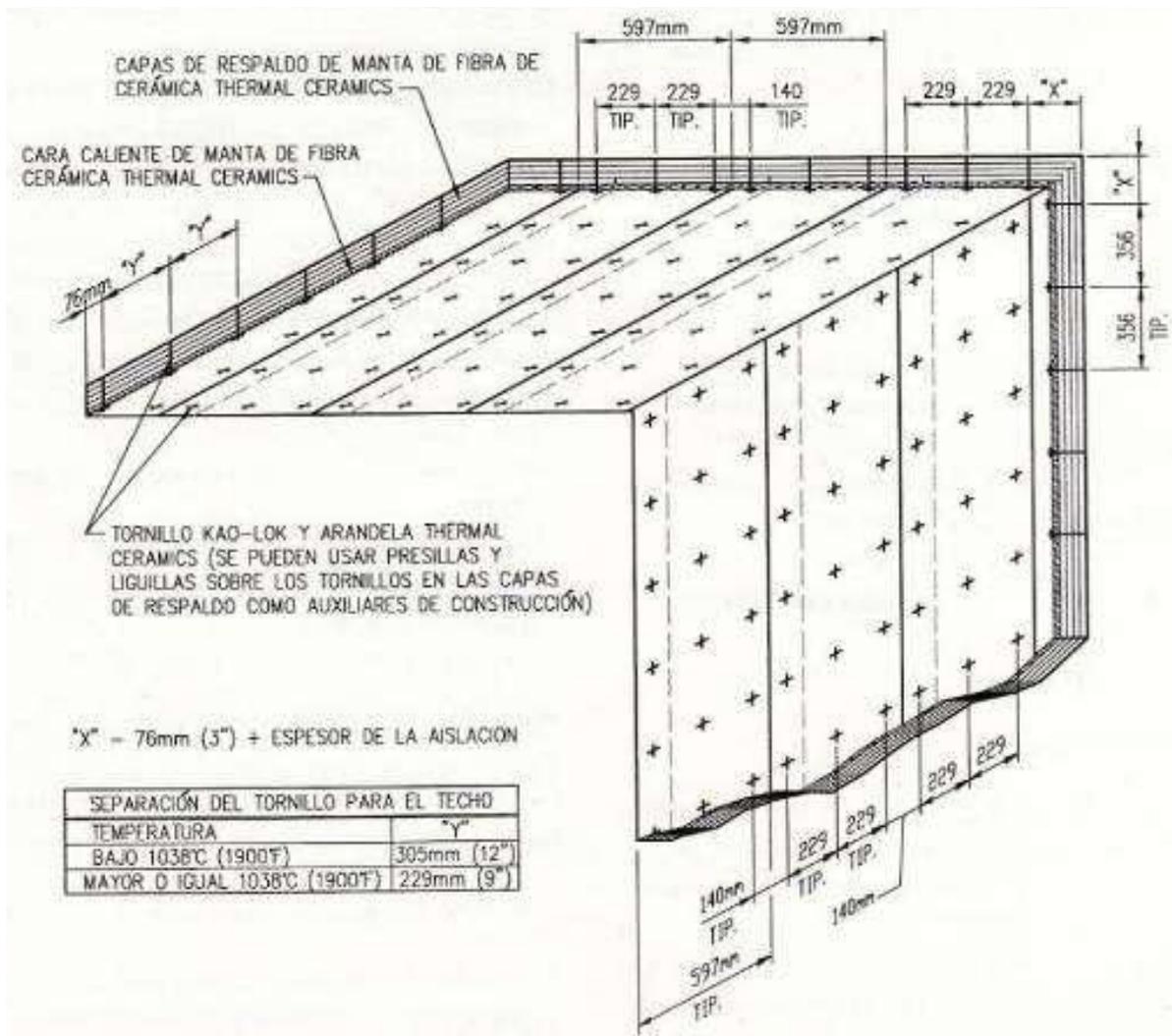
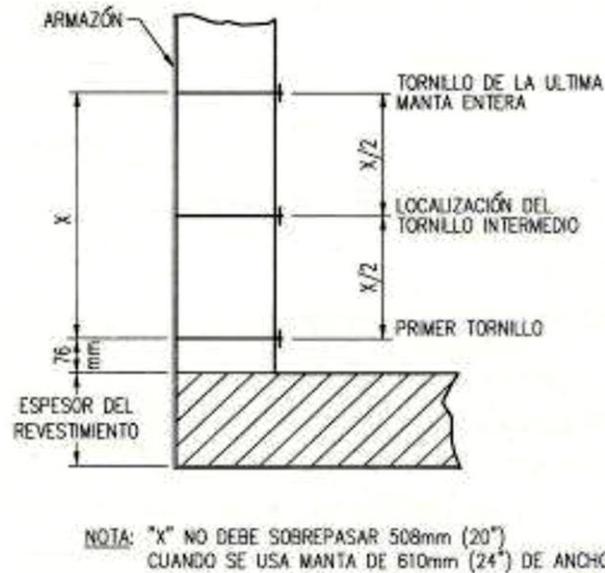


Figura 40. Construcción con Junta a Tope.



**Figura 41. Arreglo vertical de tornillos.**

La segunda capa de las paredes, puerta y techo del horno estará formada por el aislamiento térmico de Lana AW, tomado de los catálogos de FiberGlass Colombia S. A., aislamientos industriales (Anexo C).

Descripción:

La Lana AW de FiberGlass es un aislamiento térmico hecho con lana de fibras de vidrio inorgánicas y elásticas, aglomeradas con resina termo-resistente, su elasticidad garantiza llenar completamente todos los espacios con el aislamiento, asegurando alta eficiencia en el funcionamiento de los equipos, presentada en rollos.

Usos:

La Lana AW está diseñada para ser empleada en aplicaciones como aislamiento térmico de equipos y electrodomésticos que trabajan a temperaturas

hasta de 540°C (1000°F) con el espesor recomendado. Este aislamiento es ampliamente utilizado en sistemas de paneles, recubrimientos flexibles, hornos industriales o superficies irregulares.

#### Beneficios:

- Excelente Funcionamiento Térmico.- La eficiencia térmica de la Lana AW contribuye a reducir las pérdidas de calor y el consumo de combustibles.
- Peso Liviano.- El bajo peso de la fibra de vidrio facilita la instalación y manipulación del aislamiento, incluso cuando se trabaja con grandes cantidades.
- Elasticidad.- Su elasticidad garantiza llenar completamente todos los espacios con el aislamiento asegurándose alta eficiencia en el funcionamiento de los artefactos.
- Rápido y Fácil de Instalar.- Su presentación en rollos permite cubrir grandes áreas rápidamente, eliminando el trabajo tedioso de colocar lámina por lámina.
- Incombustible
- Resiste la vibración sin deformarse
- Inorgánico
- No genera ni acelera la corrosión sobre acero, hierro, cobre o aluminio.
- No absorbe humedad ambiental.

#### Especificaciones Técnicas:

- Conductividad Térmica: 0.039W/m °C, valor típico (0.27 BTU.in/hr.°F.ft<sup>2</sup>).

- Temperatura de aplicación: Máximo 540°C (1000°F).
- Empaque: Bolsas de polietileno
- Unidad: Rollos

Dimensiones:

**TABLA 12: MEDIDAS DISPONIBLES DE LA LANA AW.**

Estándar	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
600" X 48" X 1"	15240	1219	25,4
600" X 48" X 11/2"	15240	1219	38,1
600" X 48" X 2"	15240	1219	50,8

La tercera capa lo conformará el recubrimiento externo del horno, cuyo material corresponderá a la chapa de acero, tomado del catálogo DIPAC Productos de Acero (Anexo D).

Descripción:

El material laminado en frío es sometido a un proceso de recocido en campana y posterior temple mecánico, utilizado por la industria para procesos que no requieren drásticas deformaciones y troquelados.

Usos:

Fabricación de electrodomésticos, tubería soldada, tambores y recipientes de almacenamiento (utilizados en la industria de alimentos y petroquímica), láminas para galvanizar, autopartes, carrocerías, carpintería metálica, fabricación de elementos estructurales y maquinaria en general.

#### Especificaciones Técnicas:

- Norma: ASTM A36.
- Presentación: rollos y planchas
- Espesores: 0,40mm a 1,90m
- Rollos: x 1219mm
- Planchas: 4x8 pies y medidas especiales.

Para la solera el material que se ha seleccionado es el ladrillo refractario aislante UA-20 del catálogo de productos de ERECOS (Empresa de refractarios colombianos s.a.) [23].

Puesto que sobre ellos se ubicará el rodete que tiene un peso de 17 toneladas, se considera como característica principal para su selección su resistencia mecánica (Anexo E, F).

#### Especificaciones Técnicas:

- Clasificación: NTC – 815, ASTM C-155, aislante grupo 20
- Densidad volumétrica: 0,56 – 0,64 (g/cm<sup>3</sup>)
- Resistencia a la compresión en frío: 10 – 16 (kg/cm<sup>2</sup>)
- Módulo de ruptura en frío: 5 – 8 (kg/cm<sup>2</sup>)
- Conductividad térmica: tabla 13.

**TABLA 13: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL LADRILLO REFRACTARIO UA 20.**

Temperatura (°C)	Conductividad (Kcal/m hr °k)
339	0,206
516	0,249
626	0,266

Para ubicar los ladrillos refractarios se necesita un mortero refractario sílico aluminoso Aerofrax, del catálogo de productos de ERECOS (Empresa de refractarios colombianos s.a.); éste se ha seleccionado en base a la similitud de su composición química con respecto al ladrillo refractario UA-20 (Anexo G).

Especificaciones Técnicas:

- Clasificación: NTC – 765, NTC - 851, altamente refractario
- Tipo de mortero: Húmedo de fraguado al aire
- Presentación: Tambores de 35 kg.

Todos los morteros refractarios húmedos de fraguado al aire que ERECOS produce vienen listos para su aplicación con palustre. Basta seguir las siguientes instrucciones:

1.- Mezclar el contenido del tambor hasta obtener una pasta de consistencia uniforme que podrá aplicarse con palustre o llana sobre la superficie del refractario. Retire del tambor sólo la cantidad que vaya a usar para evitar el deterioro del resto.

2.- Si se prefiere utilizar el sistema de inmersión de los ladrillos en el mortero, deberá darse a éste una consistencia más fluida agregando el agua indicada en la tabla técnica para cada mortero.

3.- El tiempo de fraguado es aproximadamente 24 horas pero no debe aplicarse fuego antes de que el mortero esté completamente seco. El calentamiento inicial deberá efectuarse lentamente, a una rata no mayor de 100 °C por hora hasta alcanzar la temperatura de trabajo.

4.- Para evitar el endurecimiento del mortero, manténgase el recipiente bien cerrado. Si el mortero se endurece antes de ser aplicado debe descartarse.

En la construcción de mampostería debe tenerse en cuenta que:

1.- Las juntas horizontales y verticales entre los ladrillos deberán ser mínimas y en ningún caso exceder de 2mm.

2.- La cantidad de mortero necesario para colocar 1000 ladrillos de 9", 4 ½", 2 ½" se indica en la tabla técnica para cada uno [23].

### **3.5 Cálculo de los espesores para cada uno de los elementos que conforman el horno.**

De acuerdo a la analogía entre el flujo de calor y el flujo eléctrico, el ambiente convectivo tanto interno como externo, así como también las paredes planas de la cámara del horno, constituyen las resistencias térmicas del circuito térmico, a través de los cuales el calor fluirá en forma constante porque las resistencias térmicas están en serie.

Conservando el criterio de un flujo uniforme de calor a lo largo del circuito térmico, vamos a analizar cada una de las superficies que constituyen el horno, teniendo en cuenta que este análisis se realiza en estado estable, que por un lado estará expuesto a una fuente de calor que provee un medio de alta temperatura, constante y conocida; por el otro a un medio de baja temperatura, constante y conocida también.

A continuación se realizará un modelo de ecuaciones que regirá para el cálculo de transferencia de calor en las superficies de paredes, techo y solera que constituyen el horno.

Cálculo de los espesores para las paredes del horno:

#### **3.5.1 Espesor de las paredes del horno.**

Datos generales, que se tomarán en consideración en los cálculos posteriores, ver figura 35.

$T_{\infty} = 18^{\circ}C$  Temperatura ambiente de la ciudad de Baños – Agoyán.

$T_i \approx 800^{\circ}C$  Esta temperatura es aproximadamente igual a la temperatura de diseño en la pared del interior del horno.

$T_1 = 800^{\circ}C$

$T_2 = 520^{\circ}C$ . La temperatura máxima de servicio de la lana de vidrio es  $540^{\circ}C$  y por seguridad bajamos  $20^{\circ}C$ .

$T_3 \approx 50^{\circ}C$  Temperatura aproximadamente igual a la temperatura  $T_4$

$T_4 = 50^{\circ}C$  Temperatura segura recomendada para la industria.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h$ , asumida de acuerdo a los valores estimados que presenta Karlekar, para los coeficientes convectivos de transferencia de calor bajo diferentes condiciones (Anexo H) [24].

$$h_{\infty} = 10 \frac{W}{m^2 \text{ } ^{\circ}C}$$

$$h_i = 10 \frac{W}{m^2 \text{ } ^{\circ}C}$$

$$k_3 = 46,12 \frac{kcal}{mh \text{ } ^{\circ}C} = 53,638 \frac{W}{m \text{ } ^{\circ}C}$$

$$k_2 = 0,039 \frac{W}{m \text{ } ^{\circ}C}$$

$$k_1 = 0,0865 \frac{W}{m \text{ } ^{\circ}C}$$

### Cálculo de la pérdida de calor

Éste cálculo se realizó desde la pared externa del horno hacia el ambiente exterior del mismo; la pérdida de calor se calculó partiendo del principio de la transferencia de calor por convección, utilizando la siguiente ecuación:

$$q = h_{\infty} * A_{\infty} (T_4 - T_{\infty}) \quad 3.1$$

Donde:

$q$  = Flujo de calor por convección

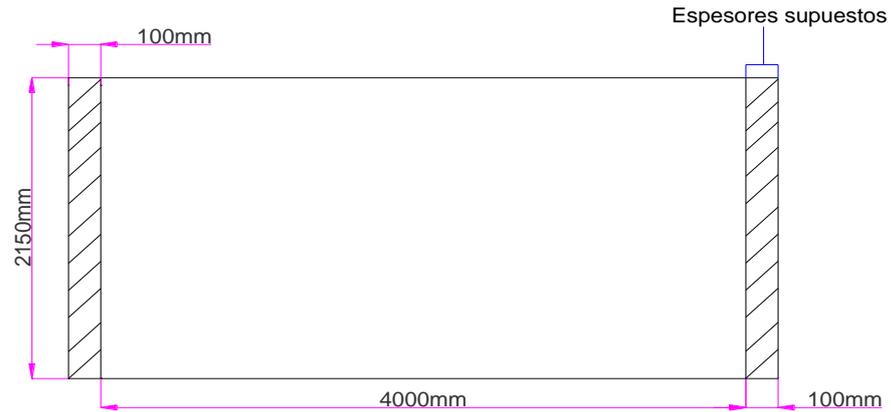
$A_{\infty}$  = Área de la plancha de acero en contacto con el aire exterior.

Por analogía con el flujo de corriente eléctrica se considera resistencia térmica por convección la siguiente relación:

$$R = \frac{1}{h_{\infty} * A_{\infty}} \quad 3.2$$

Para hallar el área de la pared se necesita asumir espesores de los materiales que servirán para el recubrimiento del horno.

Los valores asumidos para el cálculo de ésta área son los representados en la siguiente gráfica:



**Figura 42. Representación del área de la pared.**

Cálculo del área:

$$A_{\infty} = b * h$$

3.3

Reemplazando valores en esta expresión se tiene:

$$A_{\infty} = (0,1 + 0,1 + 4)(2,15) \text{ m}^2$$

$$A_{\infty} = (4,2)(2,15) \text{ m}^2$$

$$A_{\infty} = 9,03 \text{ m}^2$$

Entonces tenemos un calor de:

$$q = h_{\infty} A_{\infty} (T_4 - T_{\infty})$$

$$q = \left( 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right) (9,03 \text{ m}^2) (50 - 18) ^\circ\text{C}$$

$$q = 2889,6 \text{ W}$$

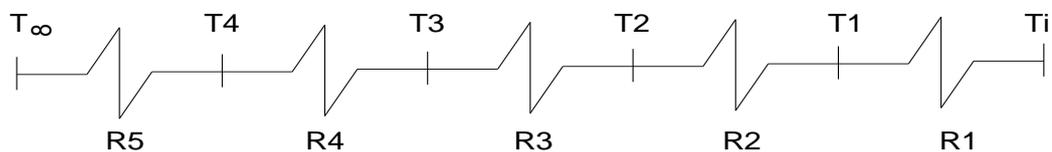
Hay que indicar que los materiales que conforman el horno forman un circuito de resistencias térmicas en serie, por lo tanto el calor que circule a través de ellas será el mismo.

Para calcular el espesor total de la pared posterior, utilizamos la ecuación donde el flujo de calor en el sistema será:

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} \quad 3.4$$

En la sumatoria de las resistencias térmicas se involucran tanto las que se dan por convección como las de conducción, en donde las resistencias térmicas de la transferencia de calor por conducción están dadas por la siguiente expresión:

$$R = \frac{e}{k * A} \quad 3.5$$



**Figura 43. Circuito térmico equivalente de la pared posterior del horno.**

Donde:

$$R_1 = \frac{1}{h_i * A_i} \quad \text{Resistencia térmica por el ambiente convectivo interior}$$

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1 * A_1} \quad \text{Resistencia térmica por conducción en la pared de espesor } e_1$$

$$R_3 = \frac{e_2}{k_2 * A_2} \quad \text{Resistencia térmica por conducción en la pared de espesor } e_2$$

$$R_4 = \frac{e_3}{k_3 * A_3} \quad \text{Resistencia térmica por conducción en la pared de espesor } e_3$$

$$R_5 = \frac{1}{h_\infty * A_\infty} \quad \text{Resistencia térmica por el ambiente convectivo exterior}$$

Para encontrar los espesores de los componentes de la pared del horno se procede a realizar el análisis del flujo de calor por partes, es decir los límites de frontera difieren de pared a pared pero se mantiene el criterio de que el flujo de calor será constante a lo largo del circuito, puesto que está en serie.

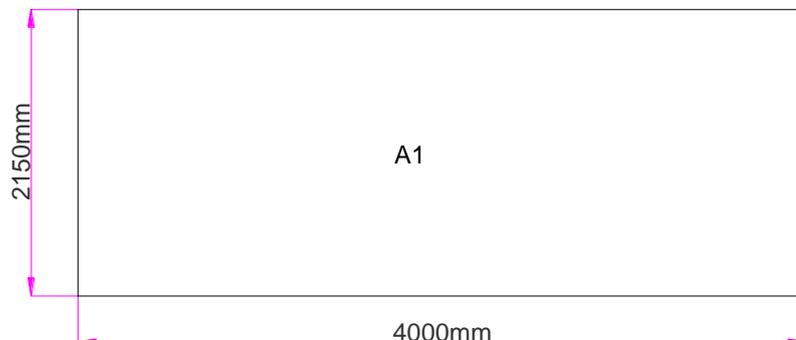
Espesor 1:

El material de la pared es fibra cerámica y sus límites de frontera son  $T_1$  y  $T_2$ , su transferencia de calor por conducción esta dado por la siguiente expresión:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_1}{k_1 * A_1}} = \frac{T_1 - T_2}{R_2}$$

Donde:

$A_1$  = Área de la pared de fibra cerámica



**Figura 44. Superficie de la pared de fibra cerámica.**

$$e_1 = ?$$

$$k_1 = 0,0865 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

$$T_1 = 800^{\circ}C$$

$$T_2 = 520^{\circ}C$$

Se procede a determinar el área de transferencia de calor para la pared:

$$A_1 = (2,15 * 4)m^2$$

$$A_1 = 8,6m^2$$

Como el flujo de calor es el mismo a lo largo del circuito térmico, tenemos:

$$2889,6 = \frac{(800 - 520)^{\circ}C}{\frac{e_1}{0,0865 \frac{W}{m^{\circ}C} 8,6m^2}}$$

$$e_1 = 0,072 m$$

$$e_1 = 7,2 cm$$

Tomando en cuenta que en el mercado existen espesores de fibra cerámica de 13, 25, y 50 mm, y con respecto al valor que se indica en los cálculos se puede unir una plancha de 50mm y una de 25mm para obtener un espesor  $e_1$  de 75mm.

Espesor 2:

El espesor  $e_2$  corresponde al de la lana de vidrio y sus límites de frontera son  $T_3$  y  $T_2$ , su calor está dado por la siguiente expresión:

$$q = \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_2}{k_2 * A_2}} = \frac{T_2 - T_3}{R_3}$$

Donde:

$A_2$  = Área de la pared de lana de vidrio.

$e_2$  = ?

$$k_2 = 0,039 \frac{W}{m \text{ } ^\circ C}$$

$$A_1 = A_2 = 8,6 m^2$$

$$T_2 = 520 \text{ } ^\circ C$$

$$T_3 = 50 \text{ } ^\circ C$$

Como el flujo de calor es el mismo a lo largo del circuito térmico, tenemos:

$$2889,6 = \frac{(520 - 50)^\circ C}{\frac{e_2}{0,039 \frac{W}{m \text{ } ^\circ C} * 8,6 m^2}}$$

$$e_2 = 0,054 m$$

$$e_2 = 5,4 cm$$

Los espesores disponibles para la lana de vidrio AW son: 2,54cm, 3,81cm y 5,08cm. Analizando los valores para  $e_2$  de los cálculos y con respecto a los espesores disponibles en los catálogos, se determina que el espesor más adecuado es el de  $e_2 = 2'' = 5,08cm$ .

Espesor 3:

El espesor  $e_3$  corresponde a la plancha de acero que recubrirá el horno y se ha seleccionado una plancha de acero con 0,2cm de espesor.

Para la pared del horno, se presenta el siguiente resultado:

$$e_1 = 7,5 \text{ cm}$$

$$e_2 = 5,08 \text{ cm}$$

$$e_3 = 0,2 \text{ cm}$$

Por lo tanto el espesor total  $e_T$  para la pared del horno será:

$$e_T = 12,78 \text{ cm}$$

$$e_T = 0,1278 \text{ m}$$

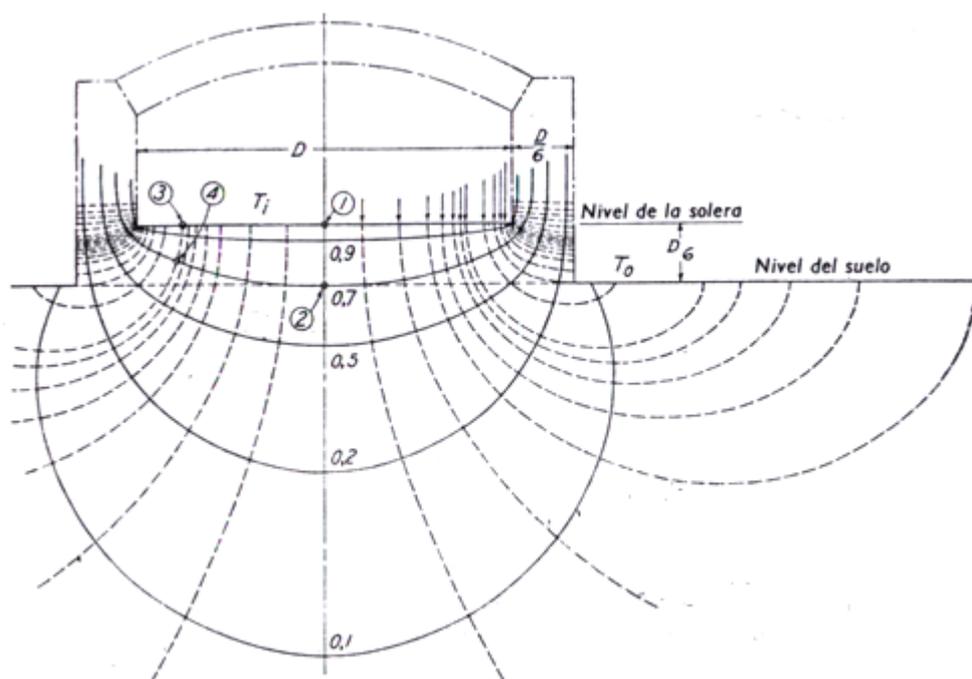
El cálculo precedente corresponde a cada una de las 4 paredes que conformarán la cámara del horno, se ha realizado un solo cálculo porque las paredes son de áreas iguales.

### 3.5.2 Cálculo del espesor de la solera.

De acuerdo con Trinks [16], para grandes hornos que calientan materiales a elevadas temperaturas que superan los 1093 °C utilizan soleras sin ventilar, mientras

que para hornos industriales pequeños y en los hornos grandes de otros tipos se emplean las soleras macizas; en el presente diseño se utilizará una solera de éste último tipo.

En la siguiente figura se observa las isothermas y las líneas de flujo de calor por debajo de la solera.



**Figura 45. Flujo calorífico en la solera y en la cimentación.**

Las líneas continuas son las isothermas y los números sobre ellas indican la fracción correspondiente a la diferencia total de temperaturas  $T_i - T_0$ .

En cuanto a la pérdida total de calor, es proporcional, no a la superficie, sino a la dimensión lineal de la solera, y una vez que se han alcanzado las condiciones de uniformidad en la temperatura la pérdida de calor es: [16] página 141.

$$Q = \frac{S * C * A * (T_i - T_a)}{D} \quad 3.6$$

Donde:

Q= Flujo de calor en  $\left[ \frac{kcal}{h} \right]$

S= Factor de forma, que depende de la geometría de la solera, y se tiene los siguientes valores:

- 4 para soleras circulares
- 4,40 para soleras cuadradas
- Varía para soleras rectangulares entre 4,40 y 3,73 cuando son muy alargadas.

C = conductividad térmica del material de la solera en  $\left[ \frac{kcal}{mh \text{ } ^\circ C} \right]$

A = Superficie de la solera [m<sup>2</sup>]

T<sub>i</sub> = Temperatura interior en <sup>0</sup>C (temperatura de diseño)

T<sub>a</sub> = Temperatura del aire exterior en <sup>0</sup>C

D = Diámetro o ancho mínimo de la solera en [m]

El ladrillo seleccionado para la solera es UA-20 de Erecos.

Pérdida de calor en la solera:

Utilizando la ecuación 3.6.

$$Q = \frac{S * C * A * (T_i - T_a)}{D}$$

Donde:

$$T_i = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$$

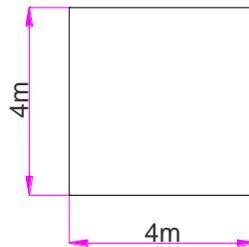
$$T_a = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$D = 4\text{m}$$

Para el área de la solera utilizamos la ecuación 3.3 tenemos:

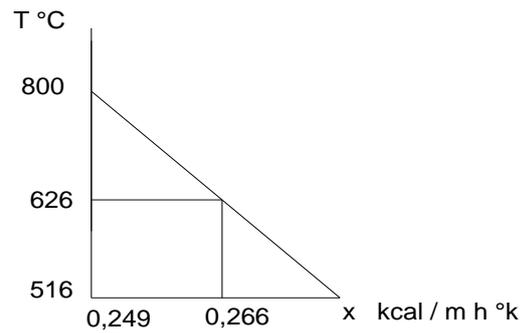
$$A = b * h$$

$$A = (4 * 4)\text{m}^2$$



**Figura 46. Superficie de la solera.**

La conductividad térmica se calcula para  $800 \text{ } ^\circ\text{C}$ , que es la temperatura de diseño y mediante una extrapolación con la ayuda de los valores de la tabla 13.



**Figura 47. Extrapolación para obtener la conductividad térmica.**

Para obtener la conductividad térmica a la temperatura de diseño, se realiza una extrapolación con los datos que nos proporciona el fabricante y representados en la figura anterior.

$$\frac{800 - 516}{x - 0,249} = \frac{626 - 516}{0,266 - 0,249}$$

$$x = 0,292891 \frac{kcal}{mh^{\circ}k}$$

$$x = 0,340632233 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Entonces:

$$C = 0,292891 \frac{kcal}{mh^{\circ}C}$$

Reemplazando valores tenemos:

$$Q = \frac{(4,40) \left( 0,292891 \frac{kcal}{mh^{\circ}C} \right) (16m^2) (800 - 18)^{\circ}C}{4m}$$

$$Q = 4031,12 \frac{kcal}{h}$$

$$Q = 4680,533432 \text{ W}$$

Espesor de la solera  $e_s$ :

Una vez que se ha obtenido el calor que se pierde a través de la solera, se procede a calcular el espesor de la misma, para lo cual se utiliza la ecuación 3.4:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_s}{k_s * A_s}}$$

Donde:

$$e_s = ?$$

$T_1 = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Temperatura de diseño

$T_2 = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ; es la temperatura máxima recomendable para la cimentación, según W. Trinks [16], esta temperatura debería ser de  $480 \text{ }^\circ\text{C}$ , pero se baja hasta  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  utilizando  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  de seguridad.

$$k_s = C = 0,340632233 \frac{W}{m \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$A_s = A = 16 \text{ m}^2$$

Reemplazando valores en la ecuación, tenemos:

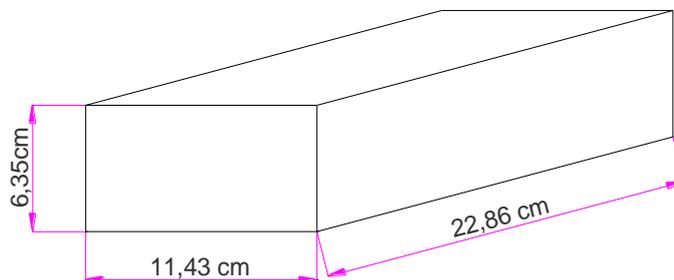
$$4680,533432 = \frac{(800 - 450)^{\circ}C}{\frac{e_s}{0,340632233 \frac{W}{m^{\circ}C} * 16 m^2}}$$

$$e_s = 0,407548m$$

$$e_s = 40,7548 \text{ cm}$$

Resultado:

De acuerdo al espesor que se halló y a las dimensiones que disponen en el mercado, se ha seleccionado el ladrillo con las siguientes dimensiones:



**Figura 48. Medidas del ladrillo refractario.**

Largo 9" = 22,86 cm

Ancho 4,5" = 11,43 cm

Espesor 2,5" = 6,35 cm

Se sabe que para llegar a los 40 cm de espesor de la solera se necesitan 6,29 ladrillos colocados de la forma como se muestra en la figura anterior; pero si se

colocaran sólo 6 ladrillos llegando a tener un espesor de de solera  $e_s = 38,1 \text{ cm} = 0,381\text{m}$ , necesitamos comprobar que con este espesor la temperatura de la cimentación no supere los  $480 \text{ }^\circ\text{C}$  que son recomendables.

Entonces de la ecuación 3.4:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_s}{k_s * A_{s1}}}$$

Despejamos  $T_2$  y sabiendo que el espesor es =  $0,381 \text{ m}$ , tenemos:

$$4680,533432 = \frac{(800 - T_2)^{\circ\text{C}}}{\frac{0,381\text{m}}{0,340632233 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ\text{C}}} * 16\text{m}^2}}$$

$$T_2 = 472,799 \text{ }^\circ\text{C}$$

El valor de  $T_2$  es aceptable ya que no supera a la temperatura de  $480 \text{ }^\circ\text{C}$  que recomienda W. Trinks en la cimentación, por ende el espesor de la solera es el siguiente:

$$e_s = 0,381\text{m}$$

$$e_s = 38,1\text{cm}$$

### 3.5.3 Cálculo del espesor del techo del horno.

Para el cálculo de la pérdida de calor se utiliza la ecuación 3.1.

$$q = h_{\infty} * A_{\infty} (T_4 - T_{\infty})$$

Donde:

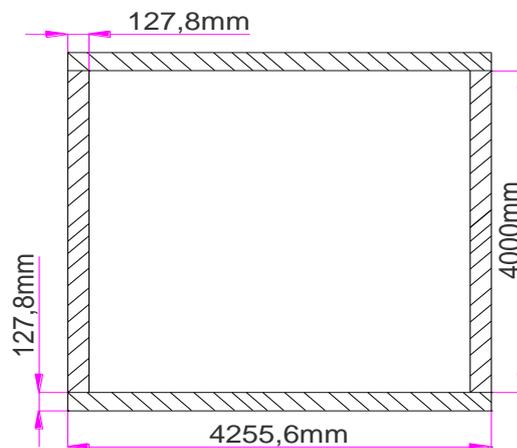
$q$  = Flujo de calor por convección

$A_{\infty}$  = Área de la plancha de acero en contacto con el aire exterior.

$T_4 = 50^{\circ}\text{C}$

$T_{\infty} = 18^{\circ}\text{C}$

El área del techo va en función de las medidas que se han obtenido en los cálculos anteriores y se muestran en la siguiente figura:



**Figura 49. Representación del área del techo del horno.**

Reemplazando valores en la ecuación 3.3 se tiene:

$$A_{\infty} = (0,1278 + 0,1278 + 4)(0,1278 + 0,1278 + 4) \text{ m}^2$$

$$A_{\infty} = (4,2556)(4,2556) \text{ m}^2$$

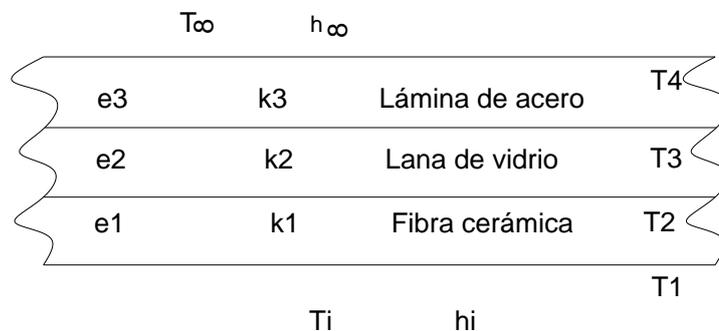
$$A_{\infty} = 18,11 \text{ m}^2$$

Entonces tenemos un calor de:

$$q = \left( 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right) (18,11 \text{ m}^2) (50 - 18) ^\circ\text{C}$$

$$q = 5795,242 \text{ W}$$

Los espesores y temperaturas para el techo del horno se aprecian en la siguiente figura:



**Figura 50. Componentes del techo del horno.**

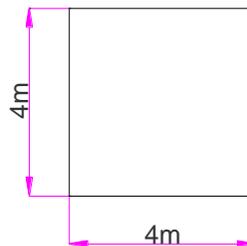
Espesor 1:

El material del espesor  $e_1$  es fibra cerámica y sus límites de frontera son T1 y T2, su calor esta dado por la siguiente expresión:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_2} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_1}{k_1 * A_1}}$$

Donde:

$A_1$  =Área del techo de fibra cerámica en  $m^2$ .



**Figura 51. Superficie de fibra cerámica.**

$$e_1 = ?$$

$$k_1 = 0,0865 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

$$T_1 = 800^{\circ}C$$

$$T_2 = 520^{\circ}C$$

Se procede a determinar el área de transferencia de calor para el techo del horno:

$$A_1 = (4 * 4)m^2$$

$$A_1 = 16m^2$$

Como el flujo de calor es el mismo a lo largo del circuito térmico, tenemos:

$$5795,24 = \frac{(800 - 520)^{\circ}C}{\frac{e_1}{0,0865 \frac{W}{m^{\circ}C} * 16 m^2}}$$

$$e_1 = 0,0668 m$$

$$e_1 = 6,7 cm$$

Con respecto a los espesores que ofrecen en los catálogos, se decide unir paralelamente una plancha de 50mm con una de 25mm que da un total de 7,5cm, por lo tanto el espesor  $e_1$  sería 7,5cm.

Espesor 2:

El espesor  $e_2$  corresponde al de la lana de vidrio y sus límites de frontera son  $T_3$  y  $T_2$ , su calor está dado por la siguiente expresión:

$$q = \frac{T_2 - T_3}{R_3} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_2}{k_2 * A_2}}$$

Donde:

$A_2$  = Área que cubre la lana de vidrio en  $m^2$ .

$e_2 = ?$

$$k_2 = 0,039 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

$$A_1 = A_2 = 16 m^2$$

$$T_2 = 520 \text{ } ^\circ C$$

$$T_3 = 50 \text{ } ^\circ C$$

Como el flujo de calor es el mismo a lo largo del circuito térmico, tenemos:

$$5795,24 = \frac{(520-50)^\circ C}{\frac{e_2}{0,039 \frac{W}{m^\circ C} * 16 m^2}}$$

$$e_2 = 0,0506 \text{ m}$$

$$e_2 = 5,06 \text{ cm}$$

Analizando los valores para  $e_2$  de los cálculos y con respecto a los espesores disponibles en los catálogos, se determina que el espesor más adecuado para la lana de vidrio AW es el de  $e_2 = 5,08 \text{ cm}$ .

Espesor 3:

El espesor  $e_3$  corresponde a la plancha de acero que recubrirá el horno y se ha seleccionado una plancha de acero con 0,2cm de espesor.

Para el techo del horno, se presenta el siguiente resultado:

$$e_1 = 7,5 \text{ cm}$$

$$e_2 = 5,08cm$$

$$e_3 = 0,2cm$$

Por lo tanto el espesor total  $e_T$  para el techo del horno será:

$$e_T = 12,78cm$$

$$e_T = 0,1278 m$$

Los cálculos anteriores se han obtenido luego de algunos refinamientos utilizando el mismo modelo matemático anterior para los espesores correctos de cada uno de los componentes del horno.

La siguiente tabla presenta un resumen de resultados obtenidos:

**TABLA 14: RESUMEN DE RESULTADOS.**

	Pérdida de calor	Fibra cerámica	Lana de vidrio	Lámina de acero	Espesor total
Unidades	q[W]	$e_1$ [cm]	$e_2$ [cm]	$e_3$ [cm]	$e_T$ [cm]
Paredes del horno	2889,6	7,5	5,08	0,2	12,78
Solera	4680,53	-	-	-	38,1
Techo	5795,24	7,5	5,08	0,2	12,78

Ahora se debe comprobar que con los espesores calculados y mostrados en la tabla 14, permitan que las temperaturas en cada uno de los componentes no excedan de los límites establecidos por los fabricantes.

### Fibra cerámica en el horno.

A continuación se presenta el cálculo de la temperatura  $T_2$  a la que debe llegar la pared de fibra cerámica cuyo espesor corresponde a  $e_1$ , la misma que debe ser menor o igual a  $540\text{ }^{\circ}\text{C}$  puesto que es también la temperatura máxima de servicio de la lana de vidrio.

Paredes del horno.

En la ecuación 3.4 se reemplazan estos valores y tenemos:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_1}{k_1 * A_1}}$$

$$2889,6 = \frac{(800 - T_2)^{\circ}\text{C}}{\frac{0,075\text{m}}{0,0865 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} * 8,6\text{m}^2}}$$

$$T_2 = 508,794\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Esta temperatura indica que el espesor  $e_1 = 0,075\text{m}$  es aceptable ya que  $T_2$  no supera los  $540\text{ }^{\circ}\text{C}$  de temperatura máxima de resistencia de la lana de vidrio que se muestra en el catálogo (Anexo C).

Techo del horno.

En la ecuación 3.4, con el espesor de  $e_1 = 0,75\text{m}$ , tenemos:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_1}{k_1 * A_1}}$$

$$5795,24 = \frac{(800 - T_2)^{\circ\text{C}}}{\frac{0,075\text{m}}{0,0865 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ\text{C}}} * 16\text{m}^2}}$$

$$T_2 = 486,085^{\circ\text{C}}$$

Esta temperatura indica que el espesor  $e_1 = 0,075\text{m}$  para el techo es aceptable ya que  $T_2$  no supera los  $540^{\circ\text{C}}$  de temperatura máxima de resistencia de la lana de vidrio que se muestra en el catálogo.

### **Lana de vidrio.**

Se debe asegurar que la temperatura  $T_3$  correspondiente a la cara de menos temperatura de la lana de vidrio, no supere al valor de  $50^{\circ\text{C}}$  que se recomienda para la industria.

### **Paredes del horno.**

Se reemplaza valores en la ecuación 3.4 y tenemos:

$$q = \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_2}{k_2 * A_2}}$$

$$2889,6 = \frac{(520 - T_3)^{\circ}C}{\frac{0,039 \frac{W}{m^{\circ}C} * 8,6 m^2}{0,0508 m}}$$

$$T_3 = 82,33^{\circ}C$$

Hay que recordar que el horno realmente no va a estar trabajando a 800 °C, de hecho la temperatura real del horno será 5% más que la temperatura máxima del tratamiento térmico (590 °C), pero si suponemos que la temperatura del horno alcanza a una temperatura de 700 °C, entonces la temperatura T<sub>2</sub> sería de 408,794 °C y T<sub>3</sub> sería de -28,87 °C, que en realidad no sucedería, pero lo que se asegura sería una temperatura razonable y no mayor a la que es permisible en la industria (50-60 °C), en todo caso la temperatura T<sub>3</sub> sería aproximadamente la temperatura ambiente.

### **Techo del horno.**

De la ecuación 3.4 se despeja T<sub>3</sub> y tenemos:

$$q = \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_2}{k_2 * A_2}}$$

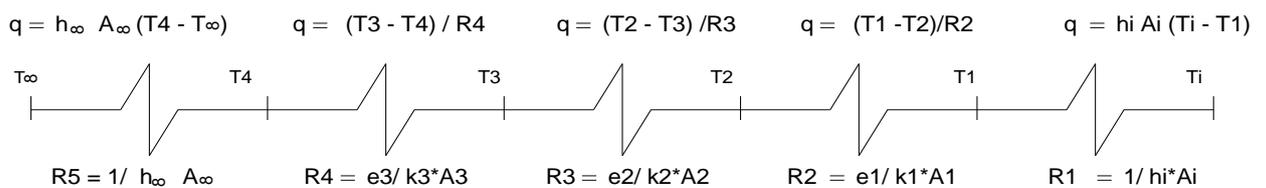
$$5795,24 = \frac{(520 - T_3)^{\circ}C}{\frac{0,039 \frac{W}{m^{\circ}C} * 16 m^2}{0,0508 m}}$$

$$T_3 = 48,2^{\circ}C$$

En el techo la temperatura  $T_3$  es aceptable para este diseño.

### Calor en las paredes, techo y solera del horno

Debido a que el flujo de calor es constante en un circuito térmico con resistencias en serie, el calor que se pierde por convección desde la pared exterior hacia el ambiente exterior del horno, e indicado en la tabla 14 debe ser igual al calor que se pierde desde el ambiente interior del horno hasta el ambiente exterior del mismo, como se indica en la figura 52.



**Figura 52. Circuito térmico de las paredes y techo del horno.**

Se espera cumplir con este criterio por lo que con los espesores seleccionados se va a calcular a continuación dicho calor.

### Calor en las paredes del horno.

Partiendo de la ecuación 3.4 y tomando en cuenta el circuito de la figura 52, tenemos que:

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}$$

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{\sum R}$$

Donde:

$$T_i \approx T_1 = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_1 = \frac{1}{h_i * A_i} = \frac{1}{\left(10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}\right) (8,6 \text{ m}^2)} = 0,011 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1 * A_1} = \frac{0,075 \text{ m}}{\left(0,0865 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}\right) (8,6 \text{ m}^2)} = 0,10 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_3 = \frac{e_2}{k_2 * A_2} = \frac{0,0508 \text{ m}}{\left(0,039 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}\right) (8,6 \text{ m}^2)} = 0,151 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_4 = \frac{e_3}{k_3 * A_3} = \frac{0,002 \text{ m}}{\left(53,63756 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}\right) (9,149 \text{ m}^2)} = 4 \times 10^{-6} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_5 = \frac{1}{h_\infty * A_\infty} = \frac{1}{\left(10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}\right) (9,149 \text{ m}^2)} = 0,01 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$\sum R = (0,011 + 0,10 + 0,151 + 4 \times 10^{-6} + 0,01) \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} = 0,274 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Al reemplazar valores tenemos:

$$q = \frac{(800 - 18) \text{ } ^\circ\text{C}}{0,274 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}}$$

$$q = 2845,7 \text{ W}$$

Hay que tomar en cuenta que el calor calculado anteriormente representa a una de las paredes del horno, considerando que las cuatro paredes del horno son iguales, entonces el calor es igual para el resto de paredes también.

### Calor en el techo del horno.

Partiendo de la ecuación 3.4 y tomando en cuenta el circuito de la figura 52, tenemos:

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}$$

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{\sum R}$$

Donde:

$$T_i \approx T_1 = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_1 = \frac{1}{h_i * A_i} = \frac{1}{\left(10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}\right) (16 \text{ m}^2)} = 0,00625 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1 * A_1} = \frac{0,075 \text{ m}}{\left(0,0865 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}\right) (16 \text{ m}^2)} = 0,054 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_3 = \frac{e_2}{k_2 * A_2} = \frac{0,0508 \text{ m}}{\left(0,039 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}\right) (16 \text{ m}^2)} = 0,081 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_4 = \frac{e_3}{k_3 * A_3} = \frac{0,002 \text{ m}}{\left(53,63756 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}\right) (18,11 \text{ m}^2)} = 2 \times 10^{-6} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_5 = \frac{1}{h_{\infty} * A_{\infty}} = \frac{1}{\left(10 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}\right) (18.11 m^2)} = 0,005 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$\sum R = (0,00625 + 0,054 + 0,081 + 2 \times 10^{-6} + 0,005) \frac{^{\circ}C}{W} = 0,147 \frac{^{\circ}C}{W}$$

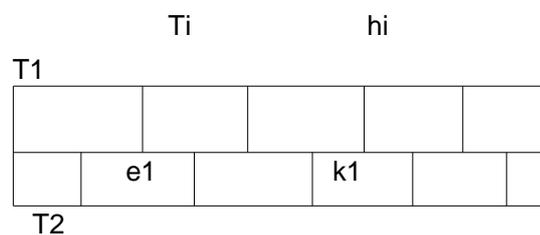
Al reemplazar valores tenemos:

$$q = \frac{(800 - 18) ^{\circ}C}{0,147 \frac{^{\circ}C}{W}}$$

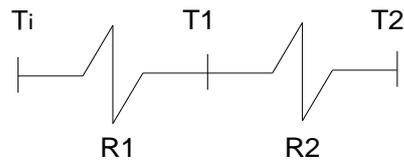
$$q = 5307,03 W$$

### Calor en la Solera del horno.

Partiendo de la ecuación 3.4 y tomando en cuenta el siguiente circuito térmico, tenemos:



**Figura 53 . Representación del material de la solera.**



**Figura 54. Circuito térmico de la solera.**

$$q = \frac{T_i - T_2}{R_1 + R_2}$$

$$q = \frac{T_i - T_2}{\sum R}$$

Donde:

$$T_i \approx T_1 = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 472,799 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_1 = \frac{1}{h_i * A_i} = \frac{1}{\left(10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}\right) (16 \text{ m}^2)} = 0,00625 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1 * A_1} = \frac{0,381 \text{ m}}{\left(0,340632233 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}\right) (16 \text{ m}^2)} = 0,069 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$\sum R = (0,00625 + 0,069) \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} = 0,076 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Al reemplazar valores tenemos:

$$q = \frac{(800 - 472,799) \text{ } ^\circ\text{C}}{0,076 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}}$$

$$q = 4296,41 \text{ W}$$

Se puede apreciar los resultados de los cálculos precedentes y hacer una comparación con los valores de la tabla 14, y vemos que los valores no se disparan exageradamente y que para fines de cálculo son aceptables.

### **3.6 Simulación térmica de la pared del horno en un software.**

Con este análisis se pretende simular el comportamiento de la fibra cerámica y la lana de vidrio frente a la curva de temperatura del tratamiento térmico.

#### **Resultados.**

En la figura 55 se muestra el código de colores que representa las temperaturas que estarán presentes en la pared del horno, siendo el color rojo el que representa la temperatura más alta (pared interna del horno) y el color azul representa la temperatura más baja (pared externa del horno); la temperatura máxima en la cara externa de la pared del horno según el software será de 35 °C, su curva con respecto al tiempo se representa en la figura 56, la cual nos revela una mejor idea de cómo se comporta esta cara de la pared a lo largo del proceso.

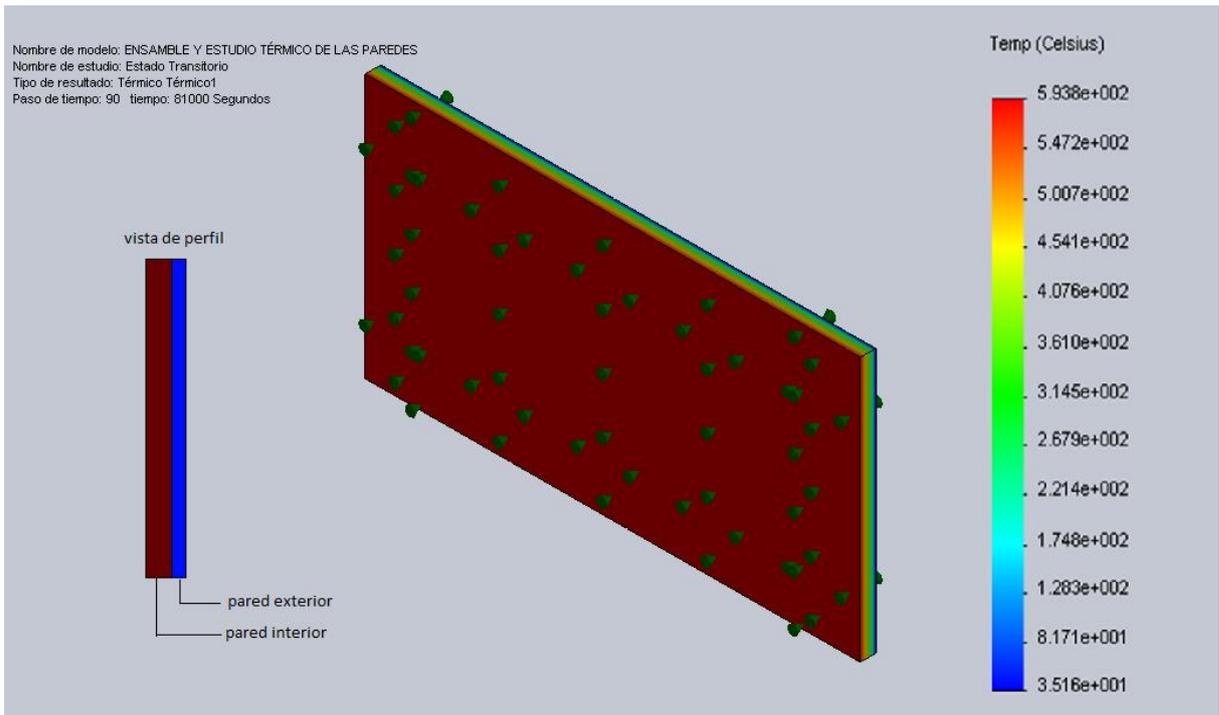
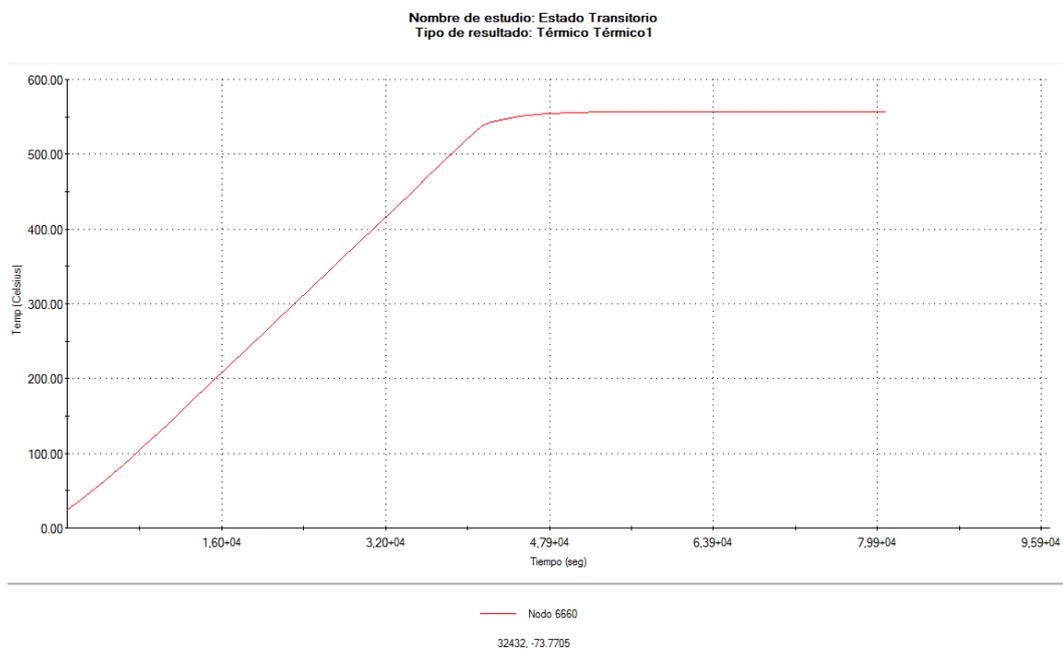
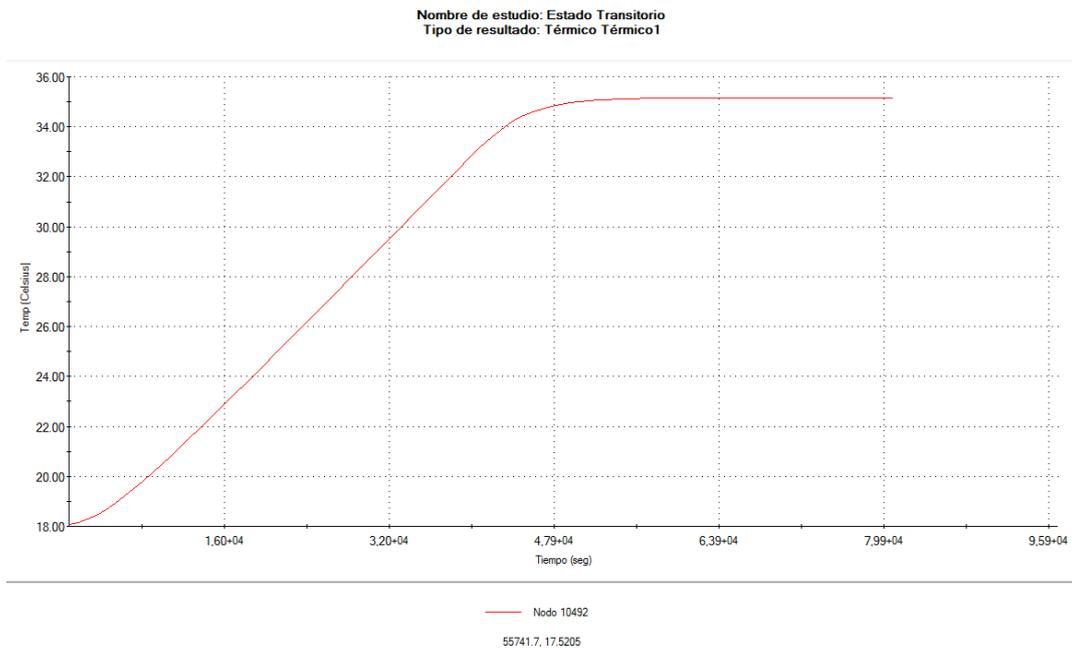


Figura 55. Resultados del análisis térmico de la pared del horno.





**Figura 56. Curva de calentamiento de la pared interna y externa respectivamente.**

Tanto la fibra cerámica como la lana de vidrio con sus espesores ya señalados en la tabla 14 y de acuerdo al análisis realizado, son adecuadas y por lo tanto aceptables para este diseño.

### **3.7 Calor perdido en el horno.**

#### **3.7.1 Calor que se transfiere a través de los elementos que conforman el horno.**

Ahora que ya se ha obtenido los calores que atraviesan las paredes, techo y solera del horno, se puede calcular la pérdida del calor total.

Entonces se tiene la siguiente expresión:

$$Q_t = \sum q \quad 3.7$$

Donde:

$Q_t$  = Es el valor total de la suma del flujo de calor en las paredes, techo y solera del horno en W.

$q$  = Flujo de calor en las paredes, techo y solera del horno en W.

$$\sum q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$$

Donde:

$q_1$  = Flujo de calor que se pierde en una de las paredes del horno, y como se sabe que las cuatro paredes son iguales, entonces  $q_1 = q_2 = q_3 = q_4$ .

$q_5$  = Flujo de calor que se pierde en el techo del horno

$q_6$  = Flujo de calor que se pierde en la solera del horno

$$\sum q = (2845,7 + 2845,7 + 2845,7 + 2845,7 + 5307,03 + 4296,41) W$$

$$\sum q = 20986,24 W$$

Reemplazando valores tenemos:

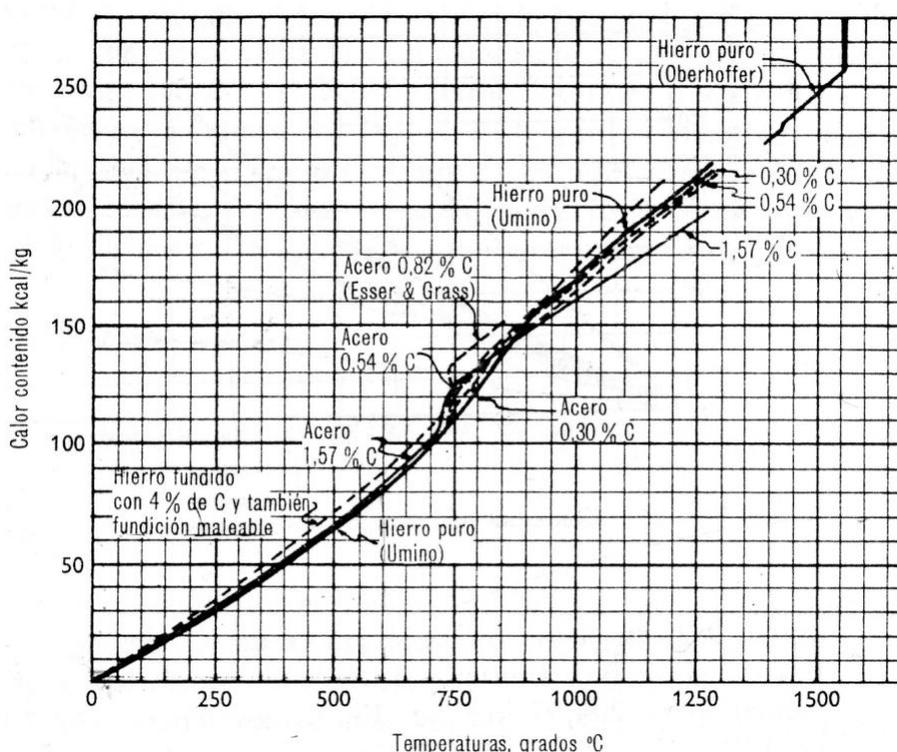
$$Q_t = 20986,24 W$$

$$Q_t = 20,98 kW$$

### 3.7.2 Calor necesario para el calentamiento del rodete [16].

Para calentar piezas en un horno hay que liberar calor, transmitir el calor en el material y distribuirse finalmente en la carga, cumpliendo especificaciones de la ingeniería metalúrgica, las mismas que abarcan la temperatura final de la carga, la uniformidad de temperatura en la misma y el tiempo a temperatura.

La adición de pequeñas cantidades de elementos de aleación, tales como níquel, cromo o magnesio cambia muy poco el contenido calorífico específico del acero.



**Figura 57. Efecto del porcentaje de carbono sobre el contenido de calor del hierro y el acero.**

El calor contenido del hierro y acero puede obtenerse de las curvas que muestra la figura 57, según los resultados experimentales de diversos investigadores [16] páginas 30, 32- 40.

En la gran mayoría de los procesos de calentamiento, el calor penetra en la carga a través de su superficie y fluye desde allí hacia el interior de la pieza o de la carga. El flujo calorífico requiere una diferencia de temperatura en la pieza.

Pero, al calentarse una carga, la transmisión del calor raramente es paralela y nunca permanente. Es transitoria, lo que significa que la temperatura en un punto dado de la carga cambia con el tiempo.

Con una gran velocidad de calentamiento la temperatura en el acero está muy lejos de ser uniforme cuando se alcanza la temperatura final, lo que es consecuencia directa de la diferencia en la conductividad térmica de estos metales.

La conductividad térmica varía en función de la temperatura, se aprecia en las figuras 58 y 59. Esta última revela un hecho peculiar: la conductividad térmica de los metales puros desciende al elevar la temperatura, mientras que la conductividad térmica de las aleaciones aumenta con la temperatura.

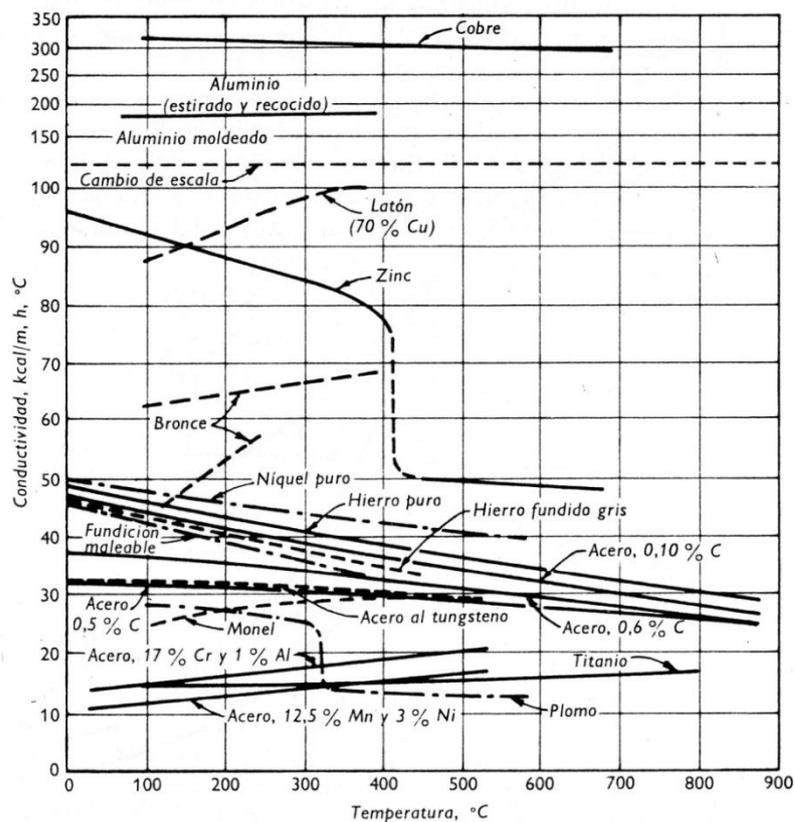


Figura 58. Conductividad térmica de los metales.

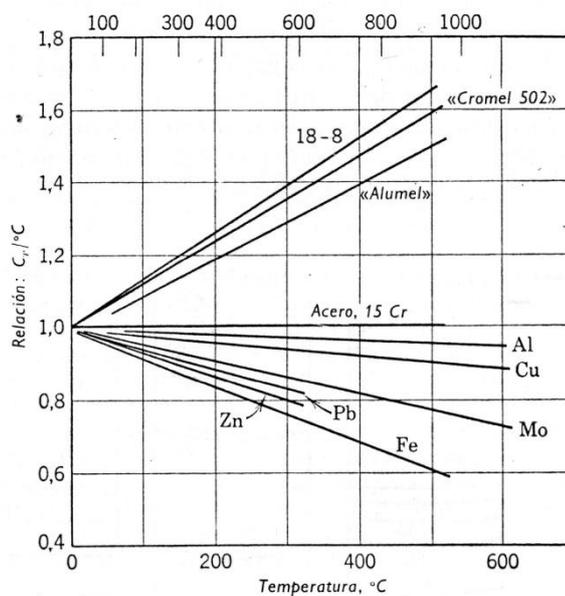
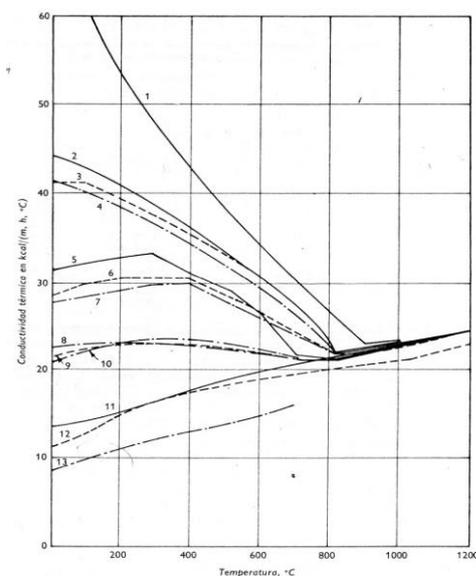


Figura 59. Relación de las conductividades térmicas a una temperatura cualquiera y a la temperatura de congelación del agua (0 °C).

Al variar la temperatura, los aceros exhiben unas variaciones sorprendentemente grandes en la conductividad. Se comprueba esta afirmación por medio de la figura 60. La conductividad térmica del acero número 1 es seis veces mayor que la del acero número 13. Esta gran variabilidad hace imposible el cálculo exacto de las temperaturas transitorias [16] páginas 30, 32- 40.



**Figura 60. Conductividad térmica de las aleaciones férricas.**

En términos generales la transmisión de calor a la carga determina la capacidad de calentamiento del material delgado, mientras que la igualación de temperaturas dentro de la carga determina la capacidad de calentamiento para cargas de fuerte espesor, que posean baja conductividad térmica.

El calor que ha de impartirse a la carga es igual al producto del peso de la carga por la elevación de temperatura y por el calor específico medio de la carga, es decir:

$$Q_r = m * c_p * \Delta T$$

En hornos de temperaturas bajas comprendidas entre 426 °C y 649 °C, se cumple con cierta aproximación este requisito, ya que la transmisión de calor por convección constituye el principal factor a estas temperaturas bajas.

Para un horno discontinuo o de carga por lotes, las temperaturas del ambiente interior y del refractario se deben seleccionar considerando que la carga no se estropee debido a un recalentamiento si permanece por un tiempo anormalmente largo en el horno, es por ello que la temperatura del ambiente interior del horno es un 5% más elevada que la temperatura final prescrita de la superficie de la carga, el exceso de temperatura puede ser mayor si un sobrecalentamiento ocasional no causa serios desperfectos a la carga, en este caso en lugar del 5% puede aumentarse a un 8% [16] página 71.

### 3.7.2.1 Cálculo del calor para calentar el rodete.

Tomando en cuenta el apartado anterior, el calor necesario para calentar el rodete del presente horno se calcula a través de la siguiente fórmula.

$$Q_r = m * C_c \quad 3.8$$

Donde:

$Q_r$  = Calor necesario para calentar el rodete en Kcal.

$m$  = Masa del rodete en kg.

$C_c$  = es el contenido de calor del material del rodete en Kcal/kg, cuyo valor se obtiene de la figura 57 y está en función de la temperatura de inicio  $T_\infty$  y final  $T_f$  del

calentamiento. Por lo tanto  $\Delta T$  que es la variación de temperatura se expresa como la diferencia de  $T_f - T_\infty$  y que al aplicarlo sobre la figura 57 tenemos que para  $T_\infty = 18^\circ C$  le corresponde un  $C_c = 4 kcal/kg$  y para  $T_f = 590^\circ C$  corresponde un  $C_c = 85 kcal/kg$ .

Reemplazando valores se tiene:

$$Q_r = 17000 kg * (85 - 4) kcal/kg$$

$$Q_r = 1377000 kcal$$

$$Q_r = 1601,45 kWh$$

### 3.7.3 Cálculo del calor necesario para el calentamiento de la estructura base del rodete.

Al igual que el caso anterior aplicamos la ecuación 3.8 y tenemos:

$$Q_b = m_b * C_c$$

El contenido calorífico lo obtenemos también de la figura 57, al igual que el caso anterior, pero hay que aclarar que los dos casos tienen el porcentaje de carbono diferente y por lo tanto su calor específico variará un poco; entonces se tiene que para  $T_\infty = 18^\circ C$  le corresponde un  $C_c = 4 kcal/kg$  y para  $T_f = 590^\circ C$  le corresponde un  $C_c = 79 kcal/kg$ .

En cuanto a la masa, ésta depende del perfil seleccionado que corresponde a un perfil IPE 300, cuyo peso es de 54,20 kg/m, cada lado de la base tiene una longitud de 2,835m, por lo tanto la masa de la base del rodete es  $m_b = 614,628 \text{ kg}$ .

Reemplazando datos tenemos:

$$Q_b = 614,628 \text{ kg} * (79 - 4) \text{ kcal / kg}$$

$$Q_b = 46097,1 \text{ kcal}$$

$$Q_b = 53,61 \text{ kWh}$$

### 3.7.4 Cálculo del calor necesario para el calentamiento de la solera del horno.

Para los ladrillos refractarios el contenido calorífico lo obtenemos de la siguiente figura, haciendo el mismo análisis anterior:

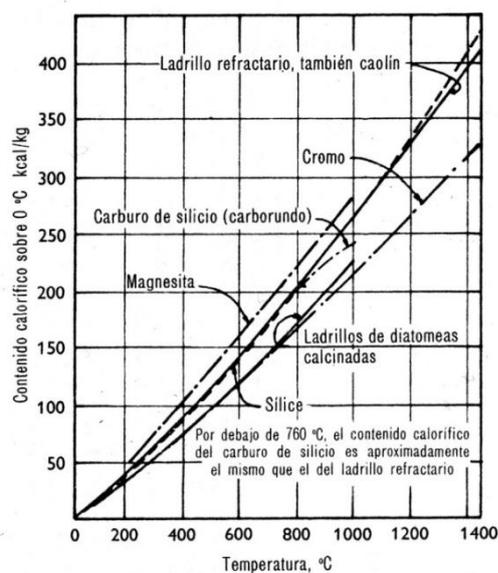


Figura 61. Contenido calorífico de los materiales refractarios.

$$Q_{LR} = m_{LR} * C_c$$

Entonces se tiene que para  $T_{\infty} = 18^{\circ}C$  le corresponde un  $C_c = 4 \text{ kcal/kg}$  y para  $T_f = 590^{\circ}C$  le corresponde un  $C_c = 137.5 \text{ kcal/kg}$ .

La masa de los ladrillos refractarios  $m_{TLR}$  calculamos partiendo de la fórmula de la densidad:

$$\delta = \frac{m}{V} \quad 3.9$$

$$\delta_{LR} = \frac{m_{LR}}{V_{LR}}$$

Donde:

$\delta_{LR} = 6.4 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$  Es la densidad de un ladrillo refractario.

$V_{LR}$  = Es el volumen de un ladrillo refractario.

$$V_{LR} = (6,35 * 22,86 * 11,43) \text{cm}^3 = 1659,19 \text{cm}^3$$

$$m_{LR} = \delta_{LR} * V_{LR}$$

$$m_{LR} = \left( 6,4 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \right) (1659,19 \text{cm}^3)$$

$$m_{LR} = 1,06 \text{ kg}$$

$$m_{TLR} = Z * m_{LR}$$

Donde:

Z = es el número de ladrillos que componen la solera.

$$Z = \frac{V_{SOLERA}}{V_{LR}}$$

$$Z = \frac{(4 * 4 * 0,381)m^3}{16,59 * 10^{-4} m^3} = 3674,08$$

$$m_{TLR} = (3674,08)(1,06kg)$$

$$m_{TLR} = 3901,43kg$$

Reemplazando datos tenemos:

$$Q_{LR} = (3901,43kg)(137,5 - 4) \frac{kcal}{kg}$$

$$Q_{LR} = 520842,18kcal$$

$$Q_{LR} = 605,73kWh$$

### 3.7.5 Cálculo del calor necesario para el calentamiento de las paredes y techo del horno.

**Calentamiento de la lana de vidrio AW:**

$$Q_{AW} = m_{AW} * c_p * \Delta T \quad 3.10$$

Donde:

$C_p$  = Calor específico.

$\Delta T$  = Variación de temperatura.

$m_{AW}$  = Masa total de la lana de vidrio AW. Para lo cual necesitamos saber cuál es el volumen de la lana de vidrio:

$$V_{AW} = V_{AW \text{ Paredes}} + V_{AW \text{ Techo}}$$

$$V_{AW} = 4(4 * 2,15 * 0,0508)m^3 + (4 * 4 * 0,0508)m^3$$

$$V_{AW} = 2,56 m^3$$

$$\delta_{AW} = \frac{m_{AW}}{V_{AW}}$$

$$m_{AW} = \delta_{AW} * V_{AW}$$

$$m_{AW} = \left(17,28 \frac{kg}{m^3}\right)(2,56m^3)$$

$$m_{AW} = 44,24 kg$$

Reemplazando datos se tiene que:

$$Q_{AW} = (44,24 kg) \left(0,19 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C}\right) \left(\frac{520+50}{2} - 18\right) ^\circ C$$

$$Q_{AW} = 2244,41 kcal$$

$$Q_{AW} = 2,61 kW h$$

**Calentamiento de la Fibra Cerámica:**

$$Q_{FC} = m_{FC} * c_p * \Delta T$$

Donde:

$C_p$  = Calor específico.

$\Delta T$  = Variación de temperatura.

$m_{FC}$  = Masa total de la lana de la fibra cerámica Fiber Blanket. Para lo cual necesitamos saber cuál es el volumen de la fibra cerámica:

$$V_{FC} = V_{FC \text{ Paredes}} + V_{FC \text{ Techo}}$$

$$V_{FC} = 4(4 * 2,15 * 0,075)m^3 + (4 * 4 * 0,075)m^3$$

$$V_{FC} = 3,78 m^3$$

$$\delta_{FC} = \frac{m_{FC}}{V_{FC}}$$

$$m_{FC} = \delta_{FC} * V_{FC}$$

$$m_{FC} = \left(128 \frac{kg}{m^3}\right)(3,78m^3)$$

$$m_{FC} = 483,84 kg$$

Reemplazando datos se tiene que:

$$Q_{FC} = (483,84 kg) \left(0,27 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C}\right) \left(\frac{619,5 + 520}{2} - 18\right) ^\circ C$$

$$Q_{AW} = 72078,85 kcal$$

$$Q_{FC} = 83,77 kW h$$

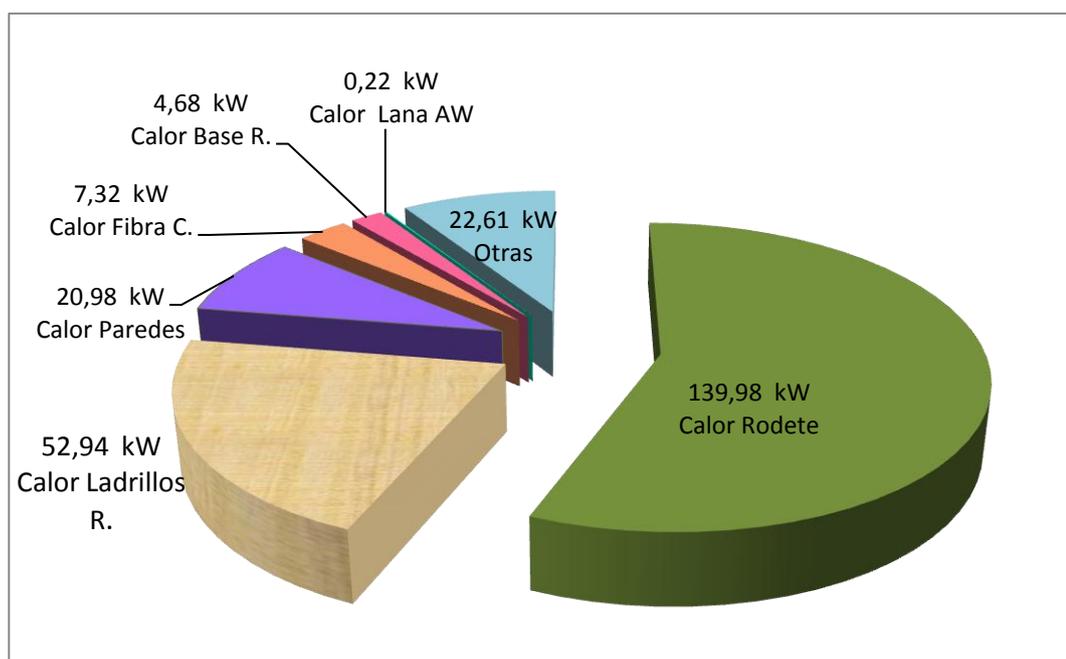
Con los datos que se han obtenido anteriormente se calcula el consumo total de energía del horno, considerando un 10% más de la suma total, por otras pérdidas de calor.

De acuerdo al tratamiento térmico de alivio de tensiones que se le aplica al rodete, se considera que la velocidad de calentamiento es de 50 °C por hora, hasta alcanzar la temperatura de 590 °C, que es la temperatura máxima de alivio, para lo cual tardará el tiempo de 11,44 horas, entonces el calor necesario para calentar el rodete, base del rodete, ladrillo refractario, lana de vidrio y fibra cerámica deberá dividirse para este tiempo, entonces el consumo total de calor en el horno es:

$$Q_T = (Q_t + Q_r + Q_b + Q_{LR} + Q_{LW} + Q_{FC}) * 1,1 \quad 3.11$$

$$Q_T = (20,98 + 139,98 + 4,68 + 52,94 + 0,22 + 7,32) * 1,1 \text{ kW}$$

$$Q_T = 248,76 \text{ kW}$$



**Figura 62. Representación de la cantidad de calor necesario para el horno.**

### 3.8 Cálculo del rendimiento del Horno ( $\eta$ ).

La eficiencia del horno se puede calcular mediante la siguiente ecuación, considerando que se encuentra en estado estable:

$$\eta = \left( \frac{Q_T}{Q_T + Q_t} \right) * 100\% \quad 3.12$$

$$\eta = \left( \frac{248,76}{248,76 + 23,078} \right) * 100\%$$

$$\eta = 91,51\%$$

### 3.9 Cálculo de la potencia del Horno.

$$P = \frac{Q_T}{\eta} \quad 3.13$$

Donde:

$P$  = Potencia del horno.

$Q_T$  = consumo calorífico del horno.

$\eta$  = rendimiento del horno.

$$P = \left( \frac{249,29}{0,9151} \right) kW$$

$$P = 272,41 kW$$

### **Cálculo de las escotillas del horno.**

De acuerdo con la información que se detalló en el apartado 2.6.2, donde se hace referencia al enfriamiento del rodete a partir de la temperatura de 150 °C; es necesario calcular el área de las escotillas por donde se liberará calor durante un determinado tiempo.

Para calcular el área de las escotillas se toma en cuenta que el calor que pierde la masa del rodete se disipará por las escotillas, paredes, techo y solera del horno.

Se ha tomado en cuenta un tiempo de 10 horas que deben permanecer abiertas las dos primeras escotillas y la variación de temperatura en función del mismo para calcular el calor que se pierde por convección, el mismo que se manifiesta como una disminución de su energía interna; se trata entonces de un estado transitorio y se calcula el calor que pierde la masa del rodete a través de la siguiente ecuación:

$$q = -cp * m_r * \frac{dT}{d\tau} \quad 3.14$$

Donde:

$q$  = Es el calor que pierde el rodete durante 10 horas de enfriamiento, a partir de los 150 °C.

$m_r$  = Es la masa del rodete.

$cp$  = Es el calor específico del material del rodete a 150 °C.

$dT$  = Es el diferencial de la temperatura.

$d\tau$  = Es el diferencial del tiempo.

Resolviendo la ecuación 3.14, tenemos:

$$q * d\tau = -cp * m * dT$$

Los límites de integración de la temperatura está en función del tiempo, es decir que para un tiempo  $\tau = 0 h$  la temperatura inicial es  $T_i = 150 ^\circ C$  y para un tiempo  $\tau = 10 h$  la temperatura final es  $T_f = 120 ^\circ C$ . La  $T_f$  se dedujo tomando en cuenta la temperatura "M<sub>f</sub>" final de transformación martensítica, mostrada en la figura 63.

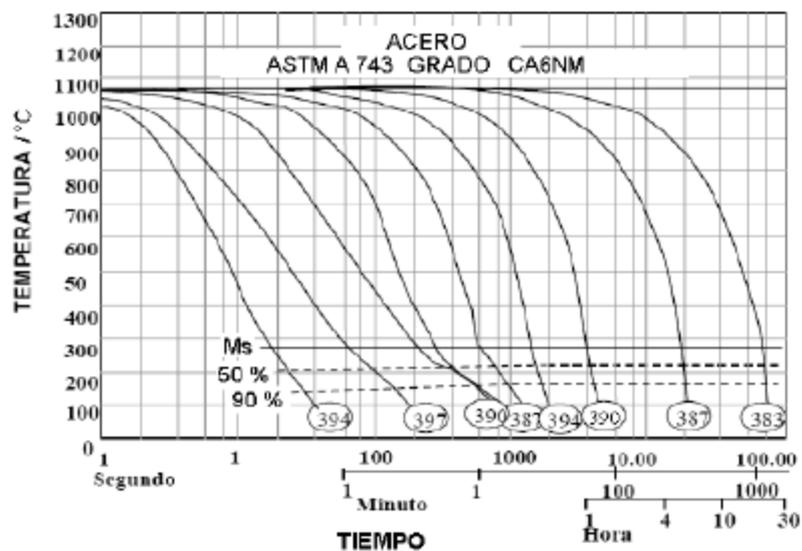


Figura 63. Diagrama de transformación de enfriamiento continuo para el acero CA6NM.

El calor será:

$$\int_0^{\tau} q^* d\tau = - \int_{T_i}^{T_f} cp^* m^* dT$$

$$\int_0^{10} q^* d\tau = - \int_{150}^{120} cp^* m^* dT$$

$$q^* \tau = -cp^* m^* T$$

$$q^*(10-0)h = -cp^* m_r^*(120-150) {}^{\circ}C$$

$$q = - \frac{\left(0,12 \frac{kcal}{kg {}^{\circ}C}\right)(17000 kg)(120-150) {}^{\circ}C}{10 h}$$

$$q = 6120 \frac{kcal}{h}$$

$$q = 7117,56 W$$

Utilizando la ecuación 3.1 se puede obtener un área "  $A_t$ " supuesta de escotilla, ya que el área real se determinará cuando se tome en cuenta el calor que se pierde por las paredes, techo y solera del horno.

$$q = h_{\infty} * A_t * (T - T_{\infty})$$

$$A_t = \frac{q}{h_{\infty}(T - T_{\infty})}$$

$$A_t = \frac{7117,56 W}{\left(15 \frac{W}{m^2 {}^{\circ}C}\right)(150-18) {}^{\circ}C}$$

$$A_t = 3,5947 m^2$$

El calor perdido por paredes, techo y solera del horno cuando éste se encuentra a los 150°C en el estado de descenso de temperatura, servirá para determinar un área "A<sub>p</sub>" ficticia de escotilla. El área real de escotilla será determinada por la diferencia de (A<sub>t</sub> – A<sub>p</sub>), por lo tanto el área A<sub>p</sub> se obtiene de los siguientes cálculos.

Calor perdido por las paredes del horno:

Se toma en consideración la ecuación 3.4 y calculamos el calor perdido por las paredes.

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{\sum R}$$

Donde:

$T_i = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$  Es la temperatura interna a la que se encuentra el horno en ese instante.

$\sum R = 0,274 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$  Es la sumatoria de las resistencias térmicas de las paredes.

Remplazando datos tenemos:

$$q = \frac{(150 - 18) \text{ } ^\circ\text{C}}{0,274 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}}$$

$$q = 480,35 \text{ W}$$

El calor que se ha obtenido anteriormente representa el cálculo para una sola pared; se debe calcular el calor total perdido por paredes.

$$q_{paredes} = (481,75) * 4 [W]$$

$$q_{paredes} = 1921,39 W$$

Calor perdido por el techo del horno.

Al igual que el caso anterior, tenemos:

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{\sum R}$$

$$q = \frac{(150 - 18) ^\circ C}{0,147 \frac{^\circ C}{W}}$$

$$q_{techo} = 895,82 W$$

Calor perdido por la solera del horno.

Se toma en consideración la ecuación 3.6.

$$Q = \frac{S * C * A * (T_i - T_a)}{D}$$

Donde:

$T_i = 150 ^\circ C$  Es la temperatura a la que se encuentra los ladrillos en el interior del horno en ese instante. La conductividad es  $0,192436 \frac{kcal}{mh ^\circ C}$  a la temperatura de

150 °C, los demás parámetros de la ecuación ya se mencionaron anteriormente en el apartado 3.5.2.

$$Q = \frac{(4,40) \left( 0,192436 \frac{\text{kcal}}{\text{mh } ^\circ\text{C}} \right) (16\text{m}^2) (150 - 18)^\circ\text{C}}{4\text{m}}$$

$$Q = 447,06 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{solera}} = 519,08 \text{ W}$$

Sumamos los calores de las pérdidas y tenemos:

$$q_{\text{pérdidas}} = q_{\text{paredes}} + q_{\text{techo}} + Q_{\text{solera}}$$

$$q_{\text{pérdidas}} = (1921,39 + 895,82 + 519,08) \text{ W}$$

$$q_{\text{pérdidas}} = 3336,29 \text{ W}$$

Con el calor de pérdidas, se calcula el área "A<sub>p</sub>" ficticia por la cual se transfiere dicho calor:

$$q = h_{\infty} * A_p * (T - T_{\infty})$$

$$A_p = \frac{q}{h_{\infty} (T - T_{\infty})}$$

$$A_p = \frac{3336,29 \text{ W}}{\left( 8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \right) (150 - 18) ^\circ\text{C}}$$

Hay que tomar en cuenta que el coeficiente convectivo es de  $h=8\frac{W}{m^2\ ^\circ C}$  porque en el ambiente interno del horno el aire está a baja velocidad en comparación con el ambiente exterior. Entonces tenemos que:

$$A_p = 3,159m^2$$

Por lo tanto el área de las escotillas será la diferencia entre el área  $A_t$  que necesita para liberar el calor del rodete y el área  $A_p$  por donde también se pierde el calor.

$$A_{escotilla} = A_t - A_p$$

$$A_{escotillas} = (3,5947 - 3,1593)m^2$$

$$A_{escotillas} = 0,4353m^2$$

Se considera que se debe abrir dos escotillas en un primer instante, por lo que el área de las escotillas que se ha obtenido se divide para dos, y se tiene el área para cada escotilla.

$$A_{c/e} = \frac{0,4353m^2}{2}$$

$$A_{c/e} = 0,2176m^2$$

La geometría de la escotilla será cuadrada, por ende el lado para cada escotilla es:

$$A_{c/e} = l^2$$

$$l = \sqrt{0,2176 m^2}$$

$$l = 0,466 m$$

Para el diseño de las escotillas, el lado medirá  $l = 0,45$  m, puesto que el enfriamiento lento del rodete es más seguro para un exitoso tratamiento térmico de alivio de tensiones.

## CAPÍTULO IV

### 4 DISEÑO MECÁNICO DEL HORNO.

#### 4.1 Generalidades.

Las estructuras se componen de una o más piezas ligadas entre si y al medio exterior, para formar un conjunto estable. Esto es, un conjunto capaz de recibir cargas externas, resistirlas internamente y transmitir las en sus apoyos, donde esas fuerzas externas encontrarán su sistema estático equilibrante<sup>1</sup>.

Se debe determinar de la manera más precisa posible el valor de las cargas que soportará la estructura durante su vida útil, así como su posición y también determinar las combinaciones más desfavorables que puedan presentarse.

Tipos de cargas:

- Cargas muertas.
- Cargas vivas.
- Cargas accidentales.

---

<sup>1</sup> GOMEZ, José L. Estructuras en Arquitectura.

**Cargas Muertas.-** son aquellas cuya magnitud y posición, permanecen prácticamente constantes durante la vida útil de la estructura. También se denominan cargas permanentes.

- Peso propio.
- Instalaciones
- Empujes de rellenos definitivos.
- Cargas debidas a deformaciones permanentes (montaje).

**Cargas Vivas.-** son cargas variables en magnitud y posición debidas al funcionamiento propio de la estructura. También se denominan de “ocupación”.

- Personal.
- Mobiliario.
- Empujes de cargas de almacenes.

### **Cargas Accidentales**

**Viento.-** Estas cargas dependen de la ubicación de la estructura, de su altura, del área expuesta y de la posición.

**Sismo.-** Estas cargas inducidas en las estructuras están en relación a su masa y elevación a partir del suelo, así como de las aceleraciones del terreno y de la capacidad de la estructura para disipar energía [25].

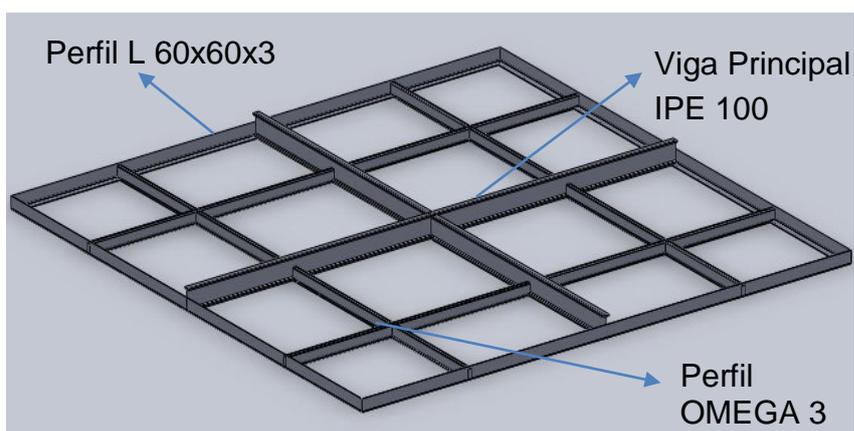
El diseño de la estructura metálica del horno se basa en perfiles de acero que se encuentran disponibles en el mercado, los mismos que soportarán cargas como son su propio peso y el de los demás elementos que se unirán a la estructura.

## 4.2 Techo del horno.

Para el diseño de la estructura se toma en cuenta dos tipos de cargas, la carga viva y la carga muerta.

La carga muerta corresponde al peso total de la estructura del techo del horno, es decir el recubrimiento metálico, capa de fibra cerámica, capa de lana de vidrio y accesorios adicionales.

Para los trabajos de manipulación sobre el techo del horno, como por ejemplo abrir las escotillas, colocar el gancho de la grúa para montar o desmontar el techo del horno, así como para limpieza y mantenimiento, será necesario una persona; cuyo peso se designa como carga viva.



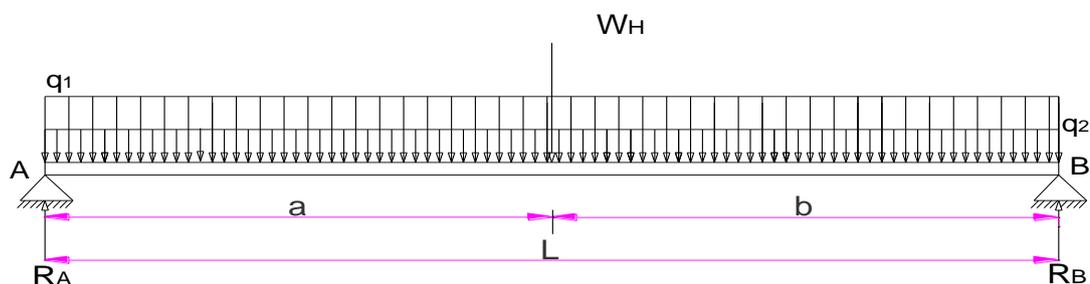
**Figura 64. Representación de la estructura del techo del horno.**

Como se puede ver en la figura 64, tenemos 6 vigas las cuales van a soportar las cargas que se mencionó anteriormente, por lo que es importante hacer el estudio de la viga más crítica.

#### 4.2.1 Cálculo de la deformación de la viga principal del techo del horno.

Se ha tomado en cuenta la viga más crítica para calcular la deformación (flecha) que se produce en ella debido a las cargas a las que está sometida.

En la siguiente figura se presenta las cargas que actúan sobre la viga más crítica en la estructura del techo del horno:



**Figura 65. Representación de las fuerzas sobre la viga principal.**

Donde:

$W_H = 40$  kgf, es la mitad del peso de un hombre sobre la viga más crítica, ya que al intersecarse con la viga transversal comparten dicho peso, es decir los 80 kgf que es el peso promedio de una persona, dividimos para las dos vigas que soportan este peso.

$q_1 = 0,02$  kgf/mm, es la carga distribuida que representa el peso de los materiales refractarios  $W_R = 200$  kgf más el peso de la chapa de acero para el recubrimiento del techo  $W_{CH} = 299$  kgf, que soporta la viga. Este valor se obtiene dividiendo el peso total que es  $W = 499$  kgf para el número de vigas que constituyen el techo y para su longitud  $L$ .

$$W_{c/viga} = \frac{499 \text{ kgf}}{6}$$

$$W_{c/viga} = q_1 * L$$

$$q_1 = \frac{W_{c/viga}}{L}$$

$q_2 = 0,0081$  kgf/mm, es la carga distribuida que representa el peso propio de la viga. Este valor se obtiene dividiendo el peso de la viga que es  $W_V = 35,34516$  kgf para su longitud  $L$ .

$a = b = 2\ 181,8$  mm, son las distancias entre fuerzas.

$L$  = longitud total de la viga.

Para encontrar el valor de las reacciones, se realiza sumatoria de momento en el punto A.

$$\sum M_A = 0 \quad 4.1$$

$$R_B(L) - W_H(a) - q_1(L)(a) - q_2(L)(a) = 0$$

$$R_B = \frac{W_H(a) + q_1(L)(a) + q_2(L)(a)}{(L)}$$

$$R_B = \frac{(40\text{kgf})(2181,8\text{mm}) + (0,02 + 0,0081)(4363,6\text{mm})(2181,8\text{mm})}{(4363,6\text{mm})}$$

$$R_B = 81,3\text{kgf}$$

Mediante la ecuación de equilibrio de fuerzas se tiene que:

$$\sum F_y = 0 \quad 4.2$$

$$R_B + R_A - W_H - q_1(L) - q_2(L) = 0$$

$$R_A = W_H + q_1(L) + q_2(L) - R_B$$

$$R_A = 81,3\text{kgf}$$

Es necesario saber cuánto se deforma la viga al estar aplicada las fuerzas mencionadas anteriormente, por lo que se resolverá a través de la ecuación que permite hallar la deformación de la viga por el método de la Doble Integración.

$$E I_x y'' = M_f \quad 4.3$$

Donde:

$M_f$  = es el momento flector de la viga.

$E$  = es el módulo de elasticidad del material (Anexo I ).

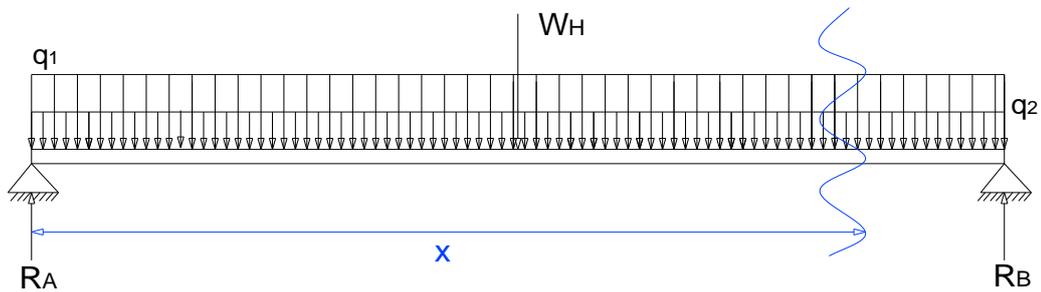
$I_x$  = es el momento de inercia del perfil del material.

Al realizar la primera integral de  $[y'']$  se obtiene  $[y']$  que representa el ángulo de giro que se forma en la sección transversal de la viga inicialmente normal a su eje, y al integrar una vez más obtenemos  $[y]$  que es la flecha de la viga.

$$E I_x y' = \int M_f dx + C$$

$$E I_x y = \int dx \int M_f dx + C + D$$

**Flecha**  $[y]$ .- desplazamiento de un punto en la viga inicialmente en la posición horizontal hacia un segundo punto luego de ser aplicada una carga externa.



**Figura 66. Representación de las fuerzas para el método de la doble integración.**

Se realiza sumatoria de momentos en el punto donde la distancia de la viga es

x.

$$E I_x y'' = M_f$$

$$E I_x y'' = R_A(x) - W_H(x-a) - q_1(x)\left(\frac{x}{2}\right) - q_2(x)\left(\frac{x}{2}\right)$$

$$E I_x y' = R_A \left(\frac{x^2}{2}\right) - W_H \frac{(x-a)^2}{2} - q_1 \left(\frac{x^3}{6}\right) - q_2 \left(\frac{x^3}{6}\right) + C$$

$$E I_x y = R_A \left(\frac{x^3}{6}\right) - W_H \frac{(x-a)^3}{6} - q_1 \left(\frac{x^4}{24}\right) - q_2 \left(\frac{x^4}{24}\right) + Cx + D$$

Por condición de apoyos tenemos que:

1.- Para  $x=0$ , la deformación también es cero ( $y=0$ ), se puede hallar la constante D.

$$E I_x (0) = R_A \left(\frac{0^3}{6}\right) - W_H \frac{(0-a)^3}{6} - q_1 \left(\frac{0^4}{24}\right) - q_2 \left(\frac{0^4}{24}\right) + C(0) + D$$

$$D = 0$$

2.- Y, para  $x=L$ , también la deformación es cero ( $y=0$ ), con estos datos se encuentra el valor de la constante C.

$$E I_x (0) = R_A \left(\frac{L^3}{6}\right) - W_H \frac{(L-a)^3}{6} - q_1 \left(\frac{L^4}{24}\right) - q_2 \left(\frac{L^4}{24}\right) + C(L) + D$$

$$C = -144883927.1$$

Se puede hallar ahora el valor de la deformación de la viga, para cualquier valor de  $x$  a lo largo de su longitud.

Su deformación máxima se da en el punto  $x= 2181,8$  mm

$$E I_x y = R_A \left(\frac{x^3}{6}\right) - W_H \frac{(x-a)^3}{6} - q_1 \left(\frac{x^4}{24}\right) - q_2 \left(\frac{x^4}{24}\right) + Cx + D$$

$$E = 200 \text{ GPa} = 20408,16 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$$

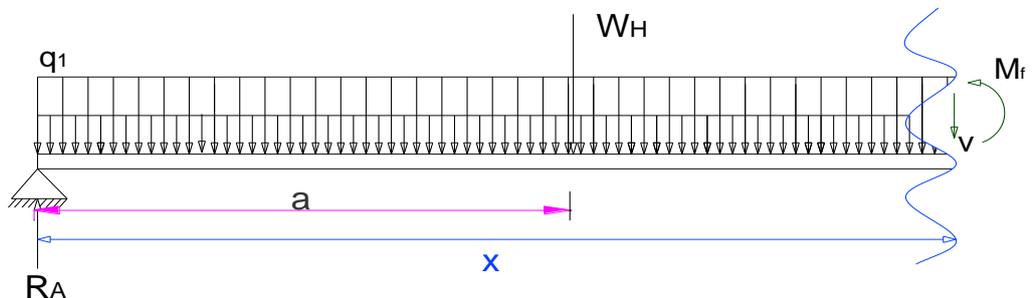
$$I_x = 171 \text{ cm}^4 = 171 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$y = \frac{-2,019 \times 10^{11} \text{ kg mm}^3}{\left(20408,16 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) (171 \times 10^4 \text{ mm}^4)}$$

$$y = -5,8 \text{ mm}$$

El signo negativo nos indica que la viga se deformará hacia abajo.

Ahora se determina el valor de la fuerza cortante y el momento flector máximo en la viga.



**Figura 67. Análisis de la viga para hacer el diagrama de Fuerza Cortantes y de Momentos Flectores.**

Se sabe que:

$$R_A = 81,3 \text{ kgf}$$

$$a = \frac{L}{2} = 2181,8 \text{ mm}$$

$$q_1 = 0,02 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}}$$

$$q_2 = 0,0081 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}}$$

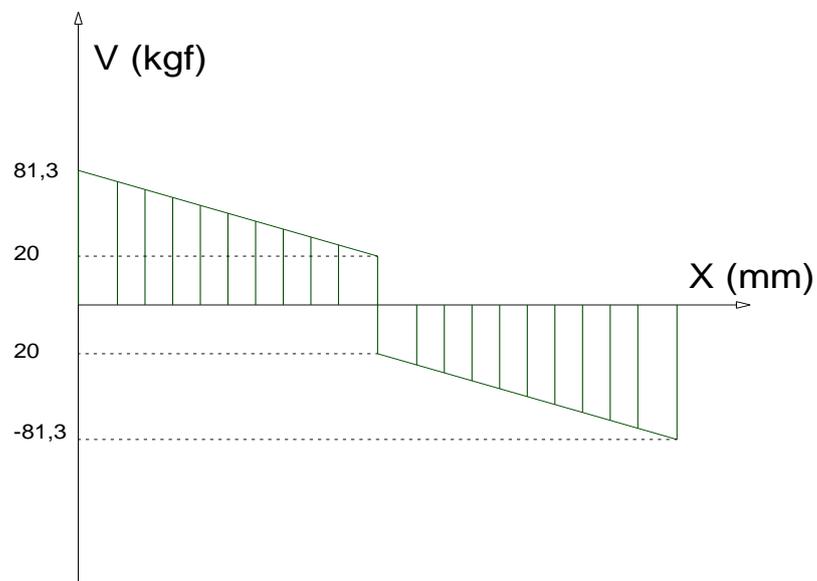
$$W_H = 40 \text{ kgf}$$

Con los datos precedentes y mediante la ecuación de equilibrio de fuerzas se tiene que:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A - W_H - q_1(x) - q_2(x) - V = 0$$

$$V = R_A - W_H - q_1(x) - q_2(x)$$

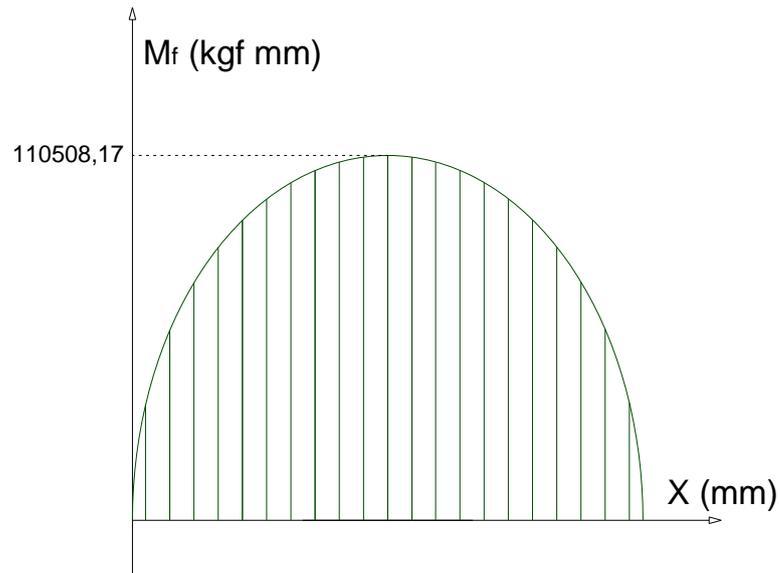


**Figura 68. Diagrama de Fuerza Cortante.**

$$\sum M_x = 0$$

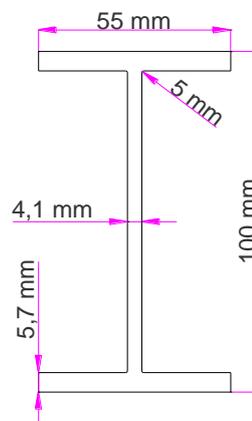
$$R_A(x) - W_H(x - a) - q_1(x)\left(\frac{x}{2}\right) - q_2(x)\left(\frac{x}{2}\right) - M_f = 0$$

$$M_f = R_A(x) - W_H(x - a) - q_1(x)\left(\frac{x}{2}\right) - q_2(x)\left(\frac{x}{2}\right)$$



**Figura 69. Diagrama de Momento flector.**

El momento flector máximo en la viga es  $M_{f \text{ máx}} = 110508,17 \text{ kgf}$ .



**Figura 70. Perfil de la viga, denominación IPE.**

El perfil de la viga es de tipo IPE100, cuyas especificaciones se presentan en el (Anexo J).

Se puede calcular entonces el esfuerzo máximo de la viga.

$$\sigma = \frac{M_{m\acute{a}x.} \cdot \bar{y}}{I_x} = \frac{M_{m\acute{a}x.}}{W_{x \text{ tabulado}}} = \frac{S_y}{n} \quad 4.4$$

Donde:

$\sigma$  = es el esfuerzo máximo por flexión en la viga.

$M_{m\acute{a}x.}$  = Es el momento flector máximo en la viga.

$W_{x \text{ tabulado}}$  = Es el Módulo de Resistencia, cuyo valor se encuentra en las talas de los datos técnicos de cada perfil.

$$W_{x \text{ tabulado}} = \frac{I_x}{\bar{y}} \quad 4.5$$

$I_x$  = es el momento de inercia del perfil de la viga en  $\text{cm}^4$ .

$\bar{y}$  = es el centro de gravedad en cm.

$S_y$  = es el límite de fluencia del material en  $\text{kg/cm}^2$  (Anexo I).

$n$  = es el coeficiente de seguridad.

$$n = \frac{W_{x \text{ tabulado}}}{W_{x \text{ calculado}}} \quad 4.6$$

$$W_{x \text{ calculado}} = \frac{M_{\text{máx.}}}{S_y} \quad 4.7$$

Por lo tanto se tiene que el esfuerzo máximo por flexión es:

$$\sigma = \frac{(110508,17 \text{ kgf mm})(50 \text{ mm})}{171 \times 10^4 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma = 3,23 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$$

Y el coeficiente de seguridad es:

$$n = \frac{W_{x \text{ tabulado}}}{W_{x \text{ calculado}}}$$

$$W_{x \text{ calculado}} = \frac{M_{\text{máx.}}}{S_y} = \frac{110508,17 \text{ kgf mm}}{25,3 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}} = 4366,85$$

$$n = \frac{34200 \text{ mm}^3}{4366,85 \text{ mm}^3}$$

$$n = 7,8$$

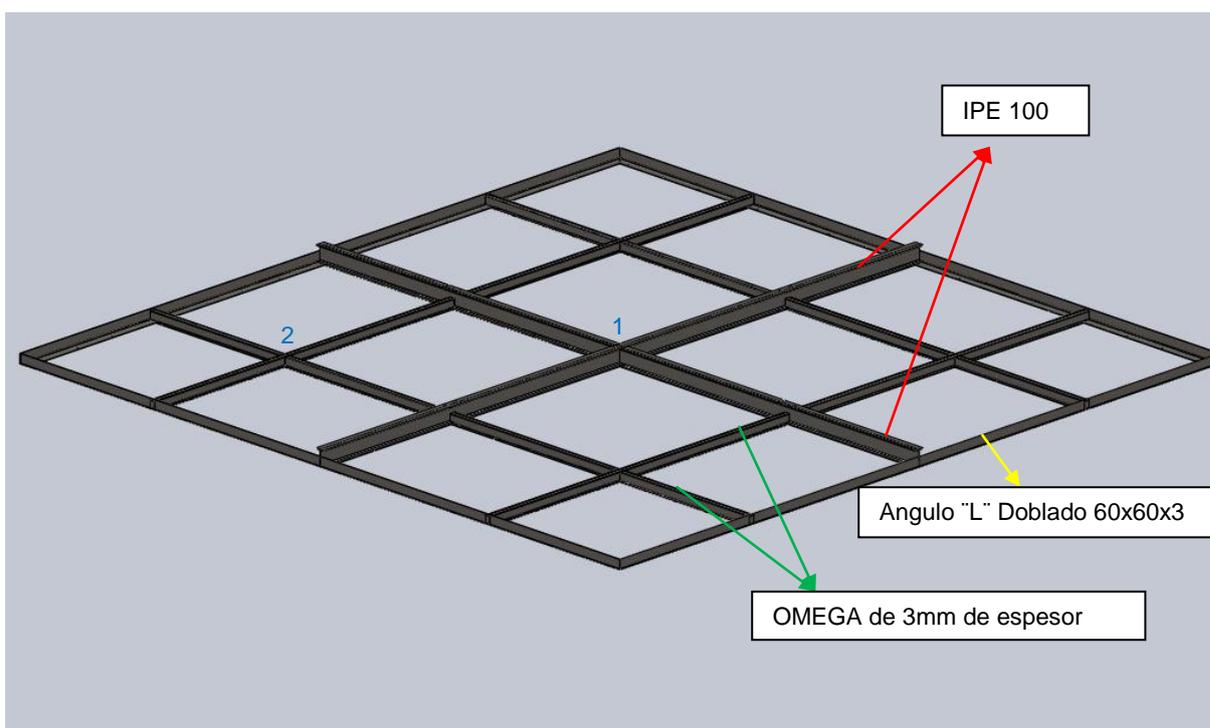
#### 4.2.2 Simulación de la estructura del techo en un software.

El software que se ha utilizado permite el cálculo de estructuras por elementos finitos, para análisis estático, dinámico, lineal y no lineal, mediante el software es posible modelar complejas geometrías, definir diversos estados de carga, generar

pesos propios automáticamente, asignar secciones, materiales, así como realizar cálculos estructurales de hormigón y acero basados en normas vigentes.

Se ha realizado dos casos de análisis en la estructura del techo, considerando cargas muertas, vivas y térmicas en ambos casos.

En el primer caso, la carga viva se ha considerado en el punto 1 de la figura 71 (centro de la estructura); mientras que en el segundo caso, la carga viva se ha considerado en el punto 2 de la figura 71 (sobre el perfil OMEGA).



**Figura 71. Perfiles de Estructura del Techo.**

**Primer caso.****CARGAS:**

- Viva: por persona, 80Kg ubicado en el centro de la estructura
- Muerta: peso de chapa metálica + refractarios, 299 Kg + 200Kg = 499Kg

Hay 6 vigas que soportarán este peso; por lo tanto:

$$\frac{499 \text{ kg}}{6} = 83,16 \text{ kg}$$

Cada viga tiene una longitud de 4363.6 mm; por lo tanto la carga que soporta cada viga es:

$$q_1 = \frac{\text{peso por cada viga}}{\text{longitud de la viga}}$$

$$q_1 = \frac{83,1666 \text{ kg}}{4363,6 \text{ mm}} = 0,019 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} \approx 0,02 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}$$

- Térmica: temperatura máxima en las paredes exteriores del horno, 50°C.

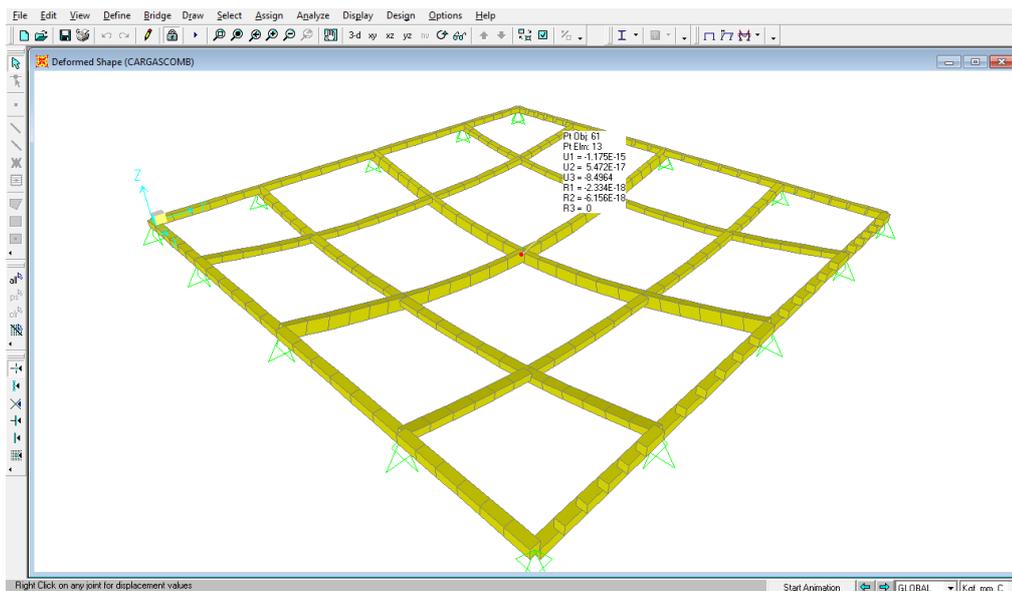
## Resultados del análisis en el software para la deformación máxima.

Como es de esperarse, ésta deformación se produce en el centro de la estructura, siendo su valor de -8,49mm; el valor negativo significa que la deformación se produce hacia abajo; y se pueden visualizar en una hoja de cálculo de Excel donde se muestran los valores del resultado del análisis que se exportan desde el software.

Los valores de la columna F en la siguiente figura, están ordenados de menor a mayor para una mejor visualización de los resultados, por ende el primer valor que se indica es la deformación máxima en el centro de la estructura.

Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
61	CARGASCOMB	Combination	-1,175E-15	5,472E-17	-8,496392	-2,334E-18	-6,156E-18	0
59	CARGASCOMB	Combination	-6,389E-16	-5,518E-17	-5,342375	-1,88E-18	0,004872	1,059E-20
63	CARGASCOMB	Combination	-7,319E-16	-5,518E-17	-5,342375	-2,504E-18	-0,004872	-1,059E-20
69	CARGASCOMB	Combination	2,641E-15	-2,355E-17	-5,342375	-0,004872	8,409E-18	0
77	CARGASCOMB	Combination	2,641E-15	2,335E-17	-5,342375	0,004872	9,009E-18	0
67	CARGASCOMB	Combination	1,168E-15	-7,074E-17	-3,984208	-0,003068	0,003068	0
71	CARGASCOMB	Combination	1,688E-15	-7,066E-17	-3,984208	-0,003068	-0,003068	0
75	CARGASCOMB	Combination	1,168E-15	7,115E-17	-3,984208	0,003068	0,003068	0
79	CARGASCOMB	Combination	1,688E-15	7,106E-17	-3,984208	0,003068	-0,003068	0
1	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	-0,000019	0,000019	1,606E-19
9	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	-0,000019	-0,000019	2,318E-19
16	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	0,000019	-0,000019	-2,282E-19
15	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	0,000019	0,000019	-1,642E-19
16	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	0,005167	0,000004744	5,912E-19
17	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	-0,005167	0,000004744	-5,898E-19
18	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	0,006377	1,631E-19	1,812E-18
19	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	-0,006377	-6,87E-20	-1,812E-18
20	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	0,005167	-0,000004744	9,518E-19
21	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	-0,005167	-0,000004744	-9,532E-19
22	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	-2,926E-19	0,006377	-4,63E-20
23	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	8,975E-20	-0,006377	4,63E-20
24	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	-0,000004744	0,005167	-6,746E-20
25	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	-0,000004744	-0,005167	0
26	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	0,000004744	0,005167	8,069E-20
27	CARGASCOMB	Combination	0	0	0	0,000004744	-0,005167	-1,793E-20

Figura 72. Resultados en el software para el techo del horno (primer caso).



**Figura 73 . Deformación máxima en el punto medio de estructura del techo del horno (primer caso).**

Esta deformación es aceptable ya que como indica la norma, la flecha "y" máxima no debe superar la siguiente relación:

- Según AISC (American Institute of steel construction).

$$[\delta] = \frac{\text{longitud de la viga}}{360}$$

$$[\delta] = \frac{4363.6\text{mm}}{360} = 12,12\text{mm}$$

- Según otras recomendaciones.

$$[\delta] = \frac{\text{longitud de la viga}}{300}$$

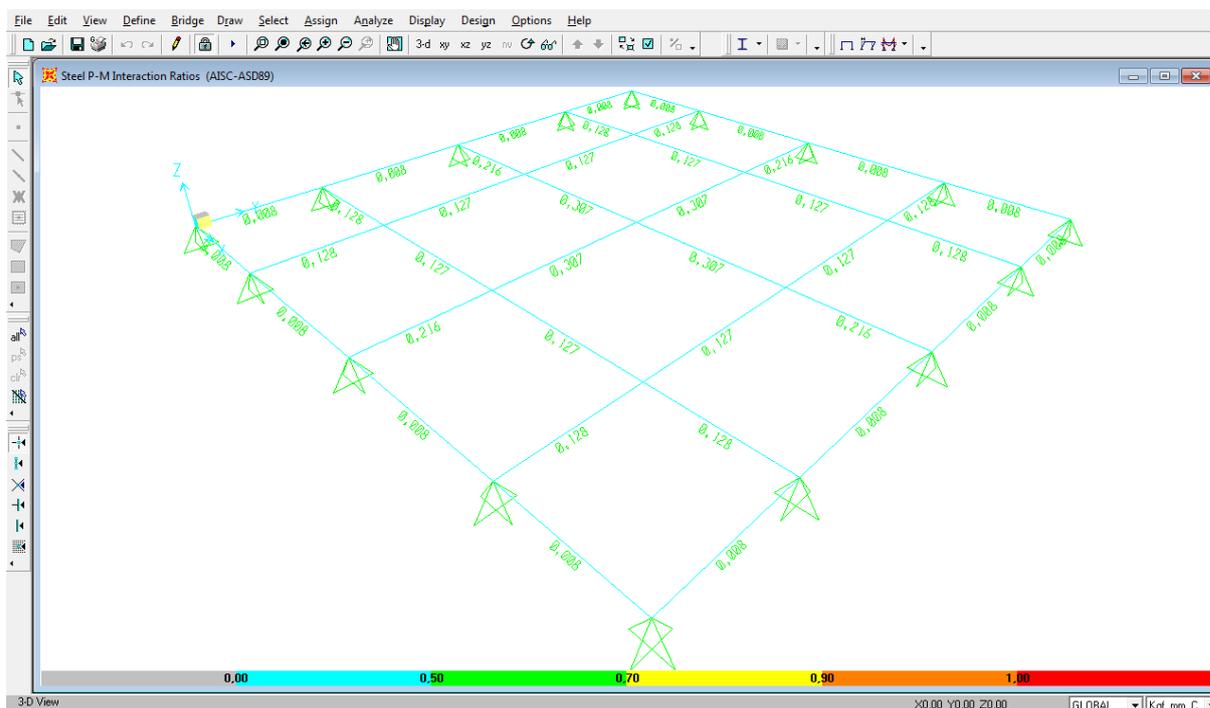
$$[\delta] = \frac{4363.6\text{mm}}{300} = 14,54\text{mm}$$

- Según el software que trabaja con las normas AISC-ASD 89.

$$[\delta] = \frac{\text{longitud de la viga}}{240}$$

$$[\delta] = \frac{4363.6\text{mm}}{240} = 18,18\text{mm}$$

El valor de la razón de esfuerzo no debe exceder la unidad, para garantizar que los perfiles analizados soporten las cargas para el servicio que se le quiere dar en este caso, el valor máximo es de 0,307 y se indica en cada uno de los perfiles en la figura 74.



**Figura 74. Razón de esfuerzo en los perfiles estructurales del techo del horno (primer caso).**

## Segundo caso.

### Cargas:

- Viva: por persona, 80Kg en el centro del perfil Omega.
- Muerta: peso de chapa metálica + refractarios, 299 Kg+200Kg = 499Kg.

Hay 6 vigas que soportarán este peso; por lo tanto:

$$\frac{499 \text{ kg}}{6} = 83,16 \text{ kg}$$

Cada viga tiene una longitud de 4363.6 mm; por lo tanto la carga que soporta cada viga es:

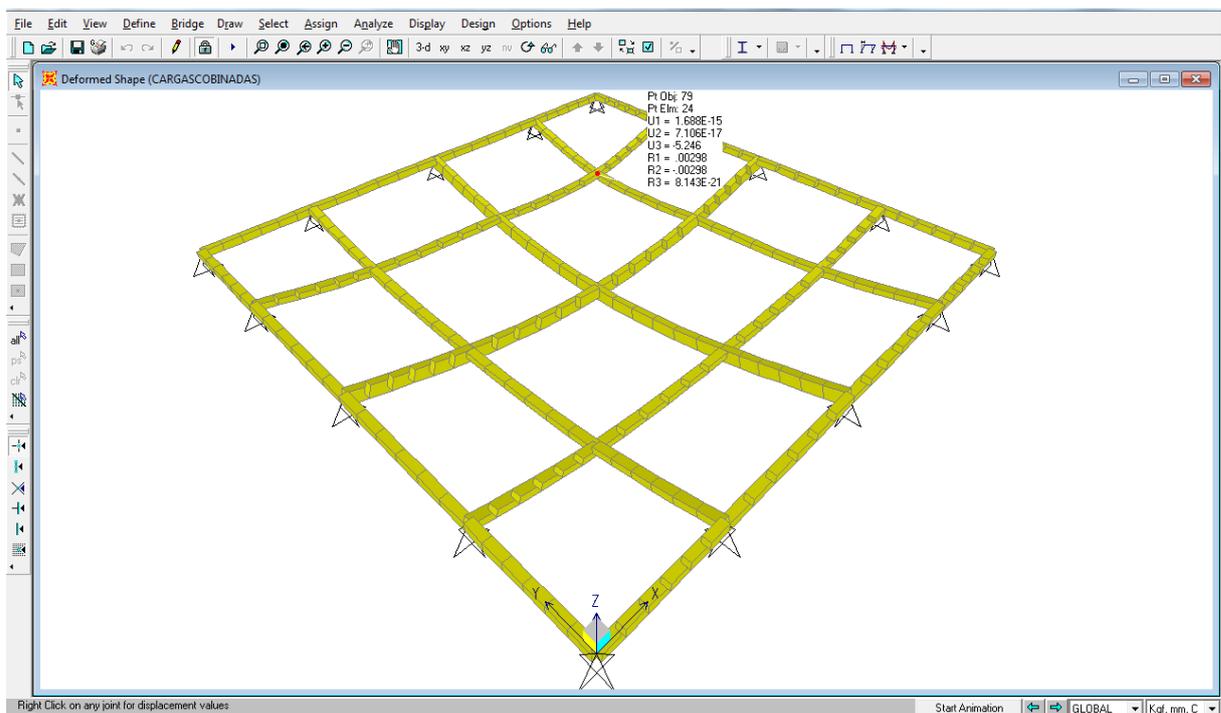
$$q_1 = \frac{\text{peso por cada viga}}{\text{longitud de la viga}}$$

$$q_1 = \frac{83,1666 \text{ kg}}{4363,6 \text{ mm}} = 0,019 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} \approx 0,02 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}$$

- Térmica: temperatura máxima en las paredes exteriores del horno, 50 °C.

## Resultados del análisis en el software para la deformación máxima.

En el punto de interés (2) la flecha máxima será de -5,24mm. (Figura 75)



**Figura 75. Deformación en perfil Omega.**

La deformación del perfil Omega en el punto 2 es aceptable ya que como indica la norma, la flecha "Y" máxima no debe superar la siguiente relación:

- Según AISC (American Institute of steel construction).

$$[\delta] = \frac{\text{longitud de la viga}}{360}$$

$$[\delta] = \frac{2179,75\text{mm}}{360} = 6,055\text{mm}$$

- Según otras recomendaciones.

$$[\delta] = \frac{\text{longitud de la viga}}{300}$$

$$[\delta] = \frac{2179,75\text{mm}}{300} = 7,26\text{mm}$$

- Según el software que trabaja con las normas AISC-ASD 89.

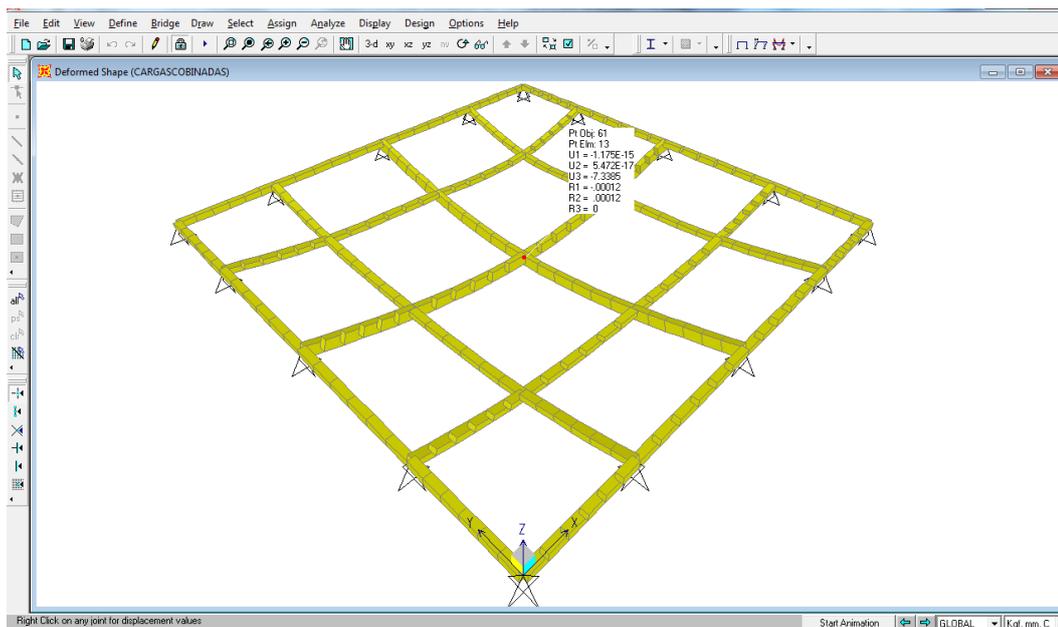
$$[\delta] = \frac{\text{longitud de la viga}}{240}$$

$$[\delta] = \frac{2179,75\text{mm}}{240} = 9,08\text{mm}$$

La deformación máxima es de -7,33mm en el punto medio de la estructura. Los resultados se detallan en la figura 76 y 77.

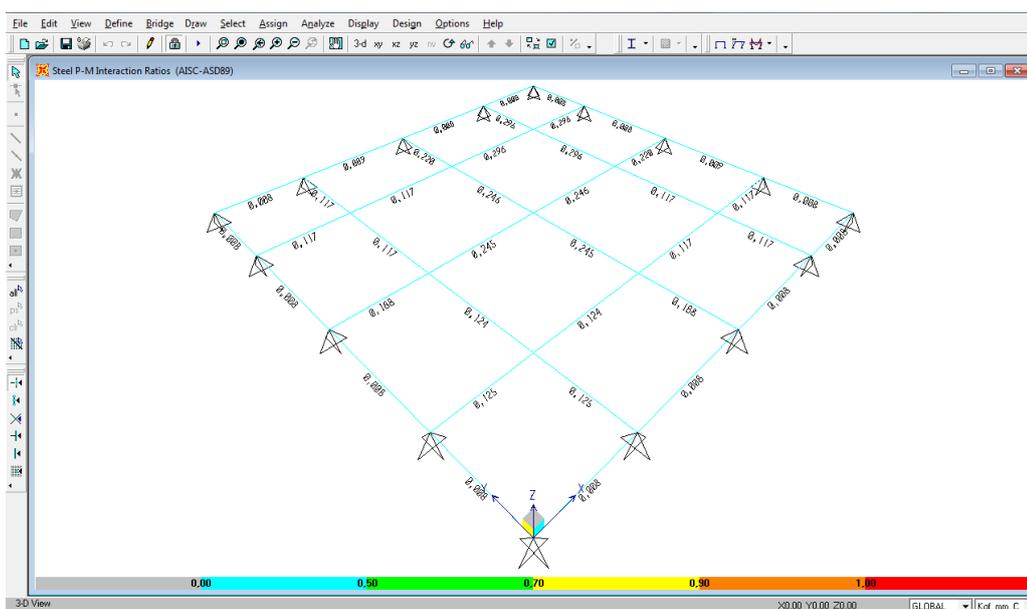
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
61	CARGASCOBINADAS	Combination	-1,175E-15	5,472E-17	-7,33847	-0,000119	0,000119	0
79	CARGASCOBINADAS	Combination	1,688E-15	7,106E-17	-5,246049	0,002983	-0,002983	0
63	CARGASCOBINADAS	Combination	-7,319E-16	-5,518E-17	-4,778298	-0,001313	-0,004231	-1,059E-20
77	CARGASCOBINADAS	Combination	2,641E-15	2,335E-17	-4,778298	0,004231	0,001313	0
59	CARGASCOBINADAS	Combination	-6,389E-16	-5,518E-17	-4,600028	0,000205	0,004181	1,059E-20
69	CARGASCOBINADAS	Combination	2,641E-15	-2,355E-17	-4,600028	-0,004181	-0,000205	0
67	CARGASCOBINADAS	Combination	1,168E-15	-7,074E-17	-3,614817	-0,002686	0,002686	0
71	CARGASCOBINADAS	Combination	1,688E-15	-7,066E-17	-3,311805	-0,002437	-0,002601	0
75	CARGASCOBINADAS	Combination	1,168E-15	7,115E-17	-3,311805	0,002601	0,002437	0
1	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	-0,000019	0,000019	1,606E-19
8	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	-0,000019	-0,000018	2,318E-19
16	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	0,000002	-0,000002	-2,282E-19
24	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	0,000018	0,000019	-1,642E-19
33	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	0,004289	0,000002764	5,912E-19
40	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	-0,004746	0,000004821	-5,898E-19
41	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	0,005762	0,000006932	1,812E-18
48	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	-0,005499	-0,000001084	-1,812E-18
49	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	0,007287	-0,000005803	9,518E-19
56	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	-0,00437	-0,000004346	-9,532E-19
57	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	0,000001084	0,005499	-4,63E-20
64	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	-0,000006932	-0,005762	4,63E-20
65	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	-0,000004821	0,004746	-6,746E-20
72	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	-0,000002764	-0,004289	0
73	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	0,000004346	0,00437	8,069E-20
70	CARGASCOBINADAS	Combination	0	0	0	0,000005803	-0,007287	-1,793E-20

Figura 76 . Resultados del análisis en el software (segundo caso).



**Figura 77. Deformación máxima en el punto medio de la estructura (segundo caso).**

En este caso el valor de la razón de esfuerzo máximo es de 0,296, no excede la unidad y se indica para cada uno de los perfiles analizados en la figura 78.



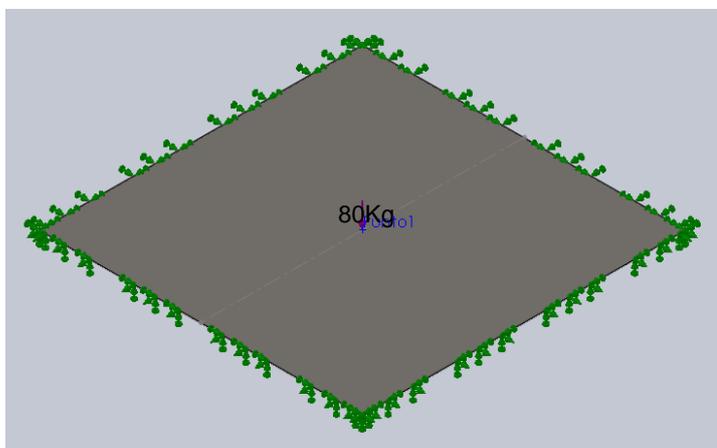
**Figura 78. Razón de esfuerzo en los perfiles estructurales (segundo caso).**

Si se toma en cuenta los resultados que nos proporciona el software ( $y = -8,49\text{mm}$ ), en el centro de la estructura considerando que es la parte más crítica del techo, y se lo compara con el valor de la deformación que se calculó de forma manual en el apartado 4.2.1 ( $y = -5,80\text{mm}$ ), se verifica que hay una diferencia de  $2,69\text{mm}$  debido entre otras cosas el no tomar en cuenta la temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$  en el cálculo manual.

Esta deformación no afectará en el arreglo de la lana de vidrio AW con la manta de fibra cerámica, ya que una de las propiedades de estos materiales es su buena flexibilidad.

#### 4.2.2.1 Simulación de deformación en la chapa metálica del techo en un software.

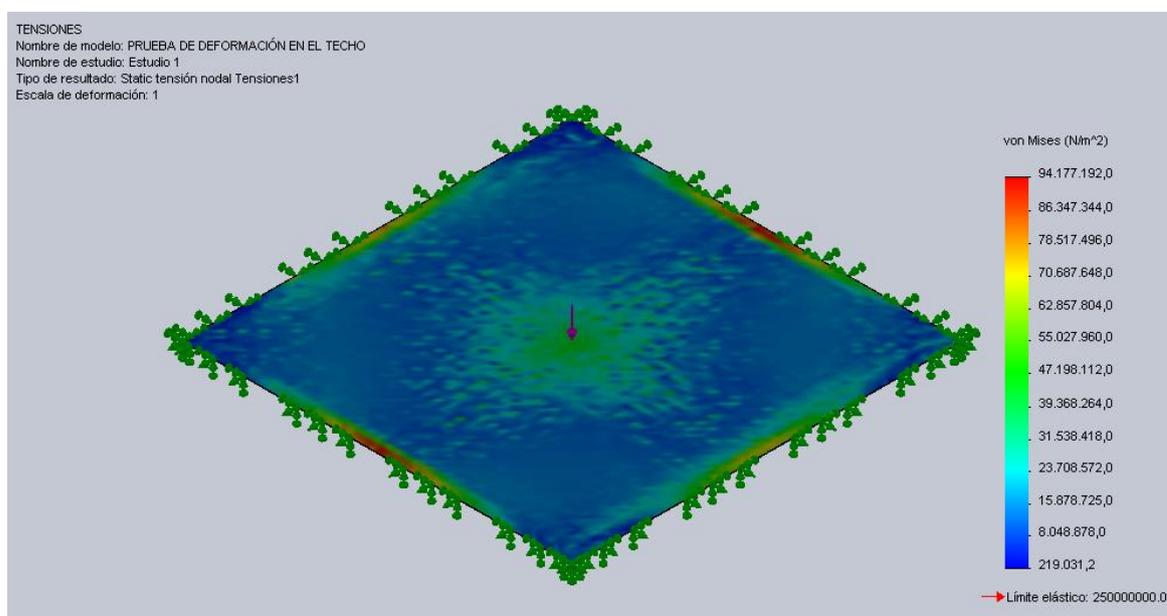
La chapa de acero de  $1220 \times 1220 \times 2\text{mm}$ , ha sido sometida a un peso, en el centro de la misma, de  $80\text{Kg}$  que representa el peso de una persona.



**Figura 79. Peso de  $80\text{Kg}$  en chapa de acero.**

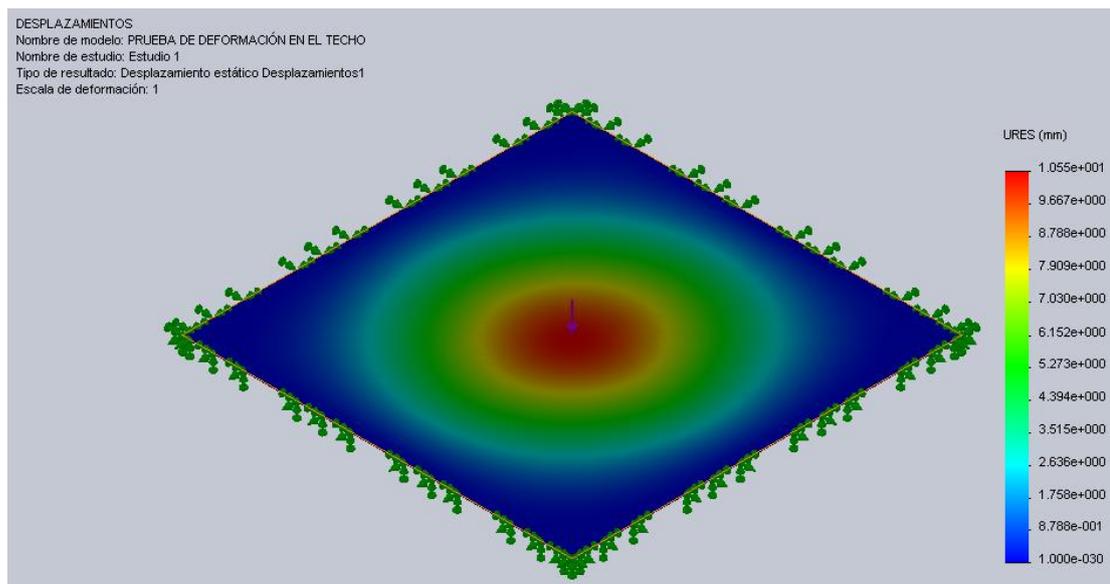
## Resultados.

El esfuerzo máximo que soportará la chapa de acero será  $94177192 \text{ N/m}^2$  siendo el límite elástico de la misma de  $250000000 \text{ N/m}^2$ ; la simulación hecha en el software se presenta en la figura 80, el resultado muestra que la chapa soporta los requerimientos de trabajo en este diseño y los desplazamientos que realice con el peso no serán permanentes, volviendo a su forma normal cuando esté libre de éste.



**Figura 80. Tensiones de Von Mises de la chapa de acero.**

El desplazamiento máximo será  $10,5\text{mm}$  (Figura 81); esta deformación es aceptable considerando que la forma de anclaje de la lana de vidrio y la fibra cerámica en forma de manta, permitirán estos movimientos; sin embargo se recomienda, que la forma de desplazarse por el techo sea sobre los perfiles IPE 100 u OMEGA o cerca de ellos.



**Figura 81. Desplazamiento de la chapa de acero.**

#### **4.3 Paredes del horno.**

Los elementos de gran importancia para que las paredes permanezcan rígidas, son las columnas y es por ello que debemos garantizar que en la columna no exista pandeo.

A la columna se la define como un miembro esbelto relativamente largo cargado a compresión [26] página 604.

La tendencia de un miembro a pandearse se mide por lo general con la relación de esbeltez que se define como la relación entre la longitud efectiva y su radio de giro mínimo. Entre mayor es la relación de esbeltez menor es la capacidad de carga de la columna. Columnas muy esbeltas resultan inestables bajo esfuerzos muy pequeños.

$$SR = \frac{KL}{r} = \frac{l_e}{r} \quad 4.8$$

Donde:

$SR$  = Relación de esbeltez.

$K$  = Factor de fijación en los extremos.

$L$  = Longitud real de la columna entre los puntos de apoyo o de restricción lateral.

$l_e = KL$ , Longitud efectiva, se toma en cuenta la manera de fijar los extremos.

$r$  = Radio de giro mínimo de la sección transversal de la columna.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad 4.9$$

Donde:

$I$  = Momento de inercia de la sección transversal de la columna con respecto a uno de los ejes principales.

$A$  = Área de la sección transversal.

El factor de fijación de los extremos mide el grado al cual cada extremo de la columna está limitado contra rotación, en nuestro caso los extremos son fijos y el valor teórico del factor de fijación es  $K= 0,5$ , el cual indica que la columna actúa como si fuera sólo la mitad de larga de lo que realmente es; se requiere que la conexión a la columna sea rígida y que la estructura a la que transfieren las cargas también sea rígida, por esta razón en la práctica se recomienda el valor más alto de  $K= 0,65$  [26] página 606.

La columna en análisis será de un perfil Omega de 2mm de espesor, cuyas especificaciones técnicas se detallan en el anexo K.

Se calcula entonces la relación de esbeltez, para lo cual es necesario calcular primero el radio de giro:

$$r = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{11,199 \text{ cm}^4}{3,21 \text{ cm}^2}}$$

$$r = 1,87 \text{ cm}$$

$$SR = \frac{(0,65)(215 \text{ cm})}{1,87 \text{ cm}} = 74,82$$

Para determinar si la columna del presente diseño es larga o corta, se requiere determinar la relación de esbeltez de transición o constante de la columna  $C_c$ , y comparar con el valor de la relación de esbeltez obtenida anteriormente.

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad 4.10$$

Donde:

$C_c$  = Relación de esbeltez de transición.

$E$  = es el módulo de elasticidad del material.

$S_y$  = es el límite de fluencia del material.

Reemplazando valores se tiene que:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 (2 \times 10^{11} \text{ Pa})}{248 \times 10^6 \text{ Pa}}}$$

$$C_c = 126,16$$

Por lo tanto  $SR < C_c$ , entonces la columna se considera corta y para analizarla se deberá utilizar la fórmula de J. B. Johnson o la fórmula de esfuerzo de compresión directa, definida continuación:

$$P_{cr} = AS_y \left[ 1 - \frac{S_y \left(\frac{l_e}{r}\right)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad 4.11$$

Donde:

$P_{cr}$  = Es la carga a la cual ocurre el pandeo, se conoce como carga de pandeo crítica.

$$P_{cr} = (3.21 \text{ cm}^2)(248 \times 10^6 \text{ Pa}) \left[ 1 - \frac{(248 \times 10^6 \text{ Pa})(74,82)^2}{4\pi^2 (2 \times 10^{11} \text{ Pa})} \right]$$

$$P_{cr} = (3.21 \text{ cm}^2)(248 \times 10^6 \text{ Pa})[0,8241672486]$$

$$P_{cr} = (3.21 \text{ cm}^2)(2530,61 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2})[0,824]$$

$$P_{cr} = 6694,92 \text{ kgf}$$

La carga real que se aplica a la columna debe ser mucho menor que  $P_{cr}$ , para que no ocurra el pandeo, entonces la rigidez de la columna será suficiente para

resistir esta deformación y mantener la rectitud de la columna, dicha carga se denomina  $P_a$ , carga permisible.

$$P_a = \frac{P_{cr}}{n} \quad 4.12$$

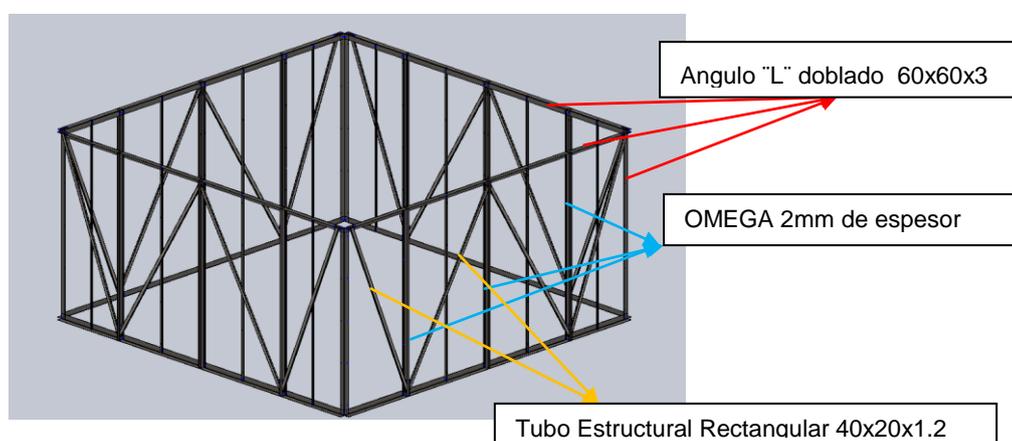
$n$  = Es el coeficiente de seguridad. Se asume un  $n=3$ . [26] página 614.

$$P_a = \frac{6694,92 \text{ kgf}}{3}$$

$$P_a = 2231,64 \text{ kgf}$$

La carga que se aplicará sobre las columnas es menor a la " $P_a$ "; por ende la estructura soportará plenamente. Para detallar de mejor manera el análisis de la estructura que sujetarán las paredes del horno, se ha simulado en un software las cargas que ésta soporta.

#### 4.3.1 Simulación de la estructura del horno en un software.



**Figura 82. Estructura del horno.**

**CARGAS:**

- Carga distribuida

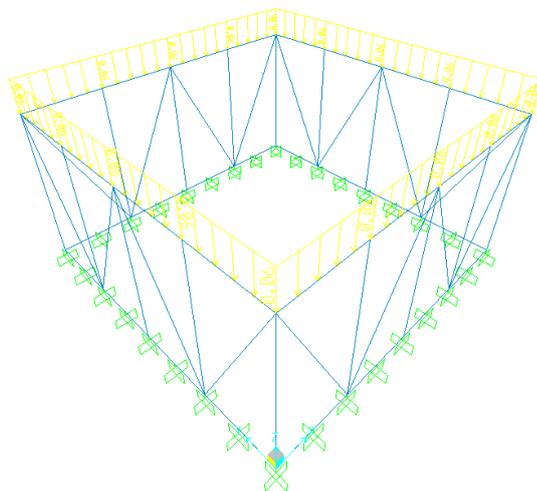
El peso del techo es de aproximadamente 762.51Kg. Para el estudio de la estructura se supondrá un peso del techo de 1000Kg; éste peso será soportado por los cuatro perfiles L 60x60x3 de la parte superior de la estructura y distribuido a la misma, por lo tanto:

$$P_{PERFIL} = \frac{1000kg}{4} = 250Kg$$

La longitud de cada perfil L 60x60x3 es de 4249,60mm. La carga sería:

$$Q_{PERFIL} = \frac{250Kg}{4249,60mm} = 0,0588 \frac{Kg}{mm} \approx 0,06 \frac{Kg}{mm}$$

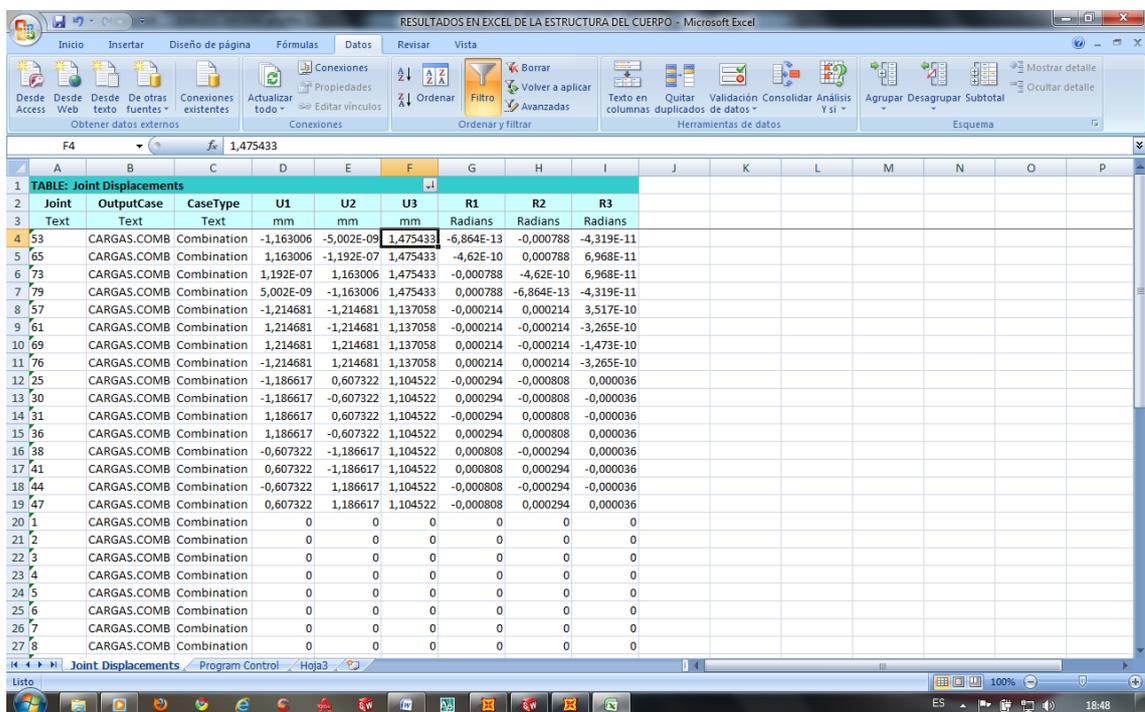
- Térmica: temperatura máxima en las paredes exteriores del horno, 50°C.



**Figura 83. Carga aplicada a la estructura.**

## Resultados del análisis del software para la deformación máxima en la estructura del horno.

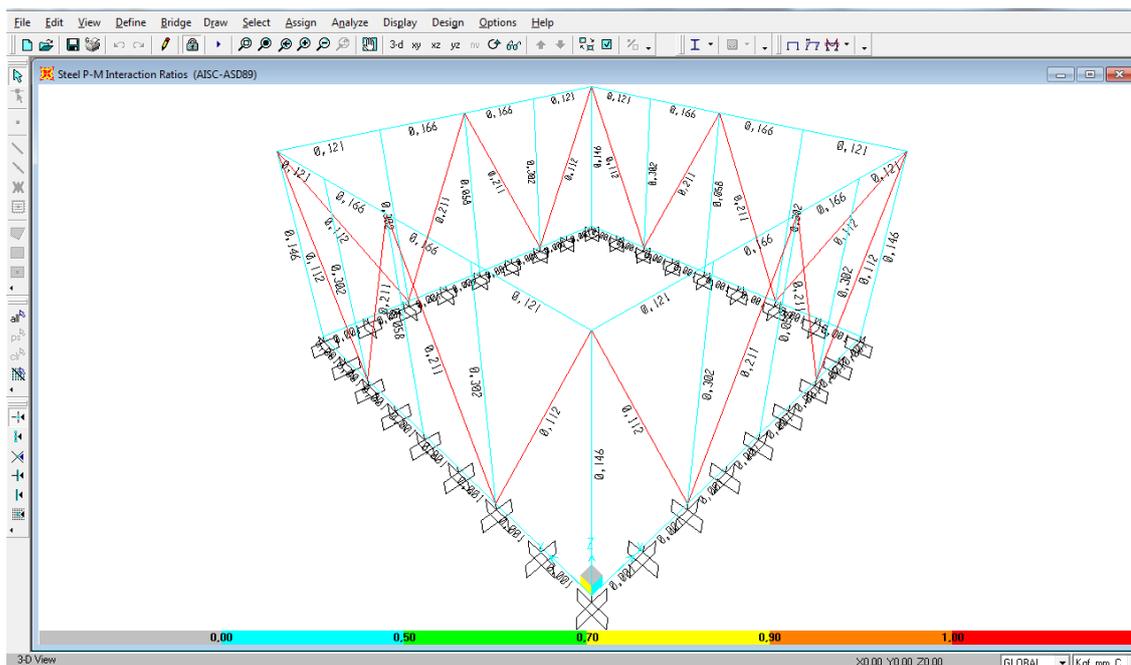
Se pueden visualizar en una hoja de cálculo de Excel donde se muestran los valores del resultado del análisis que se exportan desde el software; la deformación máxima es de 1,475mm en dirección positiva.



Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	mm	mm	mm	Radians	Radians	Radians
53	CARGAS.COMB	Combination	-1,163006	-5,002E-09	1,475433	-6,864E-13	-0,000788	-4,319E-11
65	CARGAS.COMB	Combination	1,163006	-1,192E-07	1,475433	-4,62E-10	0,000788	6,968E-11
73	CARGAS.COMB	Combination	1,192E-07	1,163006	1,475433	-0,000788	-4,62E-10	6,968E-11
79	CARGAS.COMB	Combination	5,002E-09	-1,163006	1,475433	0,000788	-6,864E-13	-4,319E-11
57	CARGAS.COMB	Combination	-1,214681	-1,214681	1,137058	-0,000214	0,000214	3,517E-10
61	CARGAS.COMB	Combination	1,214681	-1,214681	1,137058	-0,000214	-0,000214	-3,265E-10
69	CARGAS.COMB	Combination	1,214681	1,214681	1,137058	0,000214	-0,000214	-1,473E-10
76	CARGAS.COMB	Combination	-1,214681	1,214681	1,137058	0,000214	0,000214	-3,265E-10
25	CARGAS.COMB	Combination	-1,186617	0,607322	1,104522	-0,000294	-0,000808	0,000036
30	CARGAS.COMB	Combination	-1,186617	-0,607322	1,104522	0,000294	-0,000808	-0,000036
31	CARGAS.COMB	Combination	1,186617	0,607322	1,104522	-0,000294	0,000808	-0,000036
36	CARGAS.COMB	Combination	-1,186617	-0,607322	1,104522	0,000294	0,000808	0,000036
38	CARGAS.COMB	Combination	-0,607322	-1,186617	1,104522	0,000808	-0,000294	0,000036
41	CARGAS.COMB	Combination	0,607322	-1,186617	1,104522	0,000808	0,000294	-0,000036
44	CARGAS.COMB	Combination	-0,607322	1,186617	1,104522	-0,000808	-0,000294	-0,000036
47	CARGAS.COMB	Combination	0,607322	1,186617	1,104522	-0,000808	0,000294	0,000036
1	CARGAS.COMB	Combination	0	0	0	0	0	0
2	CARGAS.COMB	Combination	0	0	0	0	0	0
3	CARGAS.COMB	Combination	0	0	0	0	0	0
4	CARGAS.COMB	Combination	0	0	0	0	0	0
5	CARGAS.COMB	Combination	0	0	0	0	0	0
6	CARGAS.COMB	Combination	0	0	0	0	0	0
7	CARGAS.COMB	Combination	0	0	0	0	0	0
8	CARGAS.COMB	Combination	0	0	0	0	0	0

Figura 84. Resultado del análisis de la estructura del horno.

Según éste análisis se puede concluir que los perfiles soportan perfectamente la carga del techo y la carga térmica.



**Figura 85. Razón de esfuerzo en los perfiles de la estructura del horno.**

La razón de esfuerzo es de 0,302 siendo la máxima permitida de 1; esto nos indica que los perfiles analizados no están sobre diseñados para el servicio que se le quiere dar en éste caso (figura 85).

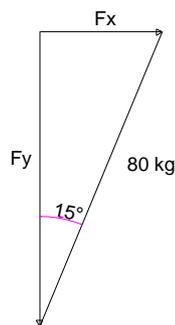
#### **4.3.2 Simulación de deformación en la chapa de la pared del horno en un software.**

Considerando que en algún momento una persona puede apoyarse en la pared del horno, se ha realizado el análisis de deformación que se provoca en dicha situación.

La cara de la pared del horno consta de cuatro chapas metálicas y se realizará el estudio a una de ellas cuyas medidas son 2030x1220x2mm; sobre la cual está un

perfil estructural cuadrado de 20x1,2mm verticalmente en el centro (figura 87), que ayuda a soportar a la chapa de acero.

La fuerza que una persona provoca al arrimarse en una pared será aproximadamente de 21Kg según el siguiente análisis:



**Figura 86. Diagrama de fuerzas.**

Los 80 kg representa el peso promedio de una persona.

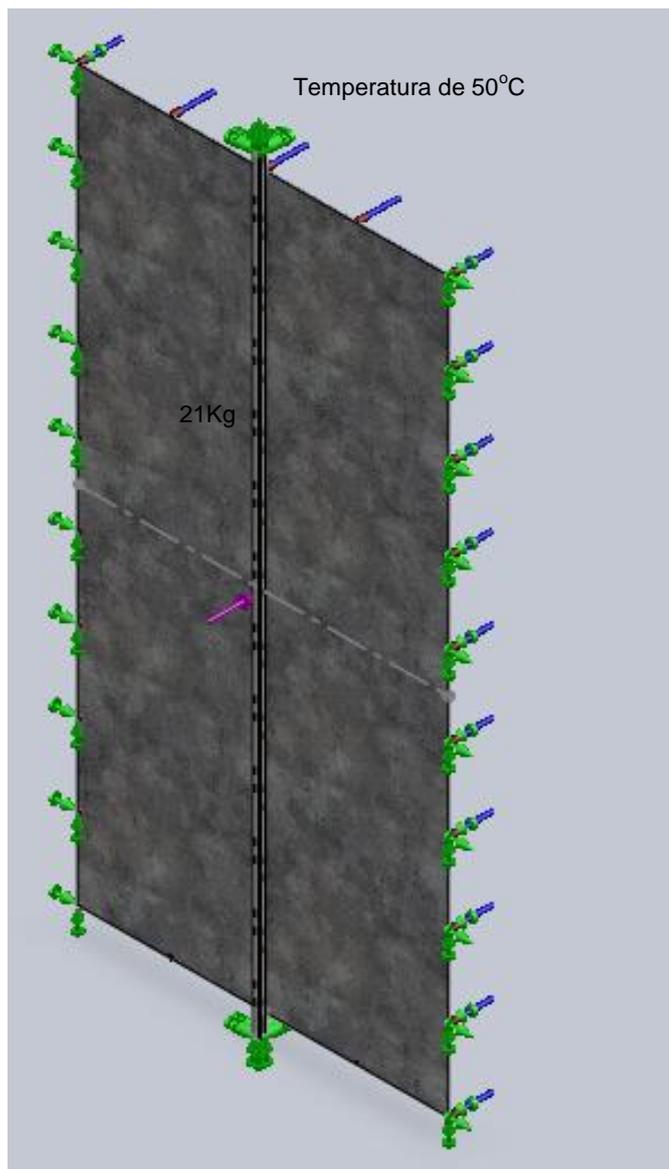
Fx: componente en el eje x, representa la fuerza sobre la pared.

Fy: componente en el eje y.

$$F_x = 80 \text{ kg} * \text{sen } 15^\circ$$

$$F_x = 20,7 \text{ kg}$$

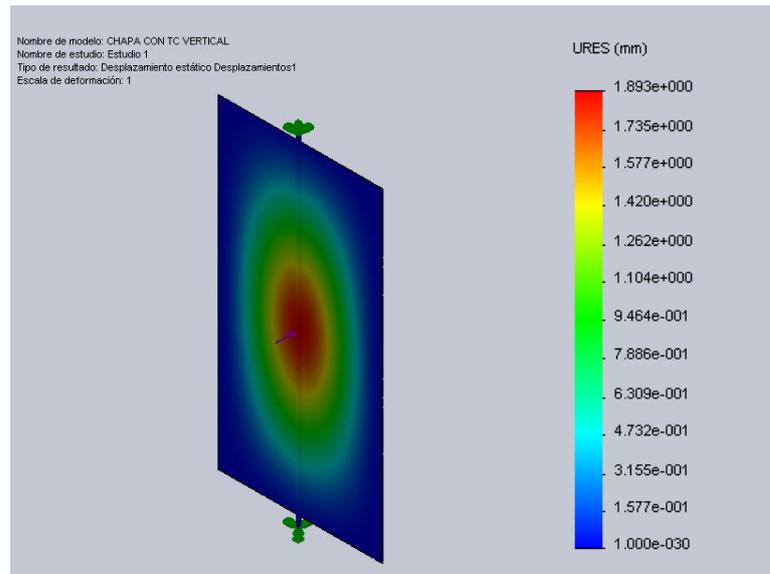
La temperatura máxima en la chapa de acero será 50°C; la figura 87, muestra gráficamente el caso de análisis.



**Figura 87. Cargas en la chapa de la pared del horno**

### **Resultados.**

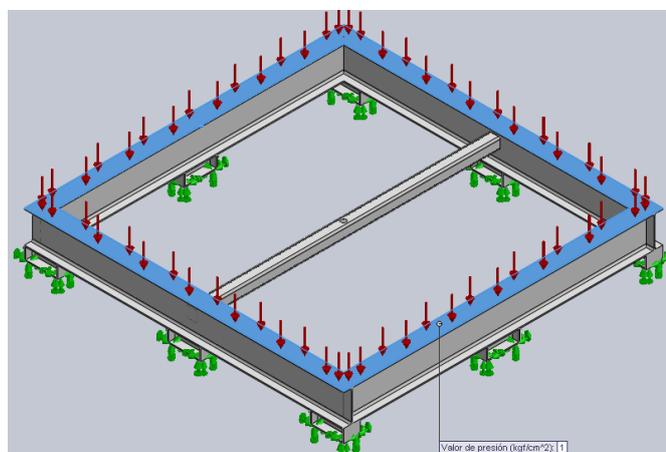
La chapa de acero junto al tubo cuadrado presentará una deformación de 1,89mm; por lo tanto la disposición de la chapa y el perfil son adecuados. En la figura 88, se muestra los resultados del software.



**Figura 88. Desplazamiento de la pared del horno.**

#### **4.4 Simulación de la base donde descansará el rodete.**

La base de descanso del rodete será de forma cuadrada con medidas de 2870mm y se colocará sobre la solera del horno, apoyada por ocho patas de 100mm de altura, construida de perfil IPE 300. Figura 89.

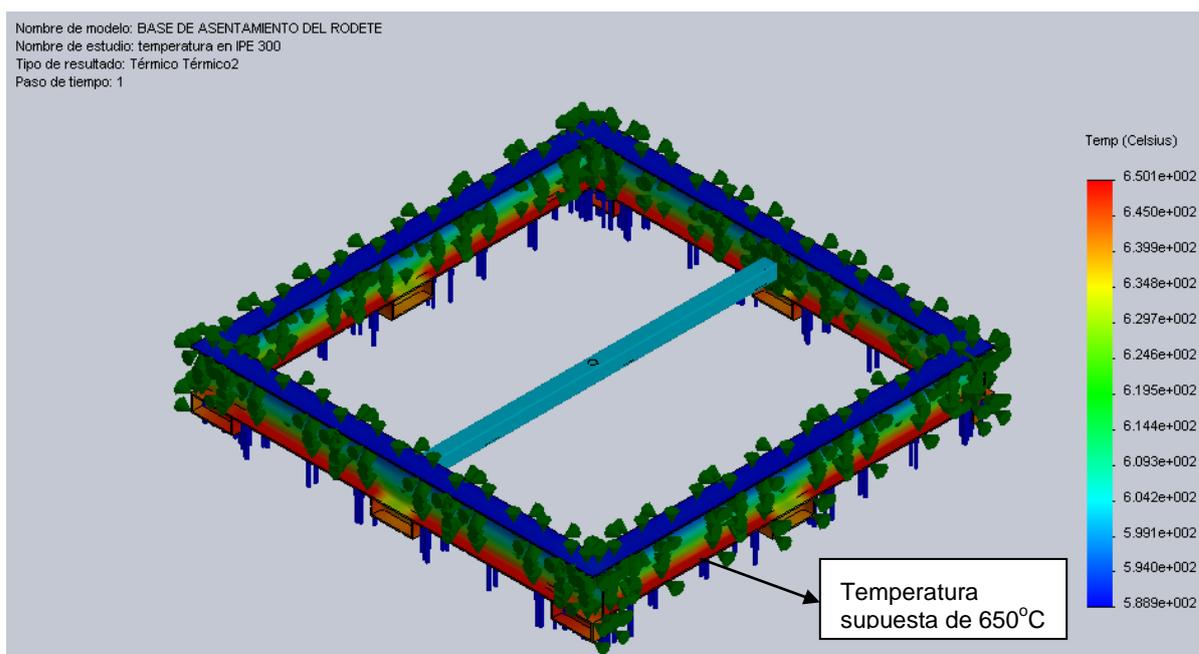


**Figura 89. Base de descanso del rodete.**

Este estudio se realizó con el objetivo de verificar mediante un software, que la temperatura de la parte superior del perfil IPE 300 no supere los 590°C que es la temperatura máxima de tratamiento térmico.

Para el estudio se consideró una temperatura supuesta de 650°C en la cara inferior del perfil IPE 300 y para las caras restantes se tomó en cuenta un ambiente convectivo con un  $h = 10 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  y una temperatura ambiente de 585°C.

En la figura 90, se observa por medio del código de colores que la parte superior del perfil IPE 300 tendrá una temperatura de 588°C, sin superar la temperatura máxima de tratamiento térmico de 590°C, por lo tanto este perfil y su altura de separación con respecto de las resistencias, no afectarán en el tratamiento térmico del rodete.



**Figura 90. Resultados de Temperaturas en la base donde descansará el rodete.**

Es importante determinar, si la base donde posará el rodete soporta el peso de 17000 Kg a la temperatura de tratamiento térmico.

El estudio que se ha realizado en un Software con las propiedades del Acero estructural ASTM A36 a temperaturas altas (Anexo L), mostrará la deformación que se producirá en la base que soportará al rodete.

Para el análisis de la base, se ha utilizado las propiedades mecánicas a una temperatura de 600°C con los siguientes parámetros:

- Peso del rodete de 17 toneladas, que será distribuido en el área superior del perfil IPE 300.

$$Presión = \frac{F [Kgf]}{A [cm^2]} \quad 4.13$$

Donde:

$F$  = Es el peso del rodete.  $Fuerza = 17000 [Kgf]$

$A$  = Es el area de aplastamiento.  $Área = 4 * 15 [cm] * 287 [cm] = 17220 [cm^2]$

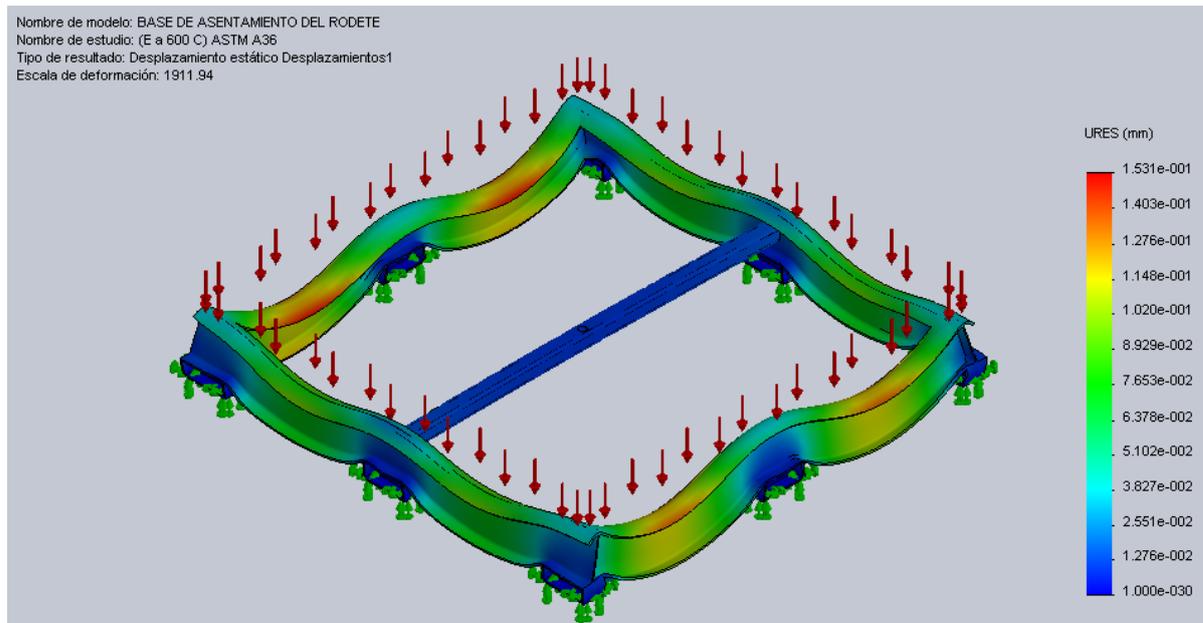
Entonces se tiene:

$$Presión = \frac{17000kgf}{17220cm^2} = 0,987 \frac{Kgf}{cm^2} \approx 1 \frac{Kgf}{cm^2}$$

- Modulo elástico a 600 °C, reducido aproximadamente un 70% de su resistencia normal.

$$E_{600^{\circ}C} = 200[GPa] * 0,3 = 6 \times 10^{10} [Pa]$$

En la figura 91, se presentan los resultados del análisis en donde la máxima deformación será de  $1,531 \times 10^{-1} mm = 0,1531 mm$ .



**Figura 91. Resultados de la deformación de la base del rodete.**

Los resultados tanto térmico como mecánico, muestran que se puede utilizar el perfil IPE 300 como mesa de descanso del rodete durante el tratamiento térmico.

## CAPÍTULO V

### 5 CONTROL AUTOMÁTICO DEL HORNO.

#### 5.1 Conexión y Disposición de las Resistencias Eléctricas

En los hornos eléctricos de resistencia, la potencia eléctrica absorbida por los elementos, es disipada en forma de calor hacia el medio (cámara); esta transformación de energía eléctrica en calor, se basa en el efecto Joule.

Una corriente eléctrica de intensidad  $I$  (Amperios) que circula por un conductor de resistencia  $R$  (Ohmios) produce una disipación de calor. El equivalente térmico de la entrada en Kw de los elementos es igual al consumo del calor del horno.

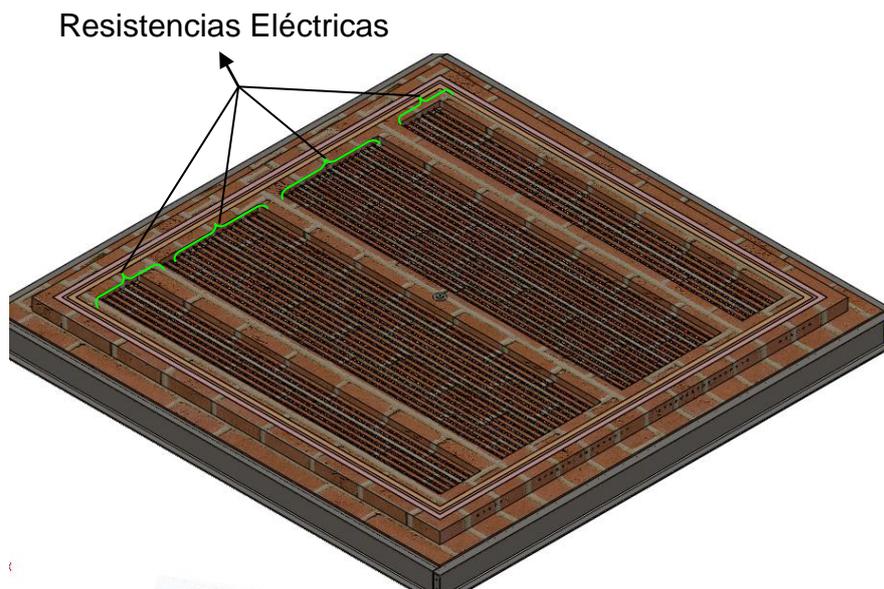
Hay que tener en cuenta la potencia y el voltaje con el que deben alimentarse éstos elementos de calefacción.

Los datos con los que dispone el horno para trabajar son:

$$P = 270 \text{ kw}$$

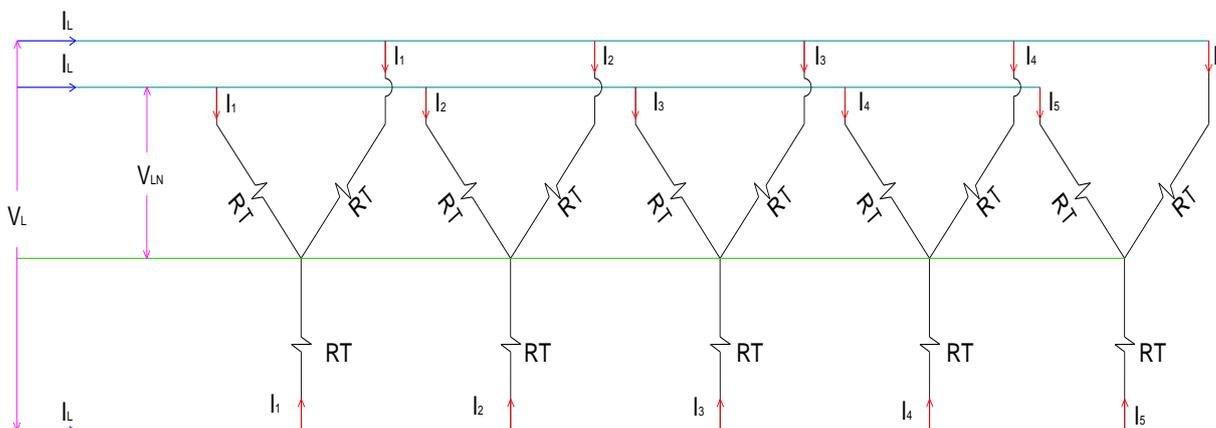
$$V = 480 \text{ V}$$

La disposición de las resistencias en el horno será sobre la solera, se muestra en la siguiente figura:



**Figura 92. Disposición de las resistencias en el horno.**

La conexión trifásica de las resistencias se realizará en estrella. Y por cada fase se conectarán en paralelo tres resistencias eléctricas.



**Figura 93. Representación del circuito trifásico para las resistencias.**

Para el caso de las conexiones trifásicas tenemos las siguientes ecuaciones:

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \phi \quad 5.1$$

Donde:

$P$  = Es la potencia real, en W.

$V_L$  = Es el voltaje de línea a línea, en V.

$I_L$  = Es la corriente de línea, en Amp.

$\phi$  = Ángulo de fase y es igual a cero porque entre la corriente y la resistencia no hay ángulo de desfase.

$$V_{LN} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad 5.2$$

Donde:

$V_{LN}$  = Es el voltaje de línea a neutro, y corresponde también al voltaje de carga.

$$V_{LN} = \frac{480V}{\sqrt{3}} = 277,128 V$$

$$I_L = \frac{P}{V * \sqrt{3}}$$

$$I_L = \frac{270kw}{(480V) * \sqrt{3}} = 324,759 Amp$$

Para cada conexión en estrella se calculará la corriente de línea:

$$I_{RT} = I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = \frac{I_L}{5}$$

$$I_{RT} = \frac{324,759 \text{ Amp}}{5} = 64,9519 \text{ Amp}$$

En cada fase se tendrá tres resistencias conectadas en paralelo, entonces para cada uno de ellas se tendrá los siguientes datos:

$$I_{R1} = I_{R2} = I_{R3} = \frac{I_{RT}}{3} = \frac{64,9519 \text{ Amp}}{3} = 21,65 \text{ Amp}$$

$$R_T = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad 5.3$$

Sí  $R_1 = R_2 = R_3$ , se tiene:

$$R_T = \frac{3}{R_1}$$

El valor de  $R_T$  es:

$$R_T = \frac{V_{LN}}{I_{RT}} = \frac{277,128 \text{ V}}{64,9519 \text{ Amp}}$$

$$R_T = 4,26 \Omega$$

La potencia de cada resistencia será:

$$P_{R1} = P_{R2} = P_{R3} = V_{R1} * I_{R1} = (277,128 V)(21,65 Amp) = 6000 W$$

$$P_{R1} = I^2 * R_1 \quad 5.4$$

$$R_1 = \frac{P_{R1}}{I^2} = \frac{6000 W}{(21,65 Amp)^2} = 12,8 \Omega$$

### 5.1.1 Selección de las Resistencias

Existen aleaciones muy numerosas para tal finalidad, y hay que considerar algo muy importante como son las temperaturas máximas de trabajo indicadas por el fabricante, la mismas que no hay que confundirlas con las temperaturas reinantes en el horno.

El tipo de resistencias seleccionadas que se dispondrá sobre la solera del horno son de alambre metálico y el material empleado en su fabricación es la aleación de base Ni-Cr.

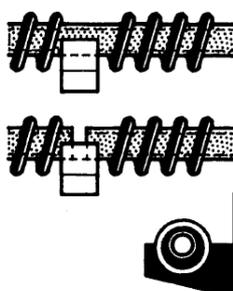
De todas ellas la más utilizada en resistencias de hornos eléctricos es 80Ni-20Cr [27]. Tiene una gran resistencia a la oxidación en caliente y sus características mecánicas son muy buenas a temperaturas elevadas, permite grandes variaciones de temperatura.

Las características principales de este tipo de resistencia se recogen en la tabla del anexo M.

Evidentemente, la característica más importante de una aleación para resistencia es la resistividad eléctrica que varía sensiblemente con la temperatura; el anexo M indica estos valores.

La resistencia de alambre se enrollará en espiral sobre tubos cerámicos.

Esta disposición permite una radiación térmica bastante libre de la resistencia lo que, para la misma carga específica, supone un menor gradiente de temperatura entre resistencia y horno.



**Figura 94. Alambre en espiral sobre tubos.**

Para calcular el diámetro de la resistencia se utiliza las siguientes ecuaciones:

Resistencias eléctricas a 20 °C de longitud 1cm.

$$R_{20} = \rho \frac{4L}{\pi d^2} \quad [\Omega] \quad 5.5$$

Donde:

$\rho =$  Es la resistividad en  $\Omega cm$  .

$\rho = 112 \mu\Omega cm$  . Anexo M.

Resistencia eléctrica a la temperatura  $T$  °C de las resistencias:

$$R_T = C_t R_{20} [\Omega] \quad 5.6$$

Donde:

$C_t =$  Es el coeficiente de resistividad.

Para la temperatura de 800 °C,  $C_t = 1,018$ ; anexo M.

Superficie radiante de las resistencias:

$$A_c = \pi dL [cm^2] \quad 5.7$$

La carga específica es un dato fundamental en las resistencias que, para unas disposiciones de las mismas determina la diferencia de temperatura entre las resistencias y la carga a calentar en el interior del horno.

$$P = A_c p [W] \quad 5.8$$

Donde:

$p =$  Carga específica en  $[W/cm^2]$

Según la disposición de la resistencia,  $p = 4 \frac{W}{cm^2}$  de acuerdo a la gráfica del anexo N, para un alambre enrollado en espiral sobre tubos cerámicos y a una temperatura de  $800\text{ }^{\circ}C$ .

Sí  $P = I^2 R = \frac{V^2}{R}$  y con las ecuaciones anteriores, se puede obtener la ecuación

que permite calcular el diámetro de la resistencia.

$$P = \frac{\pi d^2 V^2}{4 L C_t \rho} = \frac{\pi d^2 V^2}{4 C_t \rho \frac{P}{\pi p d}} = \frac{p d^3 \pi^2 V^2}{4 C_t \rho P}$$

Donde:

$d =$  Es el diámetro del alambre.

$$d^3 = \frac{4 C_t \rho P^2}{p \pi^2 V^2}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4(1,018)(0,00011\text{ cm}\Omega)(6000\text{ W})^2}{\left(4 \frac{W}{cm^2}\right) \pi^2 (277,128\text{ V})^2}}$$

$$d = 0,1756\text{ cm}$$

$$d = 1,756 \text{ mm} \quad (0,072 \text{ in})$$

En las tablas del anexo O, se indica la corriente para cada calibre del alambre en función de la temperatura para la resistencia 80Ni-20Cr.

Entonces se compara con el diámetro que se ha calculado y le corresponde a un calibre 13 cuyo diámetro es  $d = 1,83 \text{ mm}$ , cuya resistencia por unidad de longitud es  $\frac{\Omega}{m} = 0,417$ .

Longitud del alambre.

Utilizando la ecuación 5.8 se calcula la longitud del alambre.

$$P = A_c p \quad [W]$$

$$P = (\pi d L) p$$

$$L = \frac{P}{(\pi d) p} = \frac{6000 W}{\pi(0,183 \text{ cm}) \left( 4 \frac{W}{\text{cm}^2} \right)} = 2609,04 \text{ cm} = 26,09 \text{ m}$$

Pero hay que tener en cuenta la resistencia por unidad de longitud que tiene el alambre, lo cual nos permite calcular también la longitud del alambre, entonces se tiene que:

$$L = \frac{R_T}{\frac{\Omega}{m}} = \frac{12,8\Omega}{0,417\frac{\Omega}{m}}$$

$$L = 30,69m$$

Será entonces  $L = 30,69m$  la longitud real necesaria para la elaboración de la resistencia.

Diámetro de la espiral.

Se considera que para hornos con temperaturas menores a  $1000^{\circ}\text{C}$ , la relación  $\frac{D}{d}$  puede estar el rango de 5-6, por lo tanto tenemos:

$$\frac{D}{d} = 6, \text{ donde: } D \text{ es el diámetro externo del tubo cerámico, y } d \text{ es el diámetro}$$

del alambre.

$$D = 6d$$

$$D = (6)(1,83mm) = 10,98mm$$

Este diámetro de la espiral nos indica que diámetro debo de seleccionar para los tubos refractarios.

El fabricante de los tubos refractarios [28] nos indica que existe un diámetro de  $D = 1/2"$ , Por lo tanto el diámetro externo del tubo cerámico será  $D = 12,7mm$ .

Número de espiras.

El número de espira se calcula con la siguiente ecuación:

$$N = \frac{L}{\pi(D+d)}$$

$$N = \frac{3069cm}{\pi(1,27 + 0,183)cm}$$

$$N = 672,33$$

Paso de las espiras.

Se considera que el paso  $S$  debe ser por lo menos el doble del diámetro del alambre. La relación  $\frac{S}{d}$  puede estar el rango de 2-4, por lo tanto tenemos:

$$\frac{S}{d} = 3$$

$$S = 3d = (3)(1,83mm) = 5,5mm$$

Otra forma de calcular el paso  $S$  es, tomando en cuenta que se tiene la longitud de la donde se dispondrá la resistencia y el número de vueltas que tendrá la espira, entonces se tiene la siguiente expresión:

$$S = \frac{\text{Long. solera}}{N} = \frac{4000 mm}{672,33}$$

$$S = 5,95 \text{ mm} \approx 6 \text{ mm}$$

El paso  $S$  será de 6mm.

## 5.2 Sistemas automáticos de control.

Un sistema automático de control es un conjunto de componentes físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan su actuación por sí mismos, es decir sin intervención de agentes exteriores (incluido el factor humano), corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento.

En la actualidad los sistemas automáticos juegan un gran papel en muchos campos realizando aplicaciones innumerables.

Es necesario definir ciertos términos básicos.

- Variables del sistema: son todas las magnitudes, sometidas a vigilancia y control, que definen el comportamiento de un sistema (velocidad, temperatura, posición, etc.).
- Señal de salida: es la variable que se desea controlar, también se denomina variable controlada.
- Señal de referencia: es una señal de entrada conocida que nos sirve para calibrar al sistema, es el valor que se desea que alcance la señal de salida.
- Error: es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real.

- Señal de control: es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuya, o elimine, el error.
- Señal analógica: es una señal continua en el tiempo.
- Señal digital: es una señal que solo toma valores de 1 y 0. El PC solo envía y/o recibe señales digitales.
- Planta: es el elemento físico que se desea controlar. En nuestro caso es el horno.
- Proceso: operación que conduce a un resultado determinado.
- Sistema: consiste en un conjunto de elementos que actúan coordinadamente para realizar un objetivo determinado.
- Perturbación: es una señal que tiende a afectar la salida del sistema, desviándola del valor deseado.
- Sensor: es un dispositivo que convierte el valor de una magnitud física en una señal eléctrica codificada ya sea en forma analógica o digital. También es llamado transductor. Los sensores, o transductores, analógicos envían, por lo regular, señales normalizadas de 0 a 5 voltios, 0 a 10 voltios o 4 a 20 mA.

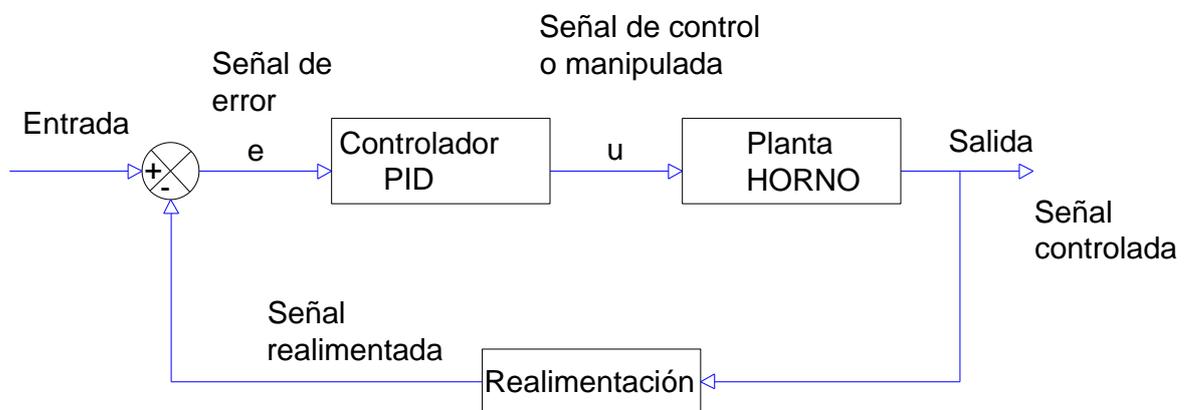
### **5.2.1 Representación de los sistemas de control.**

Los sistemas de control se pueden representar en forma de diagramas de bloques, en los que se ofrece una expresión visual y simplificada de las relaciones entre la entrada y la salida de un sistema físico.

A cada componente del sistema de control se le denomina elemento, y se representa por medio de un rectángulo.

Para nuestro caso tenemos un sistema de control en lazo cerrado y es aquel en el cual continuamente se está monitoreando la señal de salida para compararla con la señal de referencia y calcular la señal de error, la cual a su vez es aplicada al controlador para generar la señal de control y tratar de llevar la señal de salida al valor deseado. También es llamado control realimentado.

El diagrama de bloques correspondiente a un sistema de control en lazo cerrado es:



**Figura 95. Diagrama de bloque.**

El regulador o controlador es el elemento que determina el comportamiento del bucle, por lo que debe ser un componente diseñado con gran precisión. Es el cerebro del bucle de control.

Mientras que la variable controlada se mantenga en el valor previsto, el regulador no actuará sobre el elemento accionador. Pero si el valor de la variable se aleja del prefijado, el regulador modifica su señal, ordenando al accionador que actúe sobre la planta o proceso, en el sentido de corregir dicho alejamiento. El termostato del ejemplo anterior realizaría esta función.

Los sistemas en lazo cerrado son mucho menos sensibles a las perturbaciones que los de lazo abierto, ya que cualquier modificación de las condiciones del sistema afectará a la salida, pero este cambio será registrado por medio de la realimentación como un error que es en definitiva la variable que actúa sobre el sistema de control.

De este modo, las perturbaciones se compensan, y la salida se independiza de las mismas.

### **5.2.2 El control de acción PID.**

El PID (Proporcional - Integral - Derivativo) es un mecanismo de control por realimentación, que se utiliza en sistemas de control industriales.

Aprovecha las características de los tres reguladores [Proporcional - Integral - Derivativo], de forma, que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral y, si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa.

- Proporcional.- Determina la corrección proporcional al error actual.
- Integral.- Acumulación de los errores
- Derivativo.- Tiene en cuenta como varía el error con el tiempo (velocidad de reacción).

Tiene la ventaja de tener una respuesta más rápida y una inmediata compensación de la señal de error en el caso de cambios o perturbaciones.

La salida del regulador viene dada por la siguiente ecuación:

$$u = k_p e + k_i \int e dt + k_d \frac{de}{dt}$$

Donde:

$k_p$  = es la constante de proporcionalidad.

$k_i$  = es la constante integral.

$k_d$  = es la constante de derivativa.

En los sistemas de regulación resulta fundamental conocer cuál va a ser su respuesta ante una entrada determinada. Muchas veces es difícil obtener una relación que permita conocer en función del tiempo como va a responder el sistema ante un estímulo determinado. Para unificar el tratamiento teórico de sistemas tan

disparos como pueden ser una central térmica, etc, se utilizan unas herramientas matemáticas que nos simplifican los cálculos.

Una de esas herramientas se basa en reemplazar funciones de una variable real (tiempo, distancia, etc.) por otras funciones que dependen de una variable compleja. Una vez conocido el comportamiento del sistema en el dominio complejo, se puede pasar de nuevo al dominio del tiempo y de esta manera establecer cuál va a ser la respuesta en cualquier situación.

Esta técnica se conoce como transformada de LAPLACE, y es una herramienta matemática indispensable en la Regulación Automática.

### **Modelo matemático del Horno.**

Se puede escribir la ecuación del balance de energía para el horno:

*Calor que entra al sistema = incremento de calor en el sistema + calor perdido*

$$E = (m_1c_1 + m_2c_2) \frac{dT}{t} + hA(T - T_a)$$

Donde:

$m_1$  = masa del rodete.

$m_2$  = masa del horno.

$c_1$  = calor específico del material del rodete.

$c_2$  = calor específico del horno.

$T_a$  es la temperatura ambiente;  $A$  es el área superior del tanque y  $h$  es una constante que depende de la superficie y la temperatura ambiente.

Si se asume que la temperatura ambiente es constante, se tiene

$$T_q = (T - T_a)$$

Se puede escribir la ecuación de balance de energía como:

$$E = (m_1c_1 + m_2c_2) \frac{dT_q}{t} + hAT_q$$

Reemplazando  $k_1 = (m_1c_1 + m_2c_2)$  y  $k_2 = hA$ , y tomando la transformada de Laplace, se tiene:

$$\frac{T_q(S)}{E(s)} = \frac{1}{sk_1 + k_2}$$

La ecuación anterior describe un sistema de primer orden con constante de tiempo  $\frac{k_1}{k_2}$ . El sistema de control de temperatura siempre muestra un retardo ya que toma un tiempo finito para la temperatura media de elevación.

Es por ello que el controlador seleccionado para nuestro proceso es un controlador tipo PID, ya que la ecuación de nuestro proceso es de primer orden y sumando las ventajas que tiene este controlador es más que suficiente con respecto a otros equipos sofisticados para controlar nuestro proceso.

Entonces se presenta un diagrama de los elementos que integran la automatización para nuestro horno.

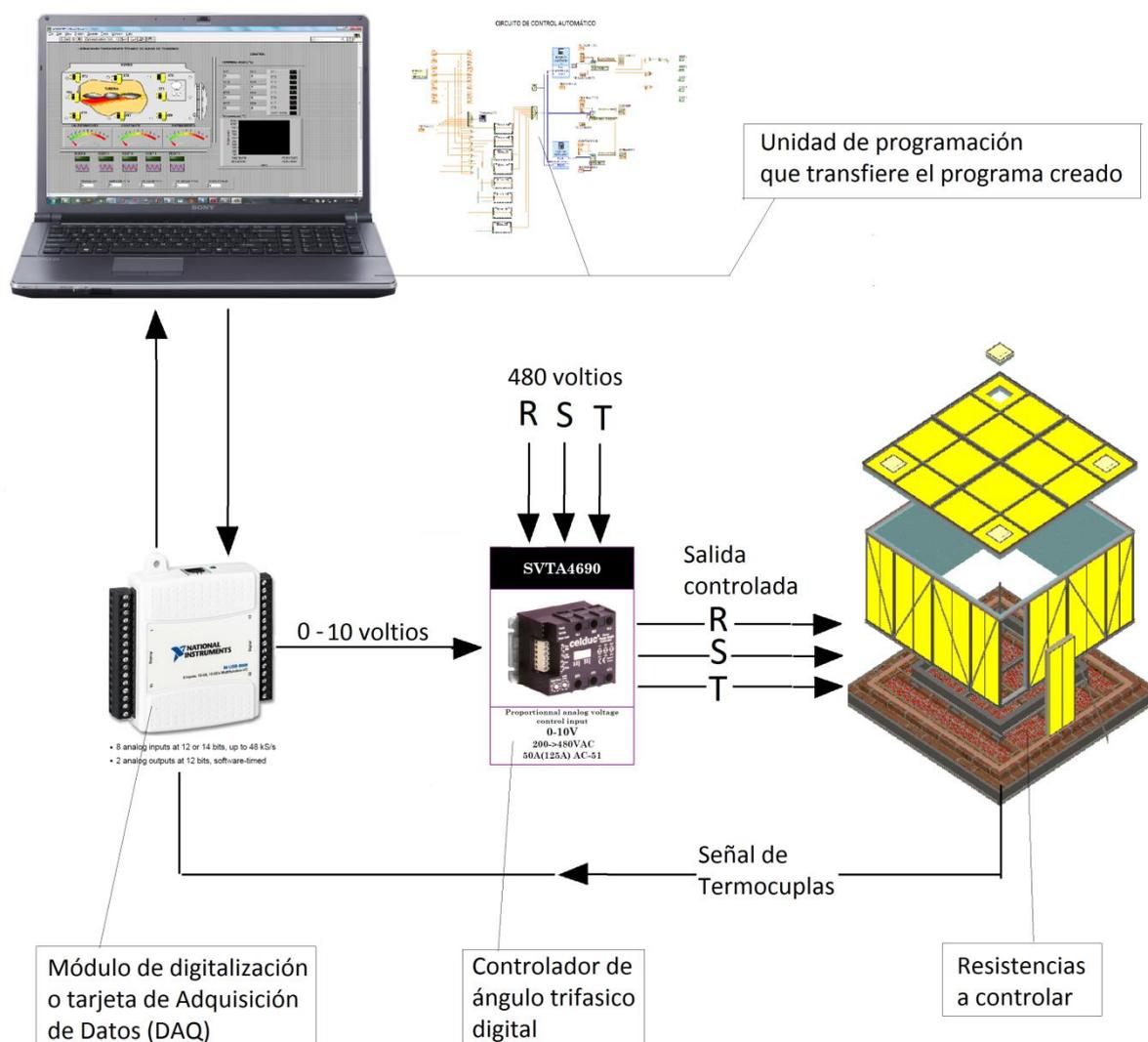
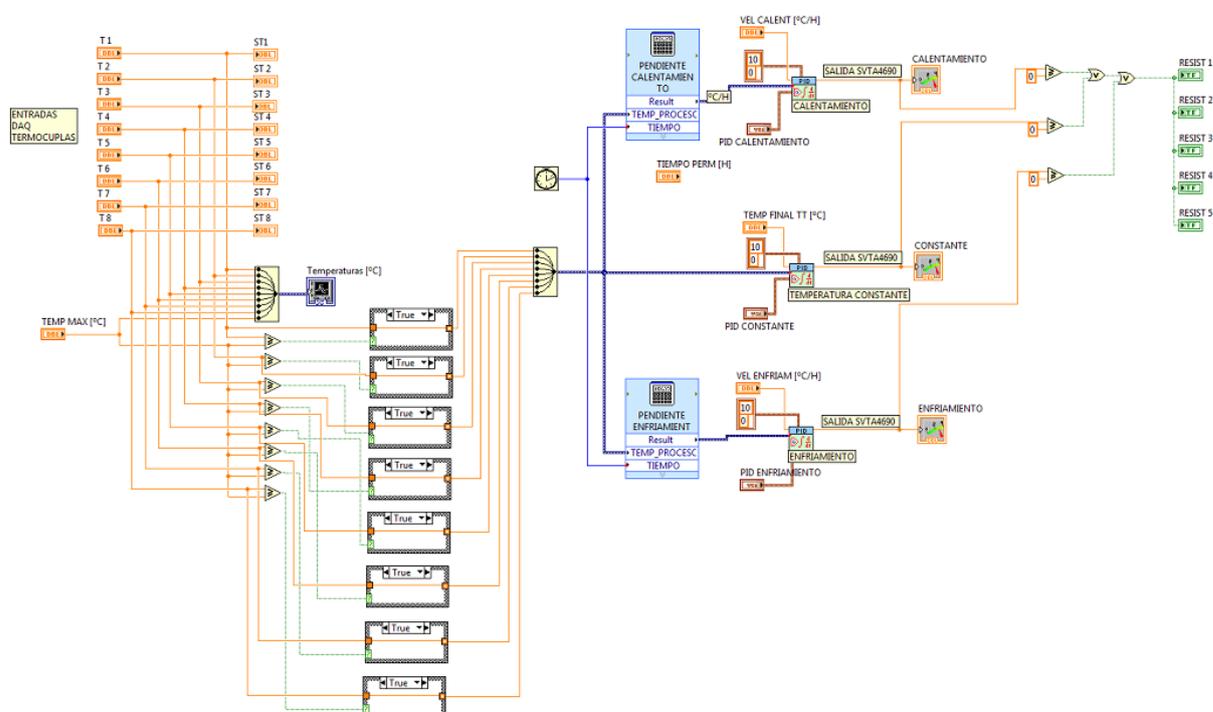


Figura 96. Elementos de automatización.

La programación se lo ha realizado en un software, y obtenemos el siguiente circuito de control.



**Figura 97. Circuito de control.**

Básicamente el programa controla la temperatura que se desea en el horno, y lo hace por medio de la comparación de los datos de temperatura que toman las 8 termocuplas que estarían distribuidas en el rodete de la turbina.

Los datos de temperatura de las termocuplas se grafican en un diagrama, y con sus valores se pueden visualizar en la pantalla.

Estos datos de temperatura ingresan a una tarjeta de adquisición de datos DAQ (data acquisition) USB 6009, que dispone de 8 entradas analógicas y 2 salidas analógicas también, éstos dispositivos son bastante simples para mediciones

rápidas pero lo suficientemente versátiles para aplicaciones de medición más compleja, y tienen bajo costo. (Anexo P)

La conexión con la computadora es a través de un puerto USB y no necesita otro tipo de alimentación.

En cada DAQ se podrá conectar 4 termocuplas, y se tendrá 2 salidas analógicas; se sabe que son 5 grupos de resistencias, por lo tanto se necesitarán 5 salidas para conectarles en los controladores de ángulo trifásico, entonces serán necesarios 3 dispositivos DAQ para el control del horno.

La tarjeta DAQ es el bus que lleva la información de las temperaturas hacia la computadora, donde se hace el control, y luego regresan los datos a la tarjeta DAQ para enviar los datos hacia el controlador digital de ángulo trifásico, y serán ellos quienes permitan el calentamiento de las resistencias tomando en cuenta la programación de la computadora para el control.

En el computador tenemos 3 PID (PID Calentamiento, PID Constante y PID Enfriamiento), cada uno de estos se activarán cuando así la temperatura y el tiempo lo disponga, es decir que, para el calentamiento controlará el PID Calentamiento, hasta que llegue a la temperatura de mantenimiento del tratamiento térmico, seguido controlará el PID Constante durante el tiempo de permanencia a la misma temperatura, luego controlará el PID Enfriamiento hasta que llegue a la temperatura final del proceso.

El controlador digital de ángulo trifásico es el SVTA 4690, se conecta a la red trifásica con voltajes de 200V a 480V, y a la tarjeta DAQ que funciona con voltajes entre (0 – 10) V; que dependiendo de los datos que le entregue ésta permitirá la salida de voltaje para las resistencias del horno.

Sus características lo hacen adecuado para su uso en este circuito, a continuación se mencionan algunas de ellas (anexo Q):

- Permite configurar el voltaje para aplicado a diferente tipo de cargas con 3 hilos, 4 hilos o en el interior del cableado delta.
- Es pequeño, fácil y listo para usar.
- Arranque y parada suave. (aumenta la esperanza de vida de la carga).
- Filtro ajustable con respecto a los cambios rápidos de tensión de entrada (rampa).

Las termocuplas a utilizarse son las tipo K, soportan temperaturas desde (0 a 800)<sup>o</sup>C. Sus datos técnicos los encontramos en el anexo R.

El programa permite ingresar los datos que debe cumplir el tratamiento térmico, como son:

- Temperatura ambiente (<sup>o</sup>C).- valor que se detectará automáticamente al encender el sistema de control automático.
- Velocidad de calentamiento (<sup>o</sup>C/hora).

- Temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ ), en este caso también es la temperatura de permanencia.
- Tiempo de permanencia en la temperatura máxima (horas)
- Velocidad de enfriamiento ( $^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ ).
- Temperatura final ( $^{\circ}\text{C}$ )

La siguiente gráfica muestra la pantalla principal del programa de control automático.

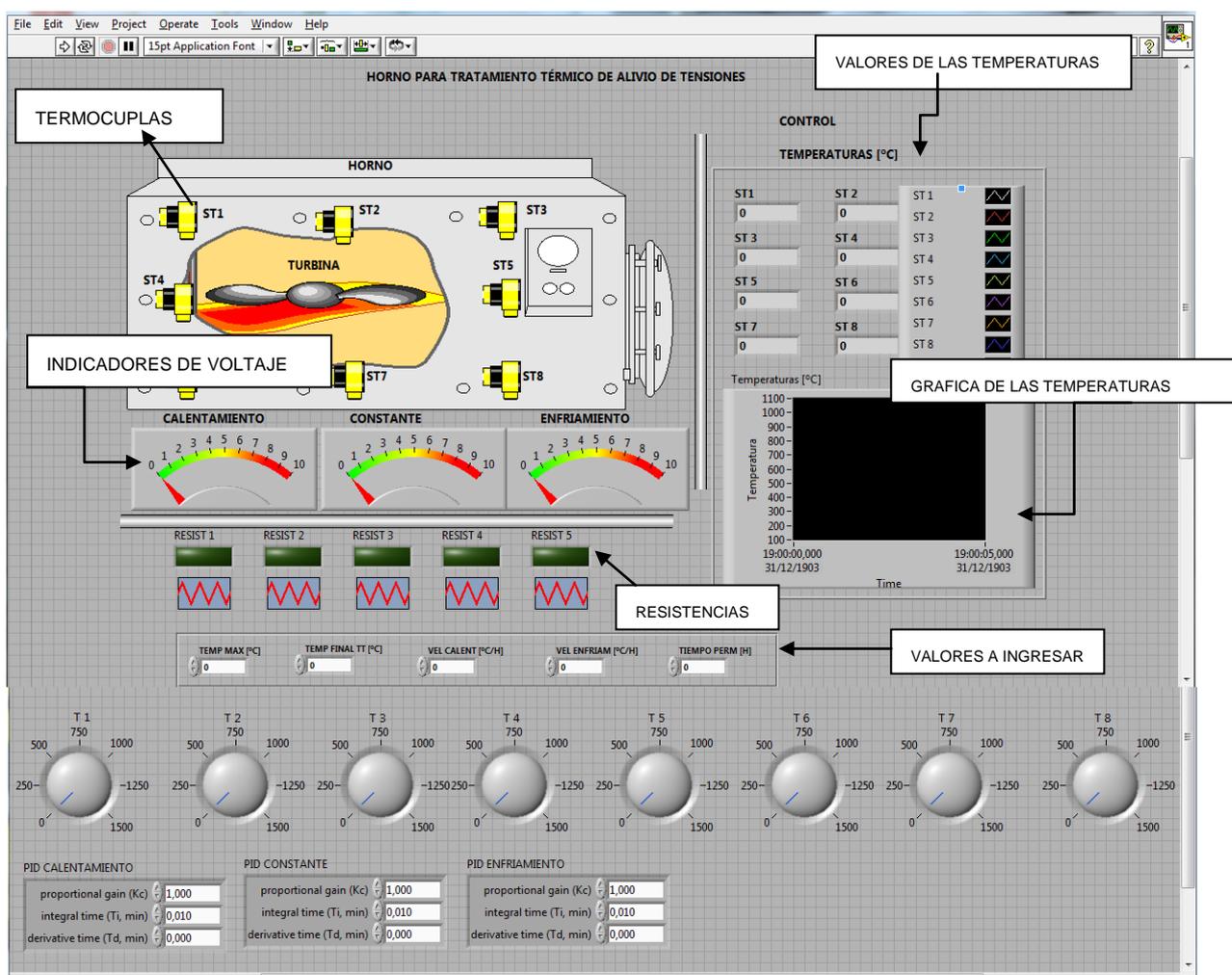


Figura 98. Pantalla de visualización de datos.

De esta forma se monitoreará los datos entregados por las termocuplas y se podrá observar el avance de la curva del tratamiento térmico.

El circuito de potencia es el siguiente:

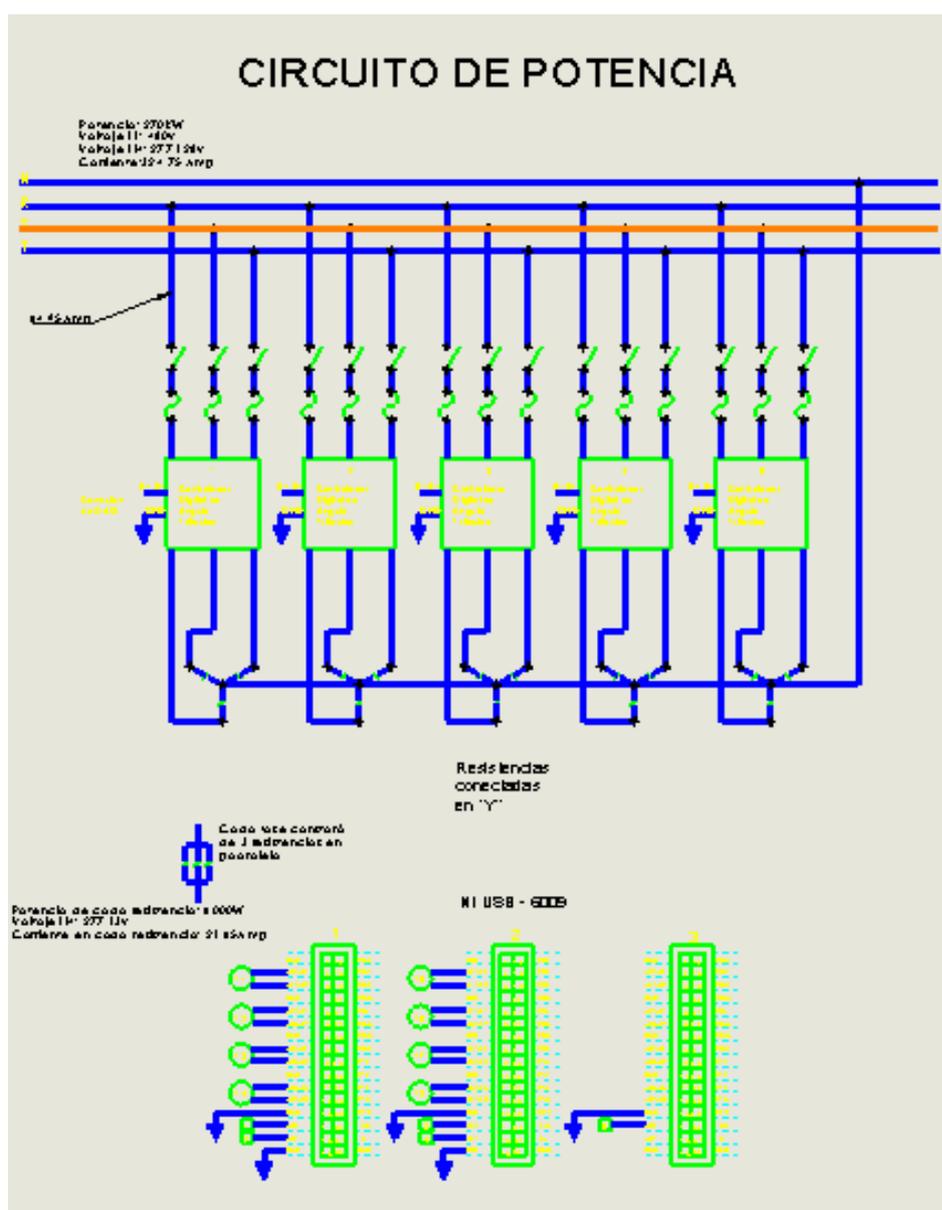


Figura 99. Circuito de potencia

## CAPÍTULO VI

### 6 ANÁLISIS DE COSTO DEL HORNO.

#### 6.1 Introducción.

Este capítulo está destinado a realizar un detalle de los costos que implica la construcción del horno para tratamientos térmicos del rodete de la turbina Francis.

#### 6.2 Análisis de costos del Horno.

El análisis de costos determina el valor o costo total de recursos económicos que se necesita para construir el horno, teniendo en cuenta que intervienen, tanto costos directos como costos indirectos en el proyecto.

Para lo cual se recopila información de los principales proveedores de materia prima y de equipos, considerando los precios de los materiales para el mes de julio de 2011.

##### 6.2.1 Costos directos

Para establecer los costos directos se toma en cuenta los siguientes costos parciales:

### 6.2.1.1 Materiales directos

Costos de los materiales para el horno.

**TABLA 15. COSTOS DE LOS MATERIALES DEL HORNO.**

<b>Cantidad</b>	<b>Denominación</b>	<b>Características</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
25	Planchas de acero negra ASTM 366-grado A	(2440x1220x2)mm	50,9	1272,5
6	Perfil estructural Omega INEN 1 623:2000	(35x50x20x2)mm	16,59	99,54
4	Perfil estructural Omega INEN 1 623:2000	(35x50x20x3)mm	18,58	74,32
14	Perfil estructural Angulo L doblado INEN 1 623:2000	(60x60x3)mm	16,96	237,44
2	Perfil laminado IPE ASTM 36- grado A	(100x55x4,1x5,7)mm	80,58	161,16
2	Perfil laminado IPE ASTM 36- grado A	(300x55x4,1x5,7)mm	546,91	1093,82
10	Tubo estructural cuadrado ASTM 500- grado A	(20x20x1.2)mm	8,39	83,9
8	Tubo estructural rectangular ASTM 500- grado A	(20x40x1.2)mm	8,67	69,36
8	Perfil laminado PLT ASTM A36 SAE 1008	(6000x19x6)mm	7,05	56,4
1	Perfil laminado PLT ASTM A36 SAE 1008	(6000x65x6)mm	22,58	22,58
1	Perfil laminado PLT ASTM A36 SAE 1008	(6000x50x12)mm	40,23	40,23

1	Perfil laminado VRL ASTM A36	10mm	4,26	4,26
4	Perfil estructural Canal U INEN 1 623:2000	(300x80x10)mm	282,1	1128,4
152	Perno M8	35mm	0,2	30,4
368	Perno M8	20mm	0,19934	73,35712
24	Perno M8	50mm	0,3	7,2
160	Perno M8	16mm	0,15	24
12	Perno M8	25mm	0,2666	3,1992
16	Perno M8	45mm	0,25	4
748	Arandela de presión para M8	8mm	0,02	14,96
732	Tuerca para perno M8	8mm	0,0396	28,9872
1000	Pernos de anclaje kao-lock AISI 310	152,4mm	2,4	2400
1000	Candado metálico para pernos de anclaje kao-lock AISI 310		1,6	1600
7	Spun Fiber Blanket	(7320x1220x25)mm	200,38	1402,66
14	Spun Fiber Blanket	(3660x1220x50,8)mm	200,38	2805,32
4	Lana de vidrio AW	(15240x1219,2x50,8)mm	188,22	752,88
5500	Ladrillo refractarioUA20	(228,6x114,3x63,5)mm	7,13	39215
28	Mortero refractario Aerofrax	Tambor 35 kg	1,51	42,28
4	Gancho de elevación Jergens			0
45	Resistencias Eléctricas Aleación 80Ni-20Cr	4000mm	566,97	25513,65
45	Tubos refractarios de alta temperatura	4000mm	356	16020
15	Fusibles		50	750
15	Contactores		30	450
<b>TOTAL</b>				<b>95481,804</b>

### 6.2.1.2 Costos por mano de obra.

**TABLA 16. COSTOS POR MANO DE OBRA.<sup>2</sup>**

N°	Trabajador	N° de horas	Costo USD /h	Costo Total (USD)
1	Albañil	40	3	120
1	Ayudante Albañil	40	2,25	90
1	Técnico Soldador	18	8	144
1	Técnico Mecánico	163	5,5	896,5
1	Ayudante Mecánico	163	3,4	554,2
1	Pintor	4	3,4	13,6
1	Técnico Eléctrico	80	5,6	448
1	Ayudante Eléctrico	80	3,4	272
1	Técnico Electrónico	40	5,5	220
<b>TOTAL</b>				<b>2758,3</b>

### 6.2.1.3 Costos por equipos utilizados.

**TABLA 17. COSTOS DE EQUIPOS UTILIZADOS**

Cantidad	Denominación	Características	Costo Unitario	Costo Total
3	Tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009	USB DAQ	305	915
5	Controlador trifásico 0-10 V	SVTA 4690	200	1000
1	Computadora de escritorio	SONY VAIO	1000	1000
<b>TOTAL</b>				<b>2915</b>

---

<sup>2</sup> Para los costos por mano de obra se ha tomado como referencia los salarios con los que se cuenta en la empresa.

El costo total por materiales para el horno será:

**TABLA 18. TOTAL COSTOS DIRECTOS**

<b>Costos por:</b>	<b>Valor USD</b>
Materiales y Accesorios	95481,804
Equipos utilizados	2915
Mano de Obra	2758,30
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>	<b>5673,3</b>

### 6.2.2 Costos indirectos.

#### 6.2.2.1 Costos de materiales y accesorios indirectos.

**TABLA 19. COSTOS DE MATERIALES Y ACCESORIOS INDIRECTOS**

<b>Cantidad</b>	<b>Denominación</b>	<b>Características</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
1	Pintura Anticorrosiva, color blanco	Galón	20,28	20,28
3	Thiñer	Litros	1,34	4,01
220	Electrodos para soldar pernos kao-lok (10% más)	D 2,38mm	0,59	130,24
<b>TOTAL</b>				<b>154,53</b>

### 6.2.2.2 Costos por alquiler de maquinaria y equipos utilizados

**TABLA 20. COSTOS POR ALQUILER DE MAQUINARIA Y EQUIPOS UTILIZADOS.**

<b>N°</b>	<b>Máquina Herramienta</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Tarifa USD /h</b>	<b>Costo Total(USD)</b>
1	Soldadura eléctrica	2	10	20
1	Soldadura Tig	16	12	192
1	Cortadora Plasma	18	10	180
4	Taladro	25	5	125
5	Esmeril	3	5	15
6	Pulidora/ Amoladora	5	5	25
7	Compresor	4	10	40
8	Otros Equipos	3	10	30
<b>TOTAL</b>				<b>627</b>

### 6.2.2.3 Costos por transporte.

**TABLA 21. COSTOS POR TRANSPORTE.**

<b>Operaciones</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total(USD)</b>
Transporte de Materiales a la Empresa	1	flete	50	50
Otros	5	flete	5	25
<b>TOTAL</b>				<b>75</b>

#### 6.2.2.4 Costos de diseño.

**TABLA 22. COSTOS DE DISEÑO.**

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad (%CD)</b>	<b>Varios (USD)</b>
Ingenieriles (Diseño)	10%	10115,51035
Imprevistos	5%	5057,755176
Utilidad	0	0
<b>TOTAL COSTOS INIRECTOS</b>		<b>15173,26553</b>

**TABLA 23. COSTOS INDIRECTOS TOTALES.**

<b>Costos por</b>	<b>Valor USD</b>
Materiales y Accesorios Indirectos	154,53
Alquiler de Maquinaria y Equipos utilizados	627
Transporte	75
Diseño.	15173,26553
<b>TOTAL</b>	<b>16029,80</b>

#### 6.2.3 Costos totales.

Los costos totales equivalen a la suma de los costos directos más los costos indirectos. Sumados nos arrojan como resultado un valor de **117184,902** dólares.

**TABLA 24. COSTOS TOTALES.**

<b>COSTOS</b>	<b>Valor USD</b>
COSTOS DIRECTOS	101155,104
COSTOS INDIRECTOS	<b>16029,80</b>
<b>TOTAL</b>	<b>117184,902</b>

## CAPITULO VII

### 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 7.1 Conclusiones.

- Se diseñó un horno para tratamiento térmico del rodete de la turbina Francis (CELEC Unidad de Negocio Hidroagoyán).
- Se determinó el tipo de horno a diseñar en función a la teoría revisada y atendiendo al requerimiento de la empresa.
- Se seleccionó el tipo de resistencias adecuadas, siendo ésta una resistencia metálica de aleación 80Ni-20Cr; junto con el controlador automático para el horno.
- Se determinó el costo de la construcción del horno, el mismo que representa un 3,04% del costo de un rodete nuevo.

#### 7.2 Recomendaciones.

- Para los trabajos que deban realizarse en el techo del horno, se recomienda que lo realice una sola persona.
- No golpear las paredes internas del horno ya que la fibra cerámica no presenta una buena resistencia mecánica.
- Las resistencias deben conectarse en Y, puesto que asegura un voltaje constante sin importar que alguna resistencia de una fase se desequilibre.

- Tener cuidado de no pisar las resistencias ya que al estar éstas colocadas en la solera, se corre el riesgo de dañarlas; para evitar esto se deberá caminar sobre las filas de ladrillos refractarios.
- La sintonización de las ganancias de los controladores debe realizarse cuando esté instalado el horno.
- La IARC y la EPA ha determinado que las fibras refractarias de cerámica son posiblemente cancerígenas en seres humanos. Por lo tanto se debe tener cuidados especiales al manipular estos materiales.

## BIBLIOGRAFÍA

- INCROPERA, F. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4<sup>ta</sup> ed. México: Prentice Hall, 2008.
- HOLMAN, P. Transferencia de Calor. 1<sup>ra</sup> ed. México: McGraw-Hill, 1996.
- KARLEKAR, B. Transferencia de Calor. 2<sup>da</sup> ed. Mc GRAW-HILL, 1994.
- VALENZUELA, R. Apuntes de Transferencia de Calor. Ecuador: Riobamba, 2003. (doc.)
- TRINKS, W. Hornos Industriales. Bilbao, España: Urmo, 1971.
- HIDALGO, B. Estudio de Factibilidad para la Rehabilitación de un Horno de Tratamientos Térmicos. ESPOCH Ecuador: Riobamba, 2008. (Tesis)
- MOOTT, R. Resistencia de Materiales. 5<sup>ta</sup> ed. México: Pearson Educación, 2009.
- GOMEZ, J. Estructuras en Arquitectura.
- BLANK, L. Ingeniería Económica. 5<sup>ta</sup> ed. México: McGraw-Hill. 2004.
- HIDROAGOYÁN- Compañía de Generación Hidroeléctrica © 18-07-2008. Disponible en: <http://www.hidroagoyan.com/web/guest/home>. 15-06-2009.
- ING. CAICEDO, M. Oficinas Hidroagoyán, 19-06-2009. Entrevista.
- BOHLER WELDING. Welding Guide, [página web en línea], Manual Técnico de Productos. Edición 07/2005. Disponible en: <http://www.bsmex.com.mx/boehler-welding/pdf/general.pdf>. 19-10-2010.
- CAICEDO, Mauricio. caicedom@hidroagoyan.com. "Información de la Tesis". [en línea], Hotmail, 24-06-2009. Mensaje enviado por: <http://mail.live.com/default.aspx?wa=wasignin1.0>. Disponible en: <http://www.hotmail.com/>. 26-06-2009.
- ESPOCH. Catálogo, Unidad Documental Facultad Mecánica. Disponible en: [http://biblioteca.esPOCH.edu.ec/web\\_biblioteca/index.htm](http://biblioteca.esPOCH.edu.ec/web_biblioteca/index.htm). 20-06-2009.

CELEC E.P. UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN. Hidroagoyán Generando Energía Eléctrica para el país. Departamento TI&T 2010 [página web en línea], 2010. Disponible en: <http://www.hidroagoyan.com>. 20-09-2010.

UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA. La traducción inversa de textos técnicos sobre centrales hidroeléctricas y contaminación medioambiental: Puesta en página web para autoaprendizaje [página web en línea], 20-10-2004. Disponible en: [http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/turbinas\\_hidraulicas.htm](http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/turbinas_hidraulicas.htm). 20-09-2009.

AYUSO, P. Detección de cavitación en Turbina Francis 31091-1 pdf, [página web en línea], Universidad Politécnica de Cataluña, Copyright © 2002-2004 Mit and Hewlett-Packard, 20-10-2004. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099.1/2632>, <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/2632>. 10-10-2009.

UNNE Ingeniería Civil. Cavitación y Erosión por sedimentos, [página web en línea], Nodethirtythree, A Blogger por Blog and Web, Mail Administrador del Blog ingenieria-civil09@hotmail.com, 08-09-2009. Disponible en: <http://ingenieria-civil2009.blogspot.com/2009/09/cavitacion-y-erosion-por-sedimentos.html>. 10-10-2009.

J.L.G.N REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS. Corrosión en las turbinas, [página web en línea], 1925, Tomo I. Disponible en: [http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1925/1925\\_tomol\\_2440\\_04.pdf](http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1925/1925_tomol_2440_04.pdf). 11-10-2009.

HOYOS PULGARÍN, Elizabeth. Efecto de la Técnica de Pases de Revenido en las Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A743: Grado CA6NM, [página web en línea], Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, 2009 Disponible en: [http://www.bdigital.unal.edu.co/2172/1/1017124208.2009\\_1.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/2172/1/1017124208.2009_1.pdf). 25-11-2010.

RUALES, E. edu6r@hotmail.com. “Información, Archivos y fotos para la Tesis”. [en línea], Hotmail 24 junio 2009. Mensaje enviado por: <http://mail.live.com/default.aspx?wa=wasignin1.0>. Disponible en: <http://www.hotmail.com/>. 29-11-2010.

EMISON. Hornos Industriales, Barcelona, [página web en línea], Disponible en: <http://emison.es/hornos/pdf/hornos%20industriales.pdf>. 15-10-2009.

- M31PEDRO. Hornos Industriales, [página web en línea], 27-02-2002. Disponible en: <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller2BAE/hornosind.pdf>.  
18-12-2009.
- UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Lección 10. Hornos, [página web en línea], Formato de archivo: Microsoft PowerPoint – Versión en HTML. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion10.Hornos.INTRODUCCION.ppt>.  
22-10-2009.
- GAS NATURAL FENOSA. Hornos Eléctricos, [página web en línea], Catálogo de Tecnologías, Canal de Eficiencia Energética, 2009. Disponible en: <http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/hornos-electricos>.  
20-12-2009.
- ORDOÑEZ, S. Hornos Eléctricos, [página web en línea], Universidad de Santiago de Chile, Depto. de Ingeniería Metalúrgica, 10-11-2010 Disponible en: <http://www.metalurgiausach.cl/TECNICAS%20EXPERIMENTALES/UNID8.pdf>  
29-11-2010.
- Administrador. Materiales Refractarios, [página web en línea], 16-02-2006. Disponible en: [http://www.manual-refractarios \[1\].pdf](http://www.manual-refractarios[1].pdf).  
05-03-2010.
- WIKIPWDIA. Material Refractario, [página web en línea], 2009. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Material\\_refractario](http://es.wikipedia.org/wiki/Material_refractario).  
20-12-2010.
- NETZSCH. Materiales de Aislamiento Térmico, [página web en línea], Alemania 19-10-2010. Disponible en: [http://www.netzsch-thermal-analysis.com/download/Thermal\\_Insulation\\_Materials\\_E\\_0210\\_497.pdf](http://www.netzsch-thermal-analysis.com/download/Thermal_Insulation_Materials_E_0210_497.pdf).  
21-11-2010.
- LINCOLN ELECTRIC. Electrodo para Soldaduras de Acero Inoxidable, [página web en línea], 2006, Lincoln Soldaduras de Colombia. Disponible en: <http://www.lincolnelectric.com.co/mod/pdf/grinox29.pdf>.  
20-01-2011.
- ERECOS. Catálogo de Productos, [página web en línea], Copyright © 2005- Diseñado por PULPO - Medios Interactivos. Disponible en: <http://www.erecos.com/catalogo.html>.  
22-12-2009.

CONSTRUAPRENDE. Apuntes. Estructuras Metálica. Proyecto Estructural [página web en línea]. Disponible en: <http://www.construaprende.com/> Apuntes. 01-09-2009.

LECCIÓN 10. Hornos de resistencias. [página web en línea]. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.Hornos.RESISTENCIAS.2006.pdf>. 15-10-2009.

FIALLOS, V. ohmio01@hotmail.com."RESISTENCIAS ELÉCTRICAS OHMIO". [en línea], Hotmail 3 de julio del 2011. Mensaje enviado por: <http://mail.live.com>. Disponible en: <http://www.hotmail.com>. 3-07-2011.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HIDROAGOYÁN- Compañía de Generación Hidroeléctrica ©18-07-2008.  
Disponible en: <http://www.hidroagoyan.com/web/guest/home>.  
15-06-2009.
- [2] ING. CAICEDO, M. Oficinas Hidroagoyán, 19-06-2009. Entrevista.
- [3] BOHLER WELDING. Welding Guide, [página web en línea], Manual Técnico de Productos. Edición 07/2005. Disponible en: <http://www.bsmex.com.mx/boehler-welding/pdf/general.pdf>.  
19-10-2010.
- [4] CAICEDO, Mauricio. [caicedom@hidroagoyan.com](mailto:caicedom@hidroagoyan.com). "Información de la Tesis". [en línea], Hotmail, 24-06-2009. Mensaje enviado por: <http://mail.live.com/default.aspx?wa=wasignin1.0>. Disponible en: <http://www.hotmail.com/>.  
26-06-2009.
- [5] ESPOCH. Catálogo, Unidad Documental Facultad Mecánica. Disponible en: [http://biblioteca.esepoch.edu.ec/web\\_biblioteca/index.htm](http://biblioteca.esepoch.edu.ec/web_biblioteca/index.htm).  
20-06-2009.
- [6] CELEC E.P. UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN. Hidroagoyán Generando Energía Eléctrica para el país. Departamento TI&T 2010 [página web en línea], 2010. Disponible en: <http://www.hidroagoyan.com>.  
20-09-2010.
- [7] UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA. La traducción inversa de textos técnicos sobre centrales hidroeléctricas y contaminación medioambiental: Puesta en página web para autoaprendizaje [página web en línea], 20-10-2004. Disponible en: [http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/turbinas\\_hidraulicas.htm](http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/turbinas_hidraulicas.htm).  
20-09-2009.
- [8] AYUSO, P. Detección de cavitación en Turbina Francis 31091-1 pdf, [página web en línea], Universidad Politécnica de Cataluña, Copyright © 2002-2004 Mit and Hewlett-Packard, 20-10-2004. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099.1/2632>, <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/2632>.  
10-10-2009.
- [9] UNNE Ingeniería Civil. Cavitación y Erosión por sedimentos, [página web en línea], Nodethirtythree, A Blogger por Blog and Web, Mail Administrador del

Blog ingenieria-civil09@hotmail.com, 08-09-2009. Disponible en: <http://ingenieria-civil2009.blogspot.com/2009/09/cavitacion-y-erosion-por-sedimentos.html>.  
10-10-2009.

[10] J.L.G.N REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS. Corrosión en las turbinas, [página web en línea], 1925, Tomo I. Disponible en: [http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1925/1925\\_tomol\\_2440\\_04.pdf](http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1925/1925_tomol_2440_04.pdf).  
11-10-2009.

[11] HOYOS PULGARÍN, Elizabeth. Efecto de la Técnica de Pases de Revenido en las Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A743: Grado CA6NM, [página web en línea], Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, 2009 Disponible en: [http://www.bdigital.unal.edu.co/2172/1/1017124208\\_2009\\_1.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/2172/1/1017124208_2009_1.pdf).  
25-11-2010.

[12] RUALES, E. edu6r@hotmail.com. “Información, Archivos y fotos para la Tesis”. [en línea], Hotmail 24 junio 2009. Mensaje enviado por: <http://mail.live.com/default.aspx?wa=wasignin1.0>. Disponible en: <http://www.hotmail.com/>.  
29-11-2010.

[13] EMISON. Hornos Industriales, Barcelona, [página web en línea], Disponible en: <http://emison.es/hornos/pdf/hornos%20industriales.pdf>.  
15-10-2009.

[14] M31PEDRO. Hornos Industriales, [página web en línea], 27-02-2002. Disponible en: <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller2BAE/hornosind.pdf>.  
18-12-2009.

[15] UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Lección 10. Hornos, [página web en línea], Formato de archivo: Microsoft PowerPoint – Versión en HTML. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion10.Hornos.INTRODUCCION.ppt>.  
22-10-2009.

[16] TRINKS, W. Hornos Industriales. Bilbao, España: Urmo, 1971. pp. 16-18.

[17] GAS NATURAL FENOSA. Hornos Eléctricos, [página web en línea], Catálogo de Tecnologías, Canal de Eficiencia Energética, 2009. Disponible en: <http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/hornos-electricos>.  
20-12-2009.

[18] ORDOÑEZ, S. Hornos Eléctricos, [página web en línea], Universidad de Santiago de Chile, Depto. de Ingeniería Metalúrgica, 10-11-2010 Disponible

- en: <http://www.metalurgiausach.cl/TECNICAS%20EXPERIMENTALES/UNID8.pdf>.  
29-11-2010.
- [19] Administrador. Materiales Refractarios, [página web en línea], 16-02-2006. Disponible en: [http://www.manual-refractarios \[1\].pdf](http://www.manual-refractarios [1].pdf).  
05-03-2010.
- [20] WIKIPWDIA. Material Refractario, [página web en línea], 2009. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Material\\_refractario](http://es.wikipedia.org/wiki/Material_refractario).  
20-12-2010.
- [21] NETZSCH. Materiales de Aislamiento Térmico, [página web en línea], Alemania 19-10-2010. Disponible en: [http://www.netzsch-thermal-analysis.com/download/Thermal\\_Insulation\\_Materials\\_E\\_0210\\_497.pdf](http://www.netzsch-thermal-analysis.com/download/Thermal_Insulation_Materials_E_0210_497.pdf).  
21-11-2010.
- [22] LINCOLN ELECTRIC. Electrodo para Soldaduras de Acero Inoxidable, [página web en línea], 2006, Lincoln Soldaduras de Colombia. Disponible en: <http://www.lincolnelectric.com.co/mod/pdf/grinox29.pdf>.  
20-01-2011.
- [23] ERECO. Catálogo de Productos, [página web en línea], Copyright © 2005- Diseñado por PULPO - Medios Interactivos. Disponible en: <http://www.ereco.com/catalogo.html>.  
22-12-2009.
- [24] KARLEKAR, B. Transferencia de Calor. 2<sup>da</sup> ed. Mc GRAW-HILL, 1994. pp. 16.
- [25] CONSTRUAPRENDE. Apuntes. Estructuras Metálica. Proyecto Estructural [página web en línea]. Disponible en: <http://www.construaprende.com/Apuntes>.  
01-09-2009.
- [26] MOOTT, R. Resistencia de Materiales. 5<sup>ta</sup> ed. México: Pearson Educación, 2009.
- [27] LECCIÓN 10. Hornos de resistencias. [página web en línea]. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.Hornos.RESISTENCIAS>.  
15-10-2009.
- [28] FIALLOS, V. ohmio01@hotmail.com. "Resistencias Eléctricas Ohmio". [en línea], Hotmail 3 de julio del 2011. Mensaje enviado por: <http://mail.live.com>. Disponible en: <http://www.hotmail.com>.  
3-07-2011.

## LINKOGRAFÍA

### MANUAL TÉCNICO DE PRODUCTOS

<http://www.bsmex.com.mx/boehler-welding/pdf/general.pdf>.

19-10-2010

### UNIDAD DOCUMENTAL FACULTAD MECÁNICA.

[http://biblioteca.esPOCH.edu.ec/web\\_biblioteca/index.htm](http://biblioteca.esPOCH.edu.ec/web_biblioteca/index.htm).

20-06-2009.

### CELEC E.P. UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN.

<http://www.hidroagoyan.com>.

20-09-2010.

### CENTRALES HIDROELÉCTRICAS Y CONTAMINACIÓN MEDIOAMBIENTAL.

[http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/turbinas\\_hidraulicas](http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/turbinas_hidraulicas).

20-09-2009.

### DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN TURBINA FRANCIS.

<http://hdl.handle.net/2099.1/2632>

10-10-2009.

### CAVITACIÓN Y EROSIÓN POR SEDIMENTOS.

<http://ingenieria-civil2009.blogspot.com/2009/09/cavitacion-y-erosion-por-sedimentos.html>.

10-10-2009.

### CORROSIÓN EN LAS TURBINAS.

[http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1925/1925\\_tomol\\_2440\\_04.pdf](http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1925/1925_tomol_2440_04.pdf).

11-10-2009.

### EFEECTO DE LA TÉCNICA DE PASES DE REVENIDO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO ASTM A743: GRADO CA6NM

[http://www.bdigital.unal.edu.co/2172/1/1017124208.2009\\_1.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/2172/1/1017124208.2009_1.pdf).

25-11-2010.

### HORNOS INDUSTRIALES.

<http://emison.es/hornos/pdf/hornos%20industriales.pdf>.

15-10-2009.

### HORNOS INDUSTRIALES.

<http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller2BAE/hornosind.pdf>.

18-12-2009.

## LECCIÓN 10. HORNOS.

<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion10.Hornos.INTRODUCCION>.  
22-10-2009.

## HORNOS ELÉCTRICOS.

<http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/hornos-electricos>.  
20-12-2009.

## HORNOS ELÉCTRICOS.

<http://www.metalurgiausach.cl/TECNICAS%20EXPERIMENTALES/UNID8.pdf>  
29-11-2010.

## MATERIALES REFRACTARIOS.

[http://www.manual-refractarios \[1\].pdf](http://www.manual-refractarios [1].pdf).  
05-03-2010.

## MATERIAL REFRACTARIO.

[http://es.wikipedia.org/wiki/Material\\_refractario](http://es.wikipedia.org/wiki/Material_refractario).  
20-12-2010.

MATERIALES DE AISLAMIENTO TÉRMICO, [página web en línea], Alemania 19-10-2010. Disponible en: [http://www.netzsch-thermal-analysis.com/download/Thermal\\_Insulation\\_Materials\\_E\\_0210\\_497.pdf](http://www.netzsch-thermal-analysis.com/download/Thermal_Insulation_Materials_E_0210_497.pdf).  
21-11-2010.

## ELECTRODOS PARA SOLDADURAS DE ACERO INOXIDABLE.

<http://www.lincolnelectric.com.co/mod/pdf/grinox29.pdf>.  
20-01-2011.

## CATÁLOGO DE PRODUCTOS ERECO.

<http://www.ereco.com/catalogo.html>.  
22-12-2009.

## ESTRUCTURAS METÁLICAS.

<http://www.construaprende.com/Apuntes>.  
01-09-2009.

## LECCIÓN 10. HORNOS DE RESISTENCIAS.

<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.Hornos.RESISTENCIAS.2006.pdf>.  
15-10-2009.

