

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN HORNO DE COCCIÓN TIPO ABIERTO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero Metalúrgico, Por el
Br. Freddy A. Mojica P.

Caracas, noviembre de 2005.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN HORNO DE COCCIÓN TIPO ABIERTO

Tutor Académico: Prof. Alfonso Bencomo

Tutor Industrial: Ing. Rafael Tosta

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero Metalúrgico, Por el
Br. Freddy A. Mojica P.

Caracas, noviembre de 2005.

DEDICATORIA

A DIOS todopoderoso por darme fuerzas para lograr mis metas y por estar siempre conmigo.

A mis padres Freddy Mojica y Gloria Piñero de Mojica por su amor, incondicional apoyo y por tener siempre una palabra de aliento en los momentos más difíciles de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser siempre mi guía y fiel cuidador.

A mis padres Freddy Mojica y Gloria Piñero de Mojica, por motivarme siempre a seguir adelante a pesar de las adversidades.

A mis hermanos por darme siempre su apoyo.

A la Universidad Central de Venezuela por convertirse en mi segunda casa y darme la formación académica y humana necesaria para ser quien soy.

A la empresa C.V.G ALCASA, por darme la oportunidad de realizar este trabajo en sus instalaciones.

Al profesor Alfonso Bencomo por su asesoramiento, guía y amistad durante la realización de este trabajo.

Al ingeniero Rafael Tosta, por la colaboración prestada.

A mi pana Javier González, por su amistad y solidaridad durante toda la carrera y especialmente durante la realización de este trabajo.

A mis amigos de la universidad Guillermo Gutiérrez, Illanu (la negra), Shirley, Gustavo Jaramillo, Elías, José Gregorio, Gabriel, Dayanna, Giovanny, José Pacheco, Marianela, Jhoana Chacón, Lara Bolívar, Agustín, Los Eduardos, Sidartha, Siulyn, Thairis, Adriana, Adrianita, Chong, Luis Miguel, Luis Perdomo, Gerardo, Juan Olivares (El chino), y todos los demás por los momentos que compartimos durante tanto tiempo.

Mojica P. Freddy A.

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN HORNO DE COCCIÓN TIPO ABIERTO.

Tutor Académico: Prof. Alfonso Bencomo. Tutor Industrial: Ing. Rafael Tosta.
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia
de los Materiales. Año 2005, 115 p.

Palabras claves: modelo matemático, método del elemento finito, horno de cocción,
ánodos, ANSYS.

Resumen: En este trabajo de investigación se desarrollo un modelo matemático asistido por computador, basado en el método del elemento finito. Mediante el uso de modelos se determina la distribución de temperaturas en estado transitorio de las fosas integrantes de las secciones durante la cocción de ánodos, tomando en cuenta el tiempo y la uniformidad de las temperaturas obtenidas durante el proceso, así como la temperatura máxima obtenida. La selección de la muestra fue realizada de manera aleatoria entre el número total de fosas integrantes de las secciones del horno. Para el registro de temperaturas durante toda la fase de experimentación se emplearon termocuplas tipo K (Cromel-Alumel), el registro y almacenamiento de temperaturas se realizó con un software de adquisición de datos. Para la etapa de desarrollo del modelo se empleó el paquete comercial ANSYS basado en el método del elemento finito el cual permite establecer geometrías, materiales y sus propiedades, y además realizar el mallado y el arreglo nodal para su posterior solución en forma iterativa. Para la obtención del modelo térmico del Horno de Cocción I durante el proceso de cocción de ánodos se consideró un análisis bidimensional, asumiendo un plano de simetría en la mitad de la fosa, además se considera que en dicho plano de simetría el sistema es adiabático. El mallado es obtenido mediante un generador de malla integrado al software utilizado, una vez realizado este mallado se obtuvo un total de 860 elementos y 482 nodos. Con el desarrollo de este modelo se observó que la distribución de temperaturas en la fosa no es homogénea, lo que ocasiona que las propiedades físico-químicas de los ánodos no sean las mismas a lo largo del ánodo. Además la temperatura máxima alcanzada según el modelo, difiere de la teórica en 200°C

aproximadamente lo que también afecta la calidad final de los ánodos. Con la realización de este trabajo se ha obtenido un modelo bidimensional en estado transitorio para el proceso de cocción de ánodos, el cual permite estudiar la distribución de temperaturas en las fosas del horno. Este modelo fue validado comparando los resultados del análisis con las mediciones realizadas en el horno tanto de manera automatizada como manual. Se sugiere que para estudios posteriores que se realicen al horno se desarrollen modelos térmicos similares que permitan observar el efecto producido por las mejoras realizadas a partir de las recomendaciones hechas en este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	
2 Reseña histórica de la empresa	3
2.1 Ubicación geográfica	4
2.2 Sector productivo	5
2.3 Misión	8
2.4 Visión	8
2.5 Objetivos	8
2.6 Funciones	8
2.7 Ánodos de Carbón	10
2.7.1 Materias primas para la fabricación de los ánodos de carbón	10
2.7.1.1 Coque de petróleo verde	11
2.7.1.2 Coque de petróleo calcinado	11
2.7.1.3 Brea de alquitrán	12
2.7.1.4 Cabos	12
2.7.1.5 Desechos verdes	12
2.8 Proceso de fabricación de ánodos	13
2.8.1 Fabricación de ánodos verdes	14
2.8.2 Mezclado de la pasta verde o cruda	14
2.8.3 Conformado de los ánodos	15
2.8.4 Cocción de ánodos	15
2.9 Horno de cocción	15
2.9.1 Horno de cocción I (Horno abierto o de Flujo Horizontal)	17
2.9.1.1 Fuentes de energía	20
2.9.1.2 Ciclos de cocción	21
2.9.1.3 Etapas de cocción	21
2.9.1.3.1 Precalentamiento	21
2.9.1.3.2 Fuego directo o cocción principal	22
2.9.1.3.3 Enfriamiento	23
2.9.1.4 Sistema de tratamiento de gases	24
2.9.2 Horno de cocción II	24
2.9.2.1 Funcionamiento de hornos II	25
2.10 Propiedades de los ánodos cocidos	25
2.10.1 Permeabilidad al aire	25
2.10.2 Densidad aparente	26
2.10.3 Conductividad térmica	26
2.10.4 Resistividad eléctrica	26
2.10.5 Resistencia a la compresión	26
2.10.6 Coeficiente de expansión térmica	27
2.10.7 Resistencia a la flexión	27
2.10.8 Reactividad al CO ₂	27

2.10.9 Reactividad al aire	28
2.11 Requisitos generales que debe reunir un buen ánodo	28
2.12 Transferencia de calor	29
2.12.1 Transferencia de calor por conducción	30
2.12.2 Transferencia de calor por convección	30
2.12.3 Transferencia de calor por radiación	31
2.13 Modelo matemático	31
2.14 Método del elemento finito	31
2.14.1 Procedimiento general de la modelación con elementos finitos	32
2.14.1.1 Discretización del dominio	33
2.14.1.2 Tipo de elemento	33
2.14.1.3 Tamaño de los elementos	34
2.14.1.4 Ubicación de los nodos	34
2.14.1.5 Número de elementos	34
2.14.1.6 Simplificación de la geometría	35
2.15 Programa Ansys	36
2.15.1 Descripción	36
2.15.2 Métodos para la generación del modelo	39
2.16 Análisis térmico	40
2.16.1 Análisis térmico transitorio	41

CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Selección de muestra	42
3.2 Técnicas y/o instrumentos	42
3.3 Flujograma experimental	44
3.3.1 Medición de las dimensiones del horno	45
3.3.2 Caracterización del horno	46
3.3.2.1 Recopilación de las propiedades de los materiales del horno	47
3.3.2.2 Medición de temperaturas	47
3.3.2.2.1 Preparación y fabricación de termopares	47
3.3.2.2.2 Instalación de los termopares	48
3.3.2.2.3 Recolección de datos	49
3.4 Modelación	52
3.5 Validación del modelo	54

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados experimentales obtenidos en el horno de cocción de ánodos (sección 54, fosa 3) de C.V.G ALCASA	55
4.2 Resultados de los modelos bidimensionales obtenidos con el programa ANSYS, en la etapa de precalentamiento.	59
4.2.1 Vista frontal	59
4.2.2 Vista de planta	62
4.3 Resultados de los modelos bidimensionales obtenidos con el programa ANSYS, en la etapa de cocción principal	66
4.3.1 Vista frontal	66
4.3.2 Vista de planta	69

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	73
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
APÉNDICE A. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES CONSIDERADOS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA	77
APÉNDICE B. DISPOSICIÓN DE LAS TERMOCUPLAS EN LAS FOSA	78
APÉNDICE C. PROCEDIMIENTO PARA MODELAR	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Ubicación Geográfica de la empresa C.V.G ALCASA	4
Figura 2.2	Productos fabricados por C.V.G ALCASA	6
Figura 2.3	Procesos productivos de la empresa C.V.G ALCASA	7
Figura 2.4	Estructura organizativa de C.V.G ALCASA	9
Figura 2.5	Esquema de los porcentajes de materia prima utilizada para la fabricación de ánodos	11
Figura 2.6	Procedimiento general para la fabricación de ánodos de carbón	14
Figura 2.7	Corte transversal de un horno de cocción de ánodos	16
Figura 2.8	Esquema de la ubicación de las 56 secciones en horno I y la dirección de los fuegos	17
Figura 2.9	Esquema de una sección y su división en cinco fosas	18
Figura 2.10	Corte transversal de una pared de flujo	19
Figura 2.11	Instalaciones de horno de cocción I (horno abierto) de C.V.G ALCASA	20
Figura 2.12	Curva típica de cocción	23
Figura 2.13	La parte (A) representa el flujo de calor estacionario y la parte (B) representa el flujo de calor no estacionario.	30
Figura 2.14	Efecto del número de elementos en la convergencia de la solución del método	35
Figura 2.15	Simetría geométrica y de carga	36
Figura 3.1	Diagrama de flujo de la metodología experimental empleada	45
Figura 3.2	Vista frontal de una fosa del horno	46
Figura 3.3	Vista de planta de una fosa del horno	47
Figura 3.4	Ubicación de las termocuplas en la fosa de prueba	49
Figura 3.5	Montaje e instalación de interacción entre termocuplas y módulos tipo k	50
Figura 3.6	Visualización de la distribución de termocuplas en el monitor	50
Figura 3.7	Medidor digital de temperaturas	51
Figura 3.8	Termopar manual	51
Figura 3.9	Geometría y ubicación de los nodos para el elemento de mallado	52
Figura 3.10	Malla empleada	53
Figura 4.1	Curvas de cocción de ánodos	56
Figura 4.2	Curva de cocción promedio	58
Figura 4.3	Distribución de temperaturas a las 5h 45min de operación	59
Figura 4.4	Distribución de temperaturas a las 21h 30min de operación	59
Figura 4.5	Distribución de temperaturas a las 41h 30min de operación	60
Figura 4.6	Distribución de temperaturas a las 56h de operación	60
Figura 4.7	Distribución de temperaturas a las 5h 45min de operación	62
Figura 4.8	Distribución de temperaturas a las 21h 30min de operación	62
Figura 4.9	Distribución de temperaturas a las 41h 30min de operación	63
Figura 4.10	Distribución de temperaturas a las 56h de operación	63

Figura 4.11 Validación del modelo bidimensional con las medidas experimentales	65
Figura 4.12 Distribución de temperaturas a las 30h de operación	66
Figura 4.13 Distribución de temperaturas a las 73h de operación	66
Figura 4.14 Distribución de temperaturas a las 120h 30min de operación	67
Figura 4.15 Distribución de temperaturas a las 168h de operación	67
Figura 4.16 Distribución de temperaturas a las 30h de operación	69
Figura 4.17 Distribución de temperaturas a las 73h de operación	69
Figura 4.18 Distribución de temperaturas a las 120h 30min de operación	70
Figura 4.19 Distribución de temperaturas a las 168h de operación	70
Figura 4.20 Validación del modelo bidimensional con las medidas experimentales	72
Figura B.1 Disposición de las 10 termocuplas en la fosa y sus respectivas profundidades	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Secciones seleccionadas en el estudio	42
Tabla 4.1 Etapa de precalentamiento, profundidad 2.20mt	64
Tabla 4.2 Etapa de cocción principal, profundidad 2.20mt	72
Tabla A.1 Propiedades térmicas para el Ánodo	77
Tabla A.2 Propiedades térmicas para el ladrillo refractario	77
Tabla A.3 Propiedades Térmicas para el coque de petróleo	77

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La producción de aluminio a nivel mundial se realiza mediante el proceso Hall-Heroult, a través de celdas de reducción de aluminio. Uno de los insumos requeridos para la producción de aluminio son los ánodos, los cuales se utilizan para que se produzca la reacción de reducción en la superficie del ánodo y así producir el aluminio en las celdas Hall-Heroult cuando pasa una corriente de alto amperaje. Los ánodos verdes una vez fabricados en la planta de molienda y compactación de C.V.G ALCASA son sometidos a un programa de tratamiento térmico en los hornos de cocción (abierto o cerrado) este programa les permite alcanzar los requisitos fisico-químicos requeridos y las propiedades mecánicas requeridas para funcionar correctamente como electrodos (ánodo) en las celdas de reducción.

En pro del mejoramiento continuo de la calidad en los ánodos de carbón, la gerencia de la planta de carbón decidió realizar un seguimiento al proceso de cocción de ánodos, dicho seguimiento contempla la realización de un modelo matemático del comportamiento térmico del horno de cocción I, con la finalidad de conocer de una manera precisa la distribución de temperaturas en estado transitorio de las fosas integrantes de las secciones durante la cocción de ánodos, para así mejorar el proceso de cocción y por ende la calidad de los ánodos, así como su vida útil en la celdas de reducción.

Este trabajo tiene como objetivo principal la elaboración de un modelo matemático en dos dimensiones, basado en el método de elementos finitos para determinar la distribución de temperaturas en las fosas del horno, esto permitirá predecir de una manera bastante aproximada el comportamiento del horno de cocción.

El análisis se realizó mediante el uso del software comercial ANSYS, basado en el método de elemento finito, el primer paso fue construir la geometría de la fosa en el

programa, luego se introdujeron las propiedades de los materiales que corresponden a una fosa empacada, posteriormente se realizó el mallado y se colocaron las condiciones iniciales a los nodos. Una vez obtenido el modelo bidimensional se procedió a validar los resultados con la data registrada y almacenada durante el proceso de cocción de ánodos, dicha data se obtuvo mediante la utilización sistemática de termopares instalados en la fosa conectados a un sistema de adquisición de datos.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2 Reseña histórica de la empresa

En la región de Guayana existen una gran variedad de recursos naturales de fácil explotación, complementando esto está el vasto programa de desarrollo liderizado por la Corporación Venezolana de Guayana (C.V.G) desde inicios de los años 60, el cual ha tenido su principal soporte en el inmenso potencial hidroeléctrico, lo que le permite asegurar una energía a bajo costo.

El desarrollo de la industria del aluminio en la Región de Guayana se inició hace más de tres décadas con los programas destinados al aprovechamiento del potencial hidroeléctrico de sus principales ríos, mediante la construcción de las represas Guri y Macagua. La disponibilidad y bajo costo de la energía, la reserva de bauxita como materia prima inicial, la capacidad del país para invertir, la estratégica ubicación geográfica, junto con las facilidades de acceso al mar a través del río Orinoco, determinaron el que Venezuela pudiera producir aluminio en condiciones competitivas a nivel de América Latina y mundial.^[1]

En diciembre de 1960, se constituye en Venezuela la empresa C.V.G. Aluminio del Caroní, S.A. (ALCASA) como producto de la asociación entre la Corporación Venezolana de Fomento(50%), que en Febrero de 1961 traspasa sus acciones a la Corporación Venezolana de Guayana (C.V.G.), y Reynolds International INC (50%). quedando oficialmente inaugurada el 14 de octubre de 1967, la cual estaba constituida por la Sala “A” de Línea I de las celdas de reducción, una Sala de Envarillado de Ánodos y una Sala de Fundición. En 1968 se desarrolló la Fase II, que consistió en una Sala de Reducción- Sala “B” con una capacidad de 13 mil toneladas métricas de producción por año, más otra planta de ánodos y sus hornos de cocción denominada Planta de Carbón, una Planta de Laminación y una Planta de Hoja Delgada, está última ubicada en Guacara, estado

Carabobo actualmente no forma parte de ALCASA, y es conocida como ALUCASA – GUACARA. Para 1973, se culminó la Fase II, constituida por una nueva Línea II de Reducción de 28 mil toneladas métricas, y una expansión de la Sala de Fundición.^[1]

Hacia finales de 1974, fue sustituida la tecnología empleada hasta ese momento para la producción de aluminio, mediante la incorporación de una nueva Línea III elevando la producción a 180 mil TM/A, de alta densidad de corriente de 160 mil amperios. Posteriormente, a los cinco años de operación exitosa de la Línea III, con una nueva tecnología para atender el incremento en el mercado de exportación, se planteó aumentar la capacidad de reducción, es allí cuando nace la Línea IV, y celdas capaces de producir 84 mil TM/A, con 216 celdas tipo Hamburgo. Para mediados de los años 80, C.V.G. ALCASA alcanzaba una capacidad instalada de producción de 210 mil TM/A, además de sumarle unas 60 mil TM/A de productos laminados.

2.1 Ubicación geográfica

La Región Guayana es el centro de la industria del aluminio en Venezuela, esta región privilegiada está localizada al sur del río Orinoco, con una extensión de 448.000 km² que representa exactamente la mitad del territorio venezolano. En ella se encuentra ubicada la empresa C.V.G ALCASA específicamente en la zona Industrial Matanzas en el margen derecho del río Orinoco, en la parte sur-oeste de Ciudad Guayana, Estado Bolívar, ocupando una superficie total aproximada de 174 hectáreas.^[1] La ubicación geográfica de la empresa se ilustra en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Ubicación geográfica de la empresa C.V.G ALCASA^[1]

2.2 Sector productivo

Es una empresa perteneciente al sector secundario, ya que procesa el aluminio primario una vez obtenido la materia prima inicial (bauxita), extrayendo la alúmina a través de un tratamiento de separación electrolítica, produciendo y comercializando aluminio primario y sus derivados, contando con un equipo humano perseverante, incondicional, valiosísimo, aunado en una alta tecnología alcanzando un nivel optimo de producción respondiendo a las exigencias del mercado, de acuerdo a la capacidad de la planta y a las normas de calidad.

C.V.G ALCASA produce y comercializa una amplia variedad de productos que incluyen lingotes de 22.5Kg, pailas de 445Kg, cilindros aleados y planchones para laminación, aluminio en forma de rollos, láminas y cintas. Estos productos son consumidos en Venezuela por la industria de la construcción, electricidad, transporte, empaque, refrigeración, bienes de consumos y otras. También exporta a Costa Rica, Estados Unidos de América, Colombia, México, Puerto Rico, Perú, Argentina, Inglaterra y Bélgica. Los productos fabricados por C.V.G ALCASA se pueden apreciar en la Figura 2.2.

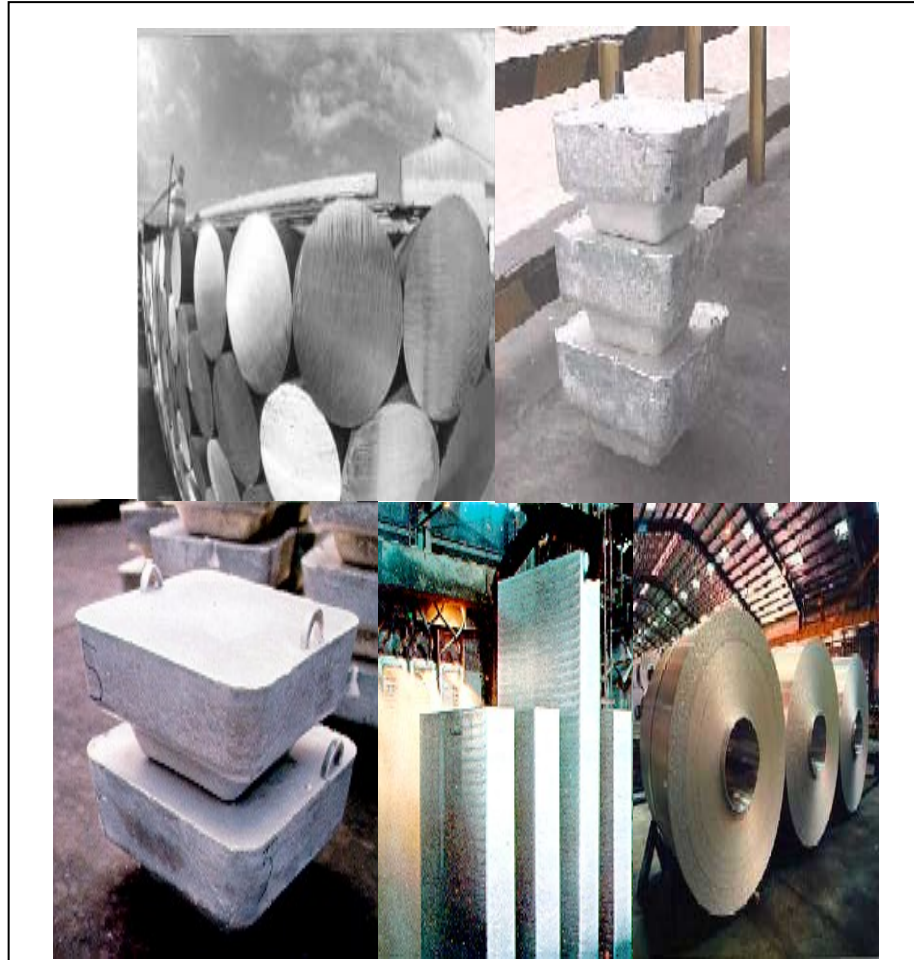


Figura 2.2 Productos fabricados por C.V.G. ALCASA^[1]

El proceso productivo que se desarrolla en C.V.G ALCASA se ilustra en la Figura 2.3.

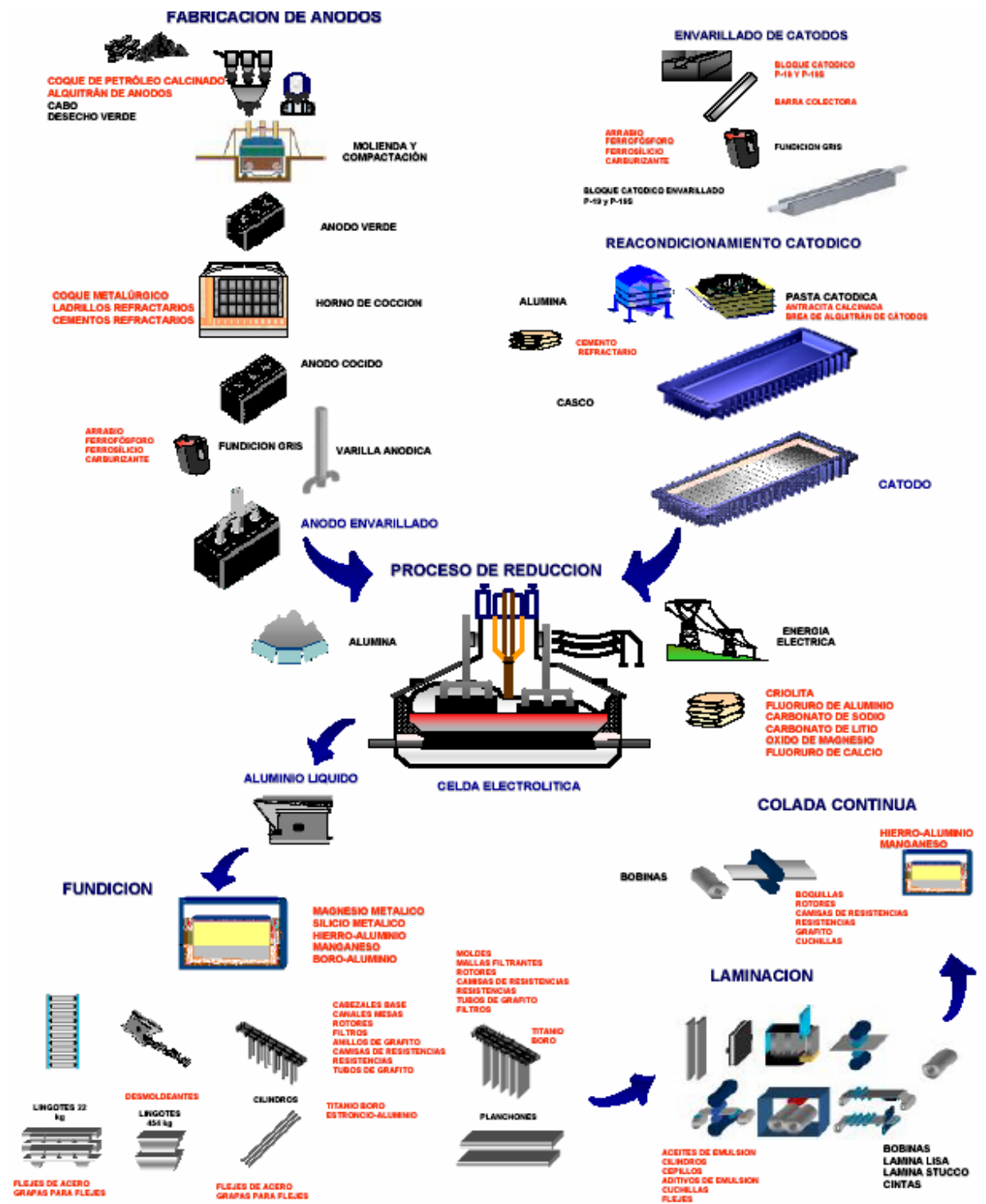


Figura 2.3 Procesos productivos de la empresa CVG ALCASA^[1]

2.3 Misión

Producir y comercializar productos de aluminio en forma competitiva, con calidad integral de gestión, participando activamente en la definición de las políticas de desarrollo de la cadena productiva del sector aluminio, asumiendo el papel que a la empresa corresponde:

- Eficiente y rentable.
- Suministro confiable en calidad y oportunidad para la transformación y agregación de valor.
- Precio competitivo.
- Desarrollo sustentable del sector aluminio en el país.

2.4 Visión

Ser considerados en un período de 5 años una empresa rentable, generadora de dividendos a sus accionistas, confianza a sus clientes transformadores y proveedores y bienestar a sus trabajadores.

2.5 Objetivos

C.V.G. ALCASA, es una empresa del estado venezolano, tutelada por la Corporación Venezolana de Guayana, cuyos objetivos primordiales son producir y comercializar aluminio primario y sus derivados, en una manera productiva y rentable para cubrir las necesidades de mercado nacional e internacional.

2.6 Funciones

Producir y comercializar productos de la industria del aluminio en forma competitiva, satisfaciendo a sus clientes, con producto de muy alto valor, a sus accionistas,

con altos dividendos; y a sus trabajadores desarrollándolos y reconociéndoles su estable contribución en los logros de sus metas propuestas; contribuyendo a la generación de ingresos y al bienestar regional y nacional de la economía y por ende a la nación.

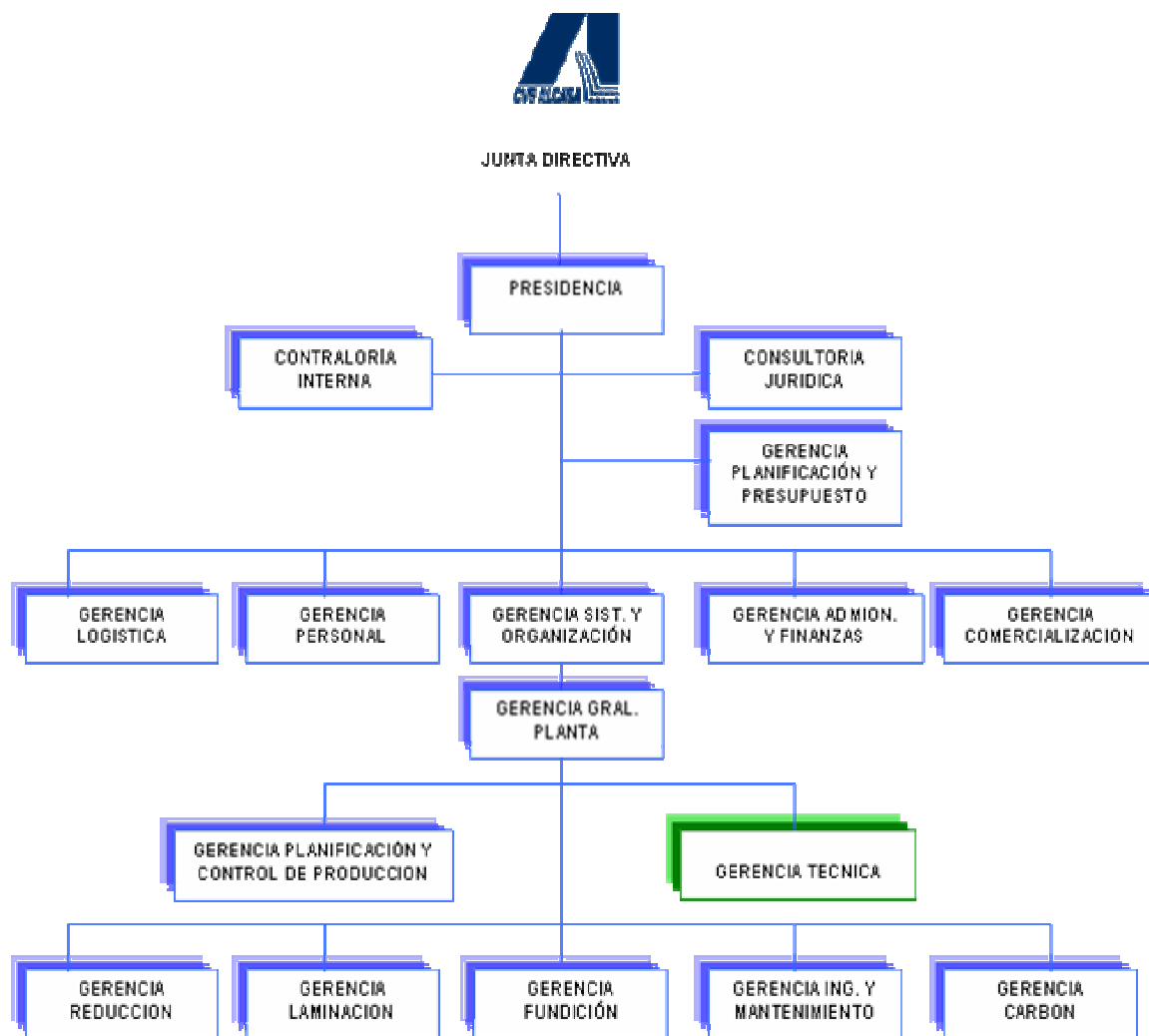


Figura 2.4 Estructura Organizativa de C.V.G ALCASA
Fuente: Organización y Métodos C.V.G ALCASA

2.7 Ánodos de carbón

Los ánodos son bloques de carbón que constituyen el polo o electrodo positivo de la celda electrolítica y es a través de ellos por donde entra el flujo de corriente eléctrica a las celdas de reducción de aluminio. Los ánodos empleados en el proceso electrolítico son un compuesto heterogéneo, constituido por partículas de agregado seco como lo son: coque de petróleo calcinado de diferentes granulometrías, desechos verdes (ánodos no cocidos rechazados) y cabos, que no son más que los remanentes de los ánodos consumidos en celdas. Las partículas del agregado seco se mantienen juntas mediante una mezcla de polvo fino de coque de petróleo calcinado y brea de alquitrán como medio aglutinante, la densidad granel de la mezcla de los agregados están en el orden de $1,0 - 1,2 \text{ gr/cm}^3$ y será llevada a $1,55 - 1,65 \text{ gr/cm}^3$, con dimensiones definidas, incluyendo una contracción lineal $0,20 - 0,40 \%$ debido al proceso de cocción o tratamiento térmico.^[2]

2.7.1 Materias primas para la fabricación de los ánodos de carbón

Para la fabricación de los ánodos existen una serie de limitaciones relacionadas con la calidad de las materias primas que constituyen los mismos, es decir, de este aspecto depende en gran parte la obtención de un buen ánodo. En la elaboración de estos electrodos se utilizan dos productos que son fundamentales; el coque de petróleo calcinado y la brea de alquitrán, pero las empresas para minimizar los costos de producción elaboran los ánodos con dos compuestos adicionales, los cuales son: cabos y desechos verdes. El ánodo típico para la producción de aluminio está constituido por aproximadamente 65% de coque de petróleo, 20% de cabos y 15% de brea de alquitrán, ver figura 2.5.^[3] Estas materias en ciertas proporciones y con ciertas granulometrías, se mezclan y compactan en caliente, para formar los bloques anódicos, los cuales son enfriados y luego son tratados térmicamente (cocidos), para su posterior uso en las celdas electrolíticas.

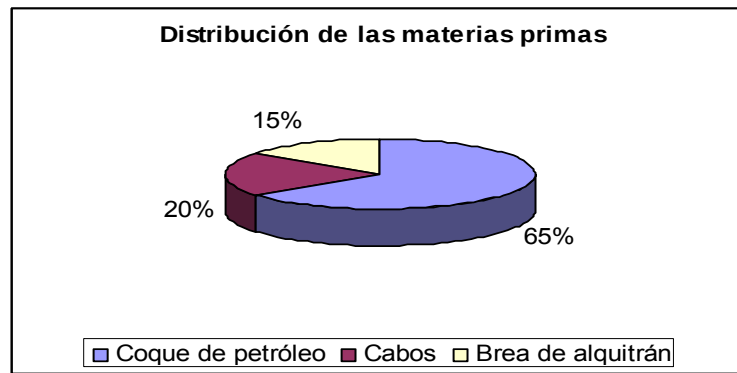


Figura 2.5 Esquema de los porcentajes de materia prima utilizada para la fabricación de ánodos. ^[3]

2.7.1.1 Coque de petróleo verde

El coque de petróleo crudo o verde, es el elemento principal en la fabricación de los ánodos, este es una forma sólida de carbón, el cual resulta de la descomposición térmica y polimerización de los residuos que se derivan de la destilación del petróleo crudo, obteniendo una mezcla de carbón e hidrocarburos pesados / aceite, alquitranes, asfalto, etc. Los hidrocarburos tienen un valor elevado en la relación C/H, contienen impurezas metálicas procedentes del petróleo o son adquiridas en los diferentes pasos de su manejo.

2.7.1.2. Coque de petróleo calcinado

El coque de petróleo calcinado es un material sólido carbonoso (95 a 98%C, 0,03 a 0,06%H₂, 0,5 a 1%N₂, 0,1 A 1%O₂ y 0,5 de manera volátil). Se obtiene por calcinación del coque verde entre 1200 y 1400°C, produciéndose en él la deshidrogenación térmica y expulsión casi total de los restos de materias volátiles. Su estructura consiste de un arreglo de cristales grafiticos de formas, orientaciones y tamaños diferentes atravesados por huecos, cuyas dimensiones varían de acuerdo a la pureza, a las condiciones del proceso y a las características de los residuos de petróleo crudo de los cuales se obtiene dicho coque. ^[4]

2.7.1.3 Brea de alquitrán

El alquitrán es un material altamente aromático y resinoso, producido por la deshidrogenación de grupos aromáticos de bajo punto de ebullición, tales como bicíclicos y tricíclicos. ^[5] Se obtiene de la destilación de los componentes volátiles que se desprenden por el calentamiento del mineral de carbón (alquitranes de hulla). La brea de alquitrán actúa como aglutinante en la fabricación de los electrodos de carbón, usados en las industrias del aluminio, su papel es servir de aglomerante en caliente del material carbonoso sólido de los ánodos y, una vez destilados los volátiles en la cocción, crear un esqueleto de ligadura entre los granos de carbón. La brea de alquitrán está constituida por una mezcla compleja de hidrocarburos altamente aromáticos. La composición elemental promedio es de por lo menos 90% de carbón, 3% de hidrógeno y el resto de oxígeno, nitrógeno y azufre, las breas metalúrgicas son por lo general más aromáticas y más condensadas que las breas de petróleo.

2.7.1.4. Cabos

Son los ánodos cocidos rechazados en hornos de cocción y remanentes de los ánodos retirados de las líneas de reducción por haber cumplido su periodo de vida útil. La producción electrolítica del aluminio a partir de la alúmina requiere de bloques anódicos de carbón, los cuales son insertados en las celdas de reducción durante 22 a 23 días, al final de estos días los ánodos exhiben de 15 a 30 % de su peso inicial. Estos residuos, conocido como cabos de ánodos son sometidos a un proceso de limpieza para eliminar cualquier partícula de electrolito que pudo haberse quedado adherida a ellos, estas partículas están constituidas por una mezcla de criolita, hierro metálico, fluoruro de aluminio y otros fluoruros. ^[2]

2.7.1.5. Desechos verdes

Los desechos verdes no son más que los ánodos no cocidos que han sido rechazados por defectos de fabricación, tales como; mala compactación, exceso de alquitrán, orificios

deformados, ánodo laminado, ánodo segregado, etc. ^[2] Estos a igual que los cabos son sometidos a trituración y molienda.

2.8 Proceso de fabricación de los ánodos

Para obtener una buena combinación de las propiedades de los ánodos, es necesario tener un control estricto de la calidad de la materia prima, del tamaño de las partículas del agregado seco, de las condiciones del mezclado y del proceso de conformado, así como también mantener el contenido de brea de alquitrán entre 14 y 20 %. En la fabricación de los ánodos siempre ha existido el problema de obtener la formulación óptima de la pasta anódica y sobre todo en hallar el contenido requerido de brea de alquitrán, debido a que la mayoría de los fabricantes optimizan sus recetas mediante ensayo y error, mientras que otros obtienen correlaciones de porosidad de la superficie específica de la estructura del agregado seco y de la brea de alquitrán. ^[2] La figura 2.6 muestra el procedimiento general para la fabricación de ánodos de carbón.

2.8.1 Fabricación de ánodos verdes

Esta es la etapa inicial para la fabricación de los ánodos, en donde el coque de petróleo calcinado y los cabos de los ánodos, son degradados por medio de operaciones de trituración y molienda, para dar paso a ciertas fracciones con características granulométricas particulares, las cuales trabajadas en conjunto en el proceso de fabricación de los ánodos, se conocen con el nombre de agregado seco. El producto del agregado seco se compone de un fino y medio de coque, y un medio y grueso de cabo, este agregado seco es aglomerado por la brea de alquitrán para obtener un ánodo consistente.

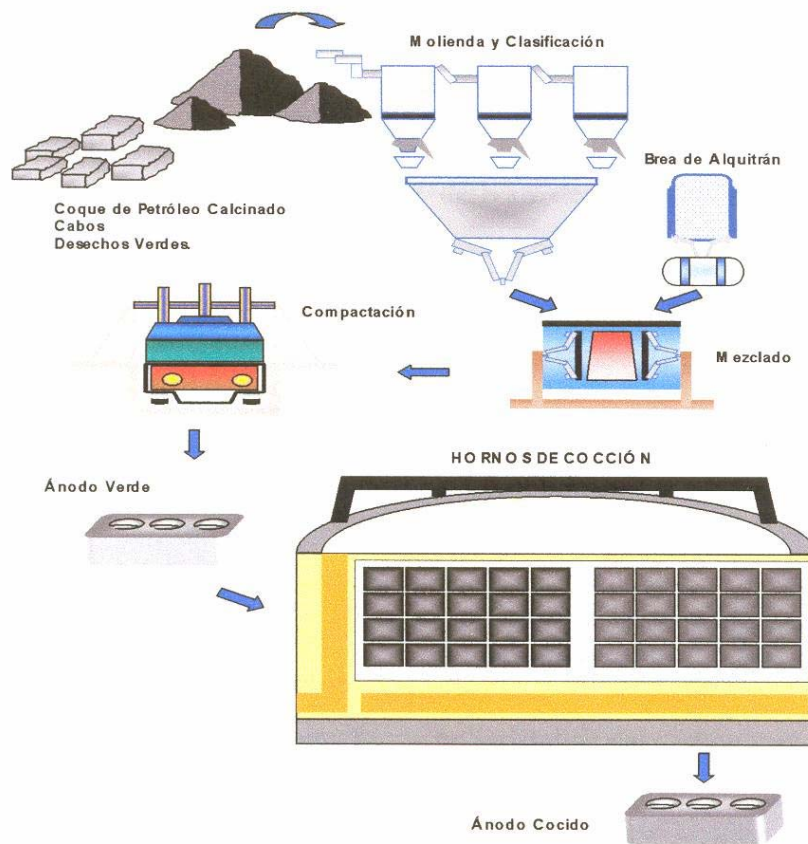


Figura 2.6 Procedimiento General Para la Fabricación de los Ánodos de Carbón. ^[2]

2.8.2 Mezclado de la pasta cruda o verde

La pasta cruda se obtiene mediante la mezcla en caliente (de 150 a 160 °C) de las diversas fracciones del agregado seco con la brea de alquitrán y el desecho verde, según ciertas formulaciones porcentuales de una determinada receta, estas recetas son ideadas teniendo presentes ciertos parámetros tales como la densidad a granel de mezclas del agregado seco, y con las mismas se pretende mejorar principalmente el desempeño de los ánodos en las celdas de reducción. Las recetas están formuladas atendiendo los requerimientos particulares de cada planta.

2.8.3 Conformado de los ánodos

El conformado del ánodo se puede realizar por prensado simple o doble efecto, o bien sea por vibroprensado. La energía en caso del prensado es potencial, con prensas de 3000 MPa, mientras que en el vibroprensado la energía es cinética y potencial, siendo la frecuencia e intensidad del vibroprensado muy importante para la calidad del ánodo. Después del prensado los bloques son enfriados con agua para que adquieran resistencia mecánica que permita su manejo y traslado. Los bloques anódicos crudos se inspeccionan para verificar la presencia de grietas y determinar su densidad, la cual debería estar por el orden de 1.60 gr/cm^3 , así como también detallar sus dimensiones.

2.8.4 Cocción de los ánodos

Este paso contribuye la etapa final del proceso de fabricación de los ánodos y, es en esta fase en donde se les confiere todas las propiedades fisicoquímicas para su buen desempeño en las celdas electrolíticas. Una vez que se ha obtenido una mezcla verde con una formulación optimizada, es llevada al proceso de conformado en donde se moldea y compacta la mezcla, para obtener los bloques anódicos en verde y luego ser sometidos al proceso de cocción, es importante cocer dicha masa de manera adecuada, de no ser así esto puede crear un pobre coque residual, una rápida expansión y encogimiento del compuesto, causando grietas, drástico incremento de la porosidad, pobre adhesión entre el agregado y el coque residual, incremento de la resistividad eléctrica y baja densidad volumétrica, que originan un ánodo cocido de baja calidad.

2.9 Horno de Cocción

La cocción de los ánodos verdes se lleva a cabo en los hornos de cocción, esta es una instalación donde se acciona un proceso de combustión y transferencia de calor, los cuales poseen alta capacidad calorífica.

Estos hornos son divididos en secciones. Cada sección se compone de un cierto número de paredes de flujo (6), divididos en 5 fosas, en donde el ánodo verde es cargado y seguidamente empacado con coque granular. El coque de empaque es el encargado de conducir el calor desde las paredes de flujo hasta el ánodo, y al mismo tiempo provee una atmósfera reductora y actúa como soporte mecánico sobre el paquete de ánodos.

Los hornos están contruidos de ladrillos refractarios de alta alúmina, de tal forma que tenga el menor coeficiente de dilatación y una alta resistencia a la corrosión debido a los compuestos fluorados presentes en el ánodo como producto de la contaminación con el baño que arrastran los cabos usados en la fabricación de los mismos. El horno en su totalidad esta contruido dentro de una pared de hormigón. La función fundamental de los hornos de cocción es la de convertir la brea de alquitrán o lo que es lo mismo coquificar y lograr un mayor rendimiento y una brea de mayor calidad, para su funcionamiento en las celdas electrolíticas. En la figura 2.7 se puede apreciar el corte transversal de un horno de cocción.

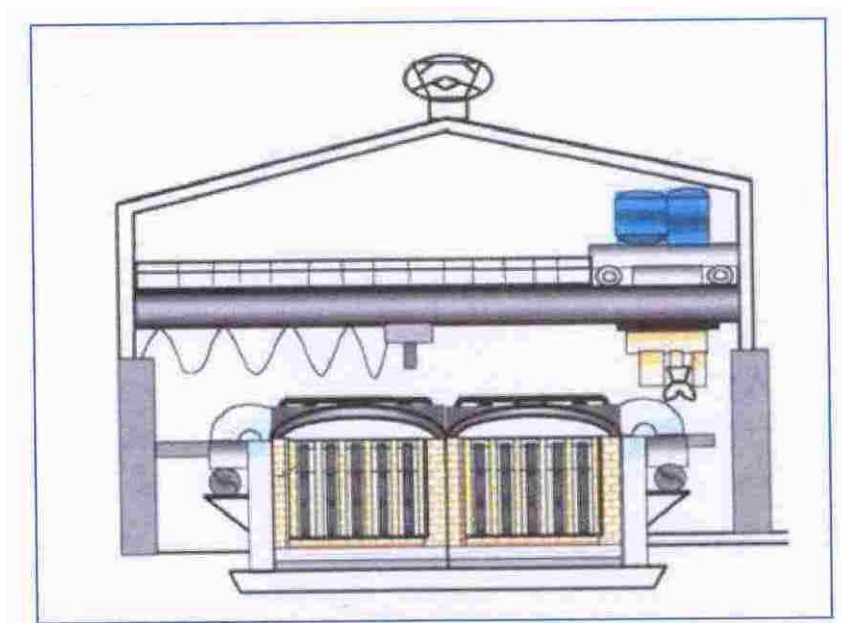


Figura 2.7 Corte Transversal de un horno de cocción de ánodos. ^[2]

Se pueden conseguir dos tipos de hornos de cocción, abiertos y cerrados. C.V.G. ALCASA cuenta con ambos tipos de hornos.

2.9.1 Hornos de Cocción I (Horno abierto o de Flujo Horizontal):

C.V.G. ALCASA cuenta con un horno de cocción abierto, también conocido como hornos I. Este horno es de anillo, de secciones abiertas y flujo de calor horizontal. Esta conformado por 56 secciones, divididas en cuatro zonas de fuego de 14 secciones cada una (ver fig 2.8) y cinco fosas por sección (ver figura 2.9). Las fosas de las secciones están delimitadas lateralmente por paredes de flujo, y en los extremos por los muros soporte de las tanquillas. Las paredes de los muros son de ladrillos refractarios sílico-aluminosos y el coque de empaque utilizado en este horno es de coque de petróleo.^[6]



Figura 2.8 Esquema de la ubicación de las 56 secciones en horno I y la dirección de los fuegos.

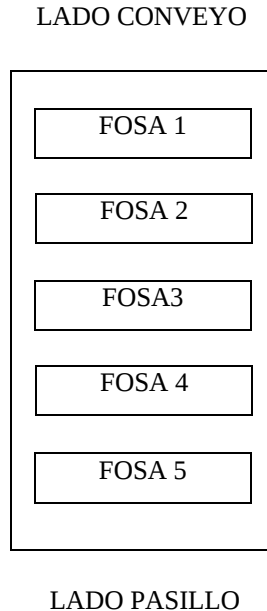


Figura 2.9 Esquema de una sección y su división en cinco fosas.

Este horno tiene una capacidad de 40 ánodos 1400mm por sección, dispuestos de la siguiente manera: 8 ánodos por fosa, dispuestos en cuatro capas de 2 ánodos cada una, para un total de 40 ánodos por sección.

Las paredes de flujo tienen en su interior una cavidad que funciona como cámara de combustión, y dentro de esta hay un direccionador sólido de ladrillos refractarios que conduce los gases a las diferentes zonas de la pared. Cada pared de flujo tiene en su parte superior cuatro agujeros, en uno de ellos es donde están los quemadores que inyectan el gas natural, el cual se combustiona con el oxígeno del aire que es succionado a través de los orificios de las tanquillas ubicados en los extremos de la pared. En la figura 2.10 se muestra el esquema de un corte transversal de una pared de flujo. ^[6]

La temperatura de la pared y de los ánodos al final de la etapa de cocción debe ser de 1250°C y 1130°C, respectivamente, para así garantizar que los ánodos alcancen los 1150±50 °C requeridos para la cocción. La succión de operación debe ser de 0,5 pulgadas

de agua en la etapa de precalentamiento, y 0,1 pulgadas de agua en la etapa de cocción. Estas condiciones de succión permiten una buena relación gas- aire y un gradiente de temperatura adecuado durante las etapas de precalentamiento. [6]

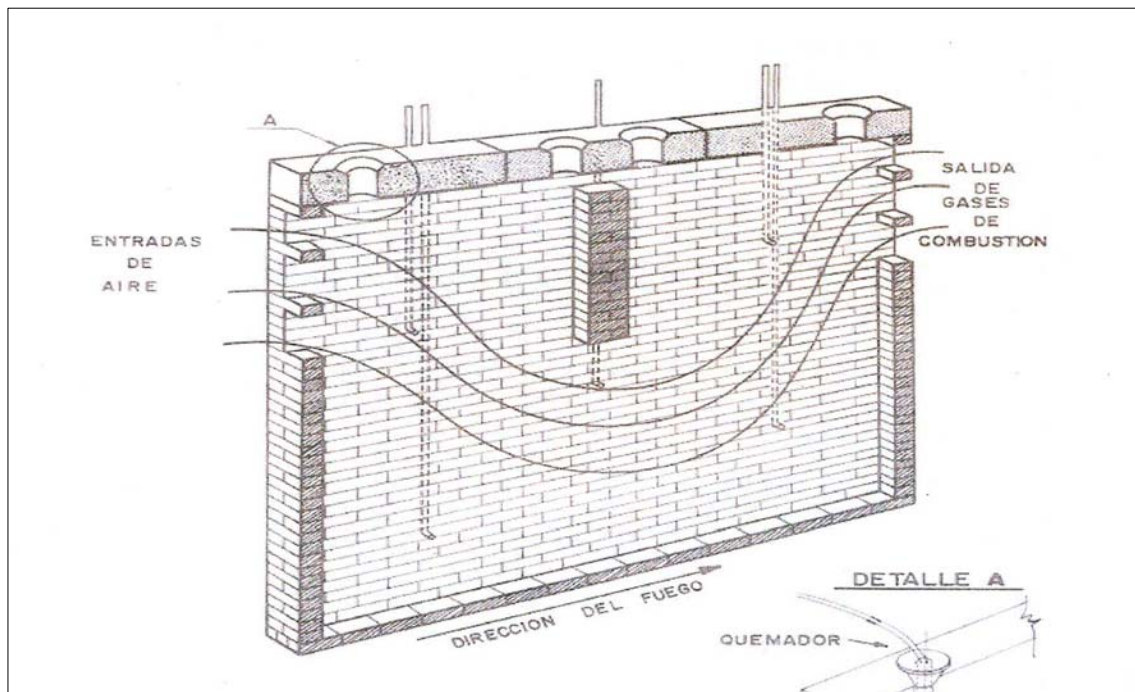


Figura 2.10 Esquema de un corte transversal de una pared de flujo^[2]

La temperatura máxima de cocción de los ánodos se alcanza de la siguiente manera: Debido al tiro efectuado por los ventiladores principales, el aire es succionado a través de los orificios de las tanquillas de las secciones de enfriamiento, este circula por los canales o cavidades de las paredes de flujo de dichas secciones, donde los ánodos ceden calor, el aire precalentado de esta manera pasa a las secciones en fuego directo (precocción y cocción) donde se inyecta gas natural, produciéndose la combustión que es la fuente de calor del proceso. Los productos resultantes de la combustión pasan a la sección en precalentamiento donde ceden su calor al ánodo. Los gases salen del sistema a través de un múltiple, el cual es conectado a un ducto principal de gases de desecho, esto lo lleva a los

ventiladores principales que finalmente arrojan los gases al medio ambiente.^[6] En la figura 2.11 se pueden observar las instalaciones de Horno de Cocción I de C.V.G ALCASA.



Figura 2.11 Instalaciones de Horno de Cocción I (Horno Abierto) de C.V.G ALCASA

2.9.1.1 Fuentes de energía

Para lograr la cocción de los ánodos es necesaria la temperatura suministrada por la combustión de gas natural con oxígeno del aire succionado por un ventilador colocado al final del ducto que recoge los gases de desecho del horno, provenientes tanto de las secciones en cocción como de la sección de precalentamiento o precocción, pues al colocar los mecheros de gas natural directamente a las secciones de cocción, los gases de desechos producidos en las paredes de flujo producto de la combustión pasan a la sección en precalentamiento o precocción y las calientan, lo que a la vez produce menos gases de desecho que son succionados por el ventilador referido y pasan a través del manifold.

2.9.1.2 Ciclos de cocción

Es el tiempo que tarda una sección en cumplir una etapa del proceso de horneado. En horno de cocción I las normas de proceso establecen que el ciclo puede ser de 36, 38, 40, 44, 48 ó 56 horas.

2.9.1.3 Etapas de cocción:

El proceso de cocción de ánodos verdes consiste en tres etapas.

- Etapa de precalentamiento
- Etapas de cocción principal (o fuego directo)
- Etapa de enfriamiento

Cada una de ellas no debe sobrepasarse ni adolecer de la temperatura para que se cumplan los distintos fenómenos que se originan en el proceso. De estas tres zonas las que consolidan las propiedades óptimas a obtener en un ánodo cocido son: precalentamiento y cocción principal.

2.9.1.3.1 Precalentamiento

El precalentamiento es la primera etapa que experimenta el ánodo y se efectúa hasta que se alcanzan los 850°C. El calor necesario para la cocción es generado por la combustión de gas natural a temperaturas mayores de 700°C, estos gases pasan a través de las secciones de precalentamiento intercambiando calor con los ánodos, lo que permite aumentar la temperatura de estos.

Los hornos están diseñados para que los gases de combustión, de las secciones que se encuentran en fuego directo con los mecheros, pasen a través de las secciones de precalentamiento e intercambiando con estos ánodos el calor que aumentará gradualmente la temperatura.^[6]

En la etapa de precalentamiento ocurren las transformaciones más importantes de la cocción del ánodo. Con la temperatura, la brea alcanza un estado de plasticidad cuya fluidez es parecida a la de un líquido, permitiéndole una movilidad que le hace irrigar o mojar las partículas de coque de petróleo y restos de los ánodos cocidos (cabos) desplazando el aire introducido entre ellos y logrando incrementar la compactación y homogeneidad de la masa anódica. A medida que avanza la temperatura, la brea comienza a desprender sus componentes volátiles y a experimentar un fenómeno de dilatación terminando así su estado plástico y dando comienzo al fenómeno de coquificación de sus componentes pesados, lo que se conoce como resolidificación de la brea. Esa coquificación, permite ligar las distintas partículas del ánodo, mejorando sus propiedades conductoras y su resistencia mecánica.^[6] La salida de los gases forma orificios o vías de escapes, desde el interior del ánodo hacia sus paredes. Cuando esto no sea gradual sino bruscamente, se producen grietas o rajaduras, que dependiendo de sus dimensiones, afecta la calidad del ánodo al extremo de desecharlo en las celdas de reducción o antes. El intervalo de temperatura de salida de estos gases va de 300°C A 600°C y la rata de calentamiento no debe ser mayor a 10°C / hora para evitar los daños señalados.

2.9.1.3.2 Fuego directo o cocción principal

Se produce cuando se colocan los quemadores en un rango de temperatura de 850 a 1250°C. En caso de horno I, cada grupo de fuego tiene tres secciones con quemadores, una para llevar la temperatura del ánodo de 760 a 950°C y la otra para elevar la temperatura hasta 1100°C.

Una vez coquificados los componentes pesados de la brea, se produce un fenómeno de reordenamiento molecular, buscando el ánodo una estructura más estable a tan elevadas temperaturas, aumentando las relaciones carbón/hidrógeno y por ende se incrementa la densidad. Esto mejora notablemente la conductividad eléctrica, pero igualmente genera el fenómeno de anisotropía, lo cual hace el ánodo más reactivo frente al oxígeno, aumentando así su consumo en las celdas de reducción. Esta anisotropía consiste en la presencia de

diferencias externas en la estructura del ánodo y por lo tanto conductas físico-químicas distintas en los diferentes planos y lados de un mismo ánodo.^[6]

Cabe destacar que las transformaciones físico-químicas que ocurren durante el proceso de cocción, son experimentadas fundamentalmente por la brea de alquitrán que forma parte de los ánodos, por cuanto el resto de sus componentes, coque de petróleo, restos de ánodos provenientes de las celdas y ánodos cocidos rechazados por calidad han pasados por calentamientos similares y adolecen de componentes que pueden experimentar transformaciones significativas durante el proceso de cocción.^[6]

2.9.1.3.3 Enfriamiento

Una vez cocido el ánodo se extraen y adelantan los mecheros, para comenzar un periodo de enfriamiento, para finalmente extraer el ánodo del horno. En esta etapa hay un número determinado de secciones en enfriamiento, una con enfriamiento natural y dos con enfriamiento forzado, además hay un ventilador para completar el enfriamiento y proceder a la extracción de los ánodos. El enfriamiento se hace inicialmente sin quitar el material de empaque, ya que los ánodos reaccionan espontáneamente con el oxígeno a temperaturas mayores de 400°C, además un enfriamiento violento puede provocar agrietamiento de los ánodos. Una curva típica del proceso de cocción de ánodos se muestra en la figura 2.12.

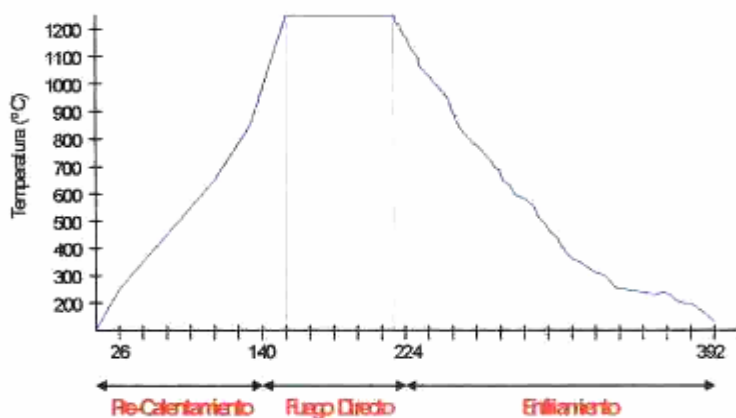


Figura 2.12 Curva Típica de cocción

2.9.1.4 Sistema de Tratamiento de Gases

El sistema de tratamiento de gases esta conformado por un anillo que rodea al horno y es el encargado de evitar la contaminación ambiental, depurando los gases alquitranados que se generan durante el proceso de cocción, permitiendo que salgan al ambiente lo más limpio posible. El sistema Lurgi permite separar el 99% de los compuestos (partículas) de la brea que salen de los hornos de cocción, así como el flúor y óxidos de azufre de la forma SO_x (principalmente SO₂ y SO₃). Para ello es necesario enfriar los gases en una torre de acondicionamiento, pasarlos por un precipitador electrostático que deja a los gases prácticamente libres de impurezas, antes de ser eliminados a través de una chimenea. ^[2]

2.9.2 Hornos de Cocción II (Horno cerrado o de Flujo Vertical):

C.V.G ALCASA cuenta con un horno cerrado de tecnología Riedhamer, del tipo de secciones con cubierta y flujo de calor vertical, es conocido como Hornos II.

Hornos II tiene 48 secciones, divididos en tres grupos de fuego (A, B Y C) de 16 secciones cada uno, cada sección tiene cinco fosas, posee cubierta por lo que es denominado de tipo cerrado. El coque de empaque que se utiliza es coque metalúrgico y las secciones de cada grupo de fuego cumplen etapas específicas en el proceso de horneado, precalentamiento, cocción principal y enfriamiento.

Este horno tiene capacidad de 80 ánodos 1400mm por cada sección, dispuestos de la siguiente manera: 12 ánodos parados, por fosa, en las dos primeras capas de abajo hacia arriba dando un total de 60 ánodos parados por sección. 4 ánodos acostados, por fosa, en la última capa dando un total de 20 ánodos acostados por sección.

Las fosas están delimitadas lateralmente por las paredes de flujo, las cuales se construyen con ladrillos refractarios especiales, que permiten el movimiento vertical de los gases. La combustión del gas natural que se inyecta en las secciones en etapa de fuego,

precocción, cocción y enfriamiento, se realiza en las cámaras de combustión, donde el aire entra en sentido contrario a la dirección del flujo del gas natural. Las secciones se comunican entre si a través de los canales de fuego que están en la parte inferior de los muros que soportan las paredes transversales. ^[6]

2.9.2.1 Funcionamiento de hornos II

Todos los fuegos de cada una de las naves, operan continuamente y su velocidad depende del ciclo de cocción utilizado el cual varia desde 28 a 48 horas. Dicho ciclo determina el tiempo de permanencia de una sección en cada una de las etapas que forman un fuego.

Durante cada una de estas etapas el ánodo recibe un tratamiento térmico diferente, el cual avanza desde temperatura ambiente hasta 1250°C, lo cual garantiza que los ánodos alcancen los $1150 \pm 50^{\circ}\text{C}$ requeridos, para luego disminuir a temperatura ambiente nuevamente. ^[6]

El calentamiento de los ánodos es orientado por curvas estándar y es regulado desde una sala o panel de control.

2.10 Propiedades de los ánodos cocidos

2.10.1 Permeabilidad al aire

Es la medida del tiempo necesario para que cierta cantidad de aire a presión atraviese la muestra y el resultado es expresado en (nPm). Este parámetro está relacionado con el quemado de los ánodos por CO_2 conjuntamente con la reactividad CO_2 y a la conductividad térmica. Una permeabilidad muy alta puede generarse por problemas en el proceso de fabricación tales como exceso de brea de alquitrán o por mala calidad de las materias primas.

2.10.2 Densidad aparente

Indica la relación que hay entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa. La densidad aparente afecta en forma directa a la permeabilidad, esto quiere decir que un ánodo más denso estará más compacto y por ende será menos permeable. Es importante mencionar que al aumentar la densidad aparente disminuye la porosidad.

2.10.3 Conductividad térmica

Es la propiedad que tienen ciertos materiales de actuar como conductor para transmitir el calor. Este parámetro está relacionado con la temperatura en el tope del ánodo, depende de la temperatura final de cocción y afecta la resistencia al choque térmico. Se requiere una conductividad térmica baja con el fin de reducir las pérdidas de calor de las celdas electrolíticas. Los valores de conductividad térmica no deben exceder el valor máximo ya que el ánodo tendería a quemarse.

2.10.4 Resistividad eléctrica

Es la capacidad que tiene un cuerpo de oponerse al paso de la energía eléctrica o hacer que esta se transforme en calor. El valor típico de resistencia eléctrica está entre 50 y 60 $\mu\Omega.m$ máximo, este parámetro depende de la temperatura final de cocción y de la resistencia eléctrica específica del coque utilizado. Las desviaciones muy altas a 60 $\mu\Omega.m$ pueden indicar la presencia de micro grietas debido a un gradiente de temperatura excesivamente alto durante la cocción. Generalmente no se desea resistividad baja por la restricción de que otras propiedades no sean influenciadas negativamente.

2.10.5 Resistencia a la compresión

El valor típico de la resistencia a la compresión está entre 40 - 55 MPa y para el módulo de Young el valor típico está entre 3500-5500 MPa. Estas propiedades están relacionadas con la resistencia del ánodo al choque térmico.

2.10.6 Coeficiente de expansión térmica

Su valor típico oscila entre $3.5 - 4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y está afectado principalmente por el tipo de coque utilizado. Los valores del CET menores que el mínimo aumentan la resistencia al choque térmico del ánodo.

2.10.7 Resistencia a la flexión

Los valores típicos para este ensayo están entre 8 – 14 MPa, una resistencia menor puede deberse a una baja estabilidad del grano de coque, por una inadecuada temperatura de formación o un gradiente de temperatura muy alto durante la cocción.

2.10.8 Reactividad al CO₂

El carbono reacciona con el dióxido de carbono de acuerdo a la siguiente reacción: $\text{CO}_2 (\text{g}) + \text{C} (\text{s}) = 2\text{CO} (\text{g})$ esta reacción, frecuentemente llamada reacción de Boudouard es independiente de la temperatura. Casi todo el monóxido generado a temperaturas mayores a 900 °C es termodinámicamente favorable. Las celdas electrolíticas operan a 950 y 960 °C, el dióxido de carbono se genera en la superficie del ánodo por oxidación electroquímica. En el ánodo comúnmente se presenta el fenómeno de reactividad selectiva, por medio del cual la matriz reacciona más que el coque y se libera de esta forma carboncillo en la celda, esta reactividad se estudia por medio de tres parámetros, los cuales son:

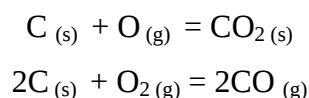
- Residuo de Reactividad. Valor típico: 84 – 95% mínimo.
- Polvo por Reactividad. Valor típico: 1 – 10% máximo.
- Pérdida por Reactividad. Valor típico: 4 – 10 máximo.

Unos de los porcentajes más críticos es el porcentaje de polvo, ya que su alta cantidad disminuye la eficiencia de corriente en la celda. Al generarse el polvo, este actúa como barrera en la conducción de corriente, lo que hace que el voltaje de operación aumente y se produzca el efecto anódico, la reactividad al CO₂ del ánodo, se ve fuertemente

afectada por la reactividad al CO₂ del coque utilizado en la fabricación del mismo, así como también por los efectos catalíticos de impurezas como el sodio, hierro y calcio.

2.10.9 Reactividad al aire

La exposición al aire de la superficie superior de un ánodo de carbón en servicio puede producir oxidación por debajo de la temperatura de combustión. El quemado al aire puede convertirse en un problema serio, el electrodo se consume y la temperatura sobre la superficie se incrementa. Dependiendo de la temperatura y de la accesibilidad del aire, se dan las siguientes reacciones:



El dióxido es favorable a temperaturas por debajo de 700 °C, la temperatura de la cara superior del ánodo varía de 400 a 650 °C, la reacción generada es exotérmica y causará el quemado por aire. La reactividad al aire se ve afectada por la reactividad del coque, la temperatura final de cocción y la conductividad térmica.

Los valores típicos de reactividad al aire son:

- Residuo de Reactividad. Valor típico: 65 – 90% mínimo.
- Polvo por Reactividad. Valor típico: 2 – 10% máximo.
- Pérdida por reactividad. Valor típico: 8 – 30% máximo.

2.11 Requisitos generales que debe reunir un buen ánodo ^[3]

- Densidad razonable (1,54 – 1,60 gr/cm³) y baja porosidad con la finalidad de minimizar la rata de consumo y aumentar su vida útil.

- Buena estabilidad térmica que permita su uso en ambientes corrosivos a elevadas temperaturas.
- Resistencia mecánica adecuada (40 – 55 MPa) para compresión en frío.
- Resistividad eléctrica baja (50 – 60 $\mu\Omega\cdot\text{m}$), con la finalidad de facilitar el paso de la corriente durante la operación electrolítica, de manera que las celdas opere a menor voltaje posible.
- Conductividad térmica baja (3 – 4,5 w/mK), para reducir las pérdidas de calor en las celdas.
- Resistencia adecuada al choque térmico cuando sea transferido desde o hacia la celda.
- Bajo contenido de impurezas, con el fin de prevenir contaminación del metal y reacciones catalíticas de oxidación.
- Debe pasar por un buen proceso de envarillado para evitar caídas del voltaje y mala distribución de corriente.

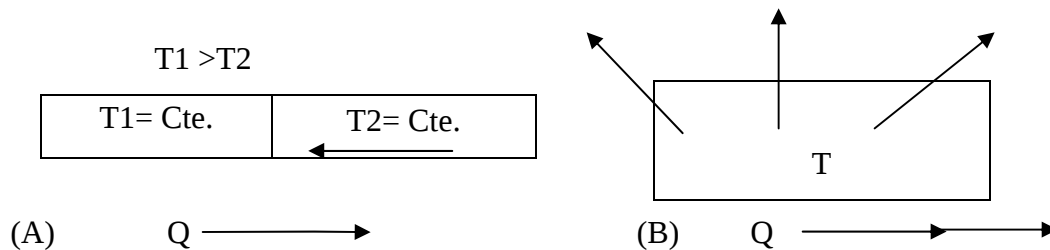
2.12 Transferencia de calor

La transferencia de calor puede definirse como la transmisión de energía térmica de una región a otra, resultado de la diferencia de temperatura existente entre ellas. La transferencia de calor permite predecir el tiempo en el cual se da la transferencia de energía y a su vez la distribución de temperatura en los cuerpos, en este proceso se cumple la segunda ley de la termodinámica y puede encontrarse en muchísimas operaciones industriales donde se generan reacciones químicas o se efectúa trabajo mecánico, eléctrico o magnético, tales como es el caso de los reactores nucleares, las plantas generadoras de energía eléctrica, industrias del aluminio, etc. Existen tres mecanismos de transferencia de calor: por conducción, convección y por radiación, y la cantidad de flujo de calor extraído o removido del sistema, dependerá del gradiente de temperatura y la resistencia al flujo los cuales pueden distinguirse como: ^[7]

- Flujo de calor (Q) estacionario, donde la distribución de temperatura (T) del sistema permanece constante con respecto al tiempo, y el
- Flujo de calor (Q) no estacionario, donde la distribución de temperatura (T) del sistema varía con respecto al tiempo.

2.12.1 Transferencia de calor por conducción

La conducción es un modo de transferencia de calor que se da en una sustancia homogénea cuando existe dentro de ella un gradiente de temperatura, el calor va desde el sitio de mayor temperatura hasta al de menor temperatura. En figura 2.13 se muestra el mecanismo de transferencia de calor por conducción.^[7]



La figura 2.13, la parte (A) representa el flujo de calor estacionario y la parte (B) representa el flujo de calor no estacionario.

La rapidez de la transferencia de energía es proporcional al gradiente normal de temperatura y al área de transferencia de calor.

2.12.2 Transferencia de calor por convección

Es la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido, se trata de una modalidad combinada ya que el calor en la interfase sólido-fluido se transfiere por conducción mediante las colisiones entre las moléculas del sólido y las del fluido. Como

resultado de estas acciones se produce en el fluido un cambio de temperatura y en consecuencia una variación de densidad lo que resulta un movimiento de fluido, de esta manera se transfiere la energía térmica por transporte de masa del fluido. ^[7]

2.12.3 Transferencia de calor por radiación

Este fenómeno de transferencia de calor, se da debido a un flujo de energía térmica en forma de ondas electromagnéticas (de cierta frecuencia) entre dos cuerpos situados a una distancia determinada. Las ondas de calor son función de la temperatura en la superficie del cuerpo y se transfieren en forma de radiación. ^[7]

2.13 Modelo Matemático

Un modelo matemático puede definirse, de una manera general, como una formulación o ecuación que exprese las características fundamentales de un sistema o proceso físico en términos de ecuaciones diferenciales, ecuaciones integrales, etc. Los modelos se clasifican desde simples relaciones algebraicas hasta grandes y complicados sistemas de ecuaciones diferenciales, las características habituales de los modelos matemáticos del mundo físico son:

- Describe un sistema o proceso en términos matemáticos.
- Representa una idealización y una simplificación de la realidad, es decir, ignoran los procesos insignificantes del proceso natural y se concentra en sus manifestaciones elementales.
- Conduce a resultados predecibles, y en consecuencia, puede emplearse para propósitos de predicción. ^[8]

2.14 Método del elemento finito

El método del elemento finito es una manera de encontrar una solución numérica a un problema específico cuya solución analítica es en exceso complicada o sencillamente no

existe. El método ha logrado un gran auge en tiempos recientes debido al desarrollo de la computación, siendo parte integral e imprescindible del proceso de diseño moderno.^[1]

La idea básica del método del elemento finito es encontrar la solución de un problema complejo sustituyéndolo por uno más sencillo. De esta forma se puede obtener una solución bastante aproximada a la exacta. Una sencilla descripción del método de elementos lo concibe como la división de una estructura en varios elementos, describiendo el comportamiento de cada uno de manera simple, conectándolos con “nodos” que los unen entre sí.^[1]

El procedimiento resulta en un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas, donde las mismas representan el equilibrio de los nodos pudiendo haber cientos o miles de estas ecuaciones, por lo que el uso de computadoras para resolverlas es obligatorio.^[9]

En términos ingenieriles, el método pretende responder como es el comportamiento de una variable independiente, como la temperatura, en puntos concretos de un entorno espacial conocido a partir de lo siguiente:

1. La discretización de ese entorno en elementos finitos volumétricos más pequeños.
2. La conexión matemática y física de los puntos de la unión que sirvieron para formar tales elementos.
3. La obtención de los valores particulares de las variables independientes en algunos nodos de la región estudiada.
4. El conocimiento de las leyes que rigen la relación entre las variables.

Para poder cumplir con dichas condiciones se plantea un conjunto de ecuaciones algebraicas que describen el comportamiento físico de cada nodo, ensamblándolas en un

gran sistema que las conecta a través de un método iterativo para converger en la solución definitiva del problema.

2.14.1 Procedimiento general de la modelación con elementos finitos

La modelación con elementos finitos es la simulación del comportamiento físico de un sistema cualquiera por un proceso numérico basado en la interpolación polinomial de piezas discretas. Para obtener una solución confiable del método del elemento finito, se debe primero comprender el problema físico, tener los conocimientos básicos del mismo y de la teoría del elemento finito así como conocer el comportamiento del programa o software utilizado para resolver el problema.

2.14.1.1 Discretización del dominio

La discretización del dominio consiste en el primer paso para la solución de un problema con el método del elemento finito. Este paso es equivalente a reemplazar un sistema con infinitos grados de libertad por otro con un número finito de estos. Dicho proceso consiste fundamentalmente en un juicio ingenieril, considerando formas, tamaños y configuraciones de los elementos de forma tal, de simular el sistema de la forma más precisa posible, evitando al máximo el incremento de esfuerzo computacional necesario para generar una solución.^[10]

2.14.1.2 Tipo de elemento

Para realizar la discretización se requiere escoger elementos de acuerdo a la configuración del sistema considerado. Cuando la geometría, propiedades del material y otros parámetros, como la temperatura, pueden ser descritos en términos de una sola coordenada espacial, se pueden usar elementos unidimensionales. Aunque este elemento posee una sección transversal se muestra esquemáticamente como una línea.

En casos donde dicha sección transversal puede cambiar con la longitud, se hace necesario describir el problema con el uso de elementos bidimensionales con dos coordenadas espaciales independientes. Los elementos básicos para realizar análisis bidimensionales son los triangulares. También se puede recurrir al uso de cuadriláteros como elementos, los cuales consisten en la unión de dos elementos triangulares. De manera análoga a lo descrito anteriormente, si las propiedades y la configuración en general del sistema cambian en tres coordenadas, se puede recurrir a una idealización con el uso de elementos tridimensionales como cubos o tetraedros.^[10]

2.14.1.3 Tamaño de los elementos

El tamaño de los elementos es una variable importante en la discretización, ya que influye directamente en la convergencia de la solución, razón por la cual debe manejarse con cuidado. Mientras menor sea el tamaño de los elementos se espera que la solución sea más precisa. Sin embargo es necesario recordar que el uso de elementos pequeños aumenta el tiempo de cálculo. Otro aspecto fundamental para escoger el tamaño de los elementos radica en la relación de aspecto. Este parámetro no es más que la relación entre la dimensión más grande del elemento y la menor. Los elementos con una relación de aspecto cercana a la unidad presentan mejores resultados.^[10]

2.14.1.4 Ubicación de los nodos

Si el cuerpo a simular no posee cambios abruptos en su geometría, propiedades y condiciones externas, este puede ser dividido regularmente pudiendo realizar un espaciamiento regular de los nodos. Por otro lado si dicho cuerpo presenta discontinuidades es necesario ubicar nodos en estos lugares.^[1]

2.14.1.5 Número de elementos

El número de elementos a ser escogido para la idealización se relaciona a la precisión adecuada, tamaño de los elementos y número de grados de libertad envueltos.

Aunque de manera general el incremento en el número de elementos se traduce en mejores resultados, para cada problema específico existe un límite después del cual la precisión no mejora.^[1] Este comportamiento puede observarse gráficamente en la Figura 2.14.

En dicha Figura puede observarse que no existe una mejora apreciable en la precisión de la solución después del número crítico de elementos N .

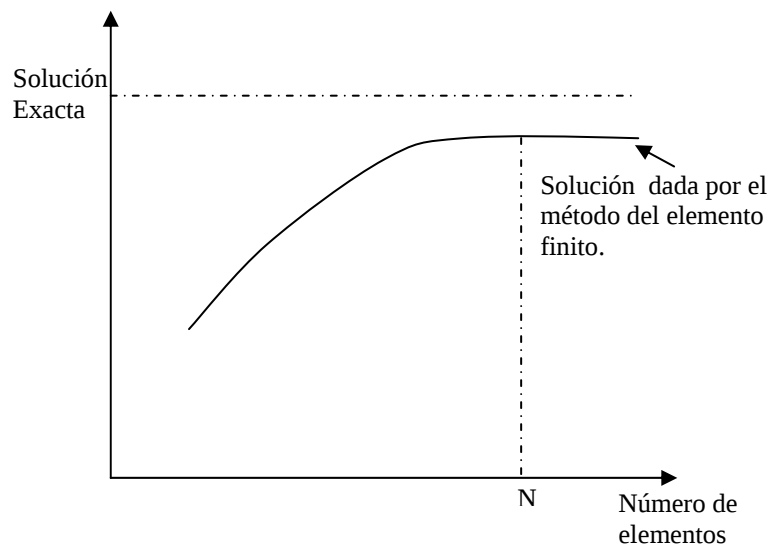


Figura 2.14 Efecto del número de elementos en la convergencia de la solución del método.^[10]

2.14.1.6 Simplificación de la geometría del cuerpo

Si dentro de la configuración interna del cuerpo existe algún plano de simetría, que corresponda a la geometría, propiedades y condiciones externas, se puede suponer esta condición para el desarrollo del problema, disminuyendo así el número de elementos y con esto el tiempo de cálculo del computador.^[1] Para un caso térmico como el de la Figura 2.15, se puede considerar esta condición debido a que existe simetría tanto en la geometría como en las cargas convectivas aplicadas.

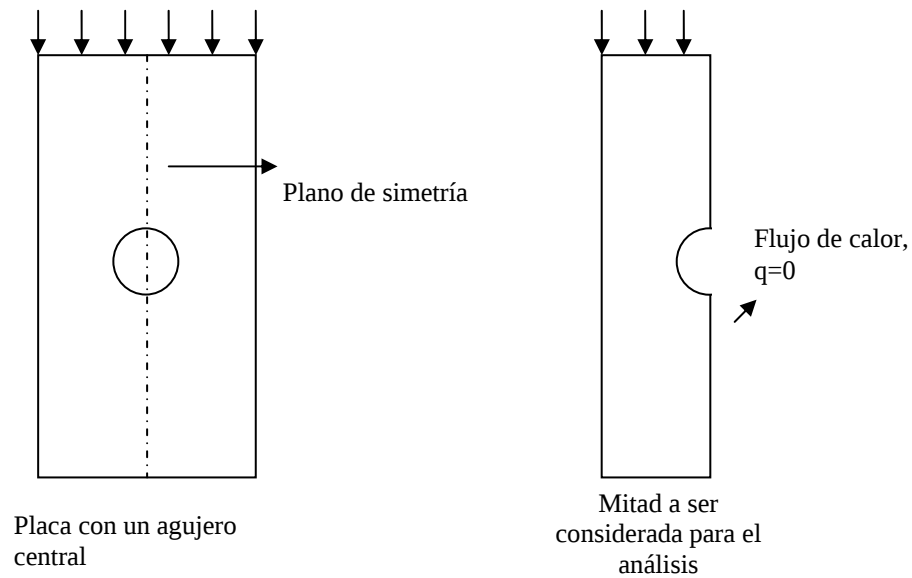


Figura 2.15 Simetría geométrica y de carga^[10]

Adicionalmente al realizar esta simplificación es necesario aplicar al plano de simetría, la condición de frontera adiabática, para poder encontrar la solución correspondiente.

2.15 Programa ANSYS

2.15.1 Descripción

El software de análisis de elemento finito, el ANSYS es un programa utilizado para el desarrollo de los siguientes aspectos:

- Construir modelos en computadoras o transferir modelos CAD de estructuras, productos, componentes o sistemas.
- Respuestas a estudios físicos tales como esfuerzos, distribución de temperaturas campos electromagnéticos.
- Optimizar un diseño rápidamente en el desarrollo de un proceso para reducir los costos de producción.

- Ser prueba prototipo en entornos donde puede ser no desarrollada o imposible (por ejemplo, aplicaciones biomédicas).

El paquete comercial ANSYS fue introducido en 1970 por el Dr, John Swanson y Swanson Analysis Systems, inc. (SAS). ^[11]

A partir de este momento se han introducido una serie de mejoras y modificaciones al programa, convirtiéndolo hoy en día en una amplia gama de productos que pueden ser utilizados en una gran variedad de computadoras; partiendo desde los supermainframes hasta las computadoras personales. ^[11]

Dentro de las aplicaciones que se derivan del programa ANSYS se puede destacar, los análisis estructurales lineales o no lineales; los análisis térmicos y termoeléctricos en estado estacionario y transitorio; y los análisis magnéticos entre otros.

El programa Ansys está organizado en dos niveles básicos:

- Nivel inicio
- Nivel procesador

El nivel de inicio actúa como una puerta para entrar o salir del programa. También es usado para ciertos controles globales del programa tales como cambiar el nombre del archivo de trabajo (jobname), limpiar la data y copiar archivos binarios. Cuando se entra al programa, se está en el nivel de inicio. ^[11]

En el nivel procesador, varios procesadores están disponibles. Cada procesador está en un set o funciones que desarrollan un análisis específico. Entre ellos se tienen

1- Preprocesamiento: En esta etapa se preparan los datos requeridos dependiendo del tipo de análisis, como se describe a continuación: se construye el modelo representado

por nodos y elementos (geometría), luego se introducen las propiedades de los materiales, tipos de elementos y se les dan las condiciones de carga y vinculaciones o restricciones.

Etapas del preprocesamiento ^[11]

1.1 Generación geométrica del modelo: Este es probablemente la porción del análisis que se lleva más tiempo. En este paso se desea crear un modelo geométrico lo mas aproximado de un prototipo físico. En un sentido amplio el modelo contiene las propiedades del material y las características geométricas que se puedan usar para representar el sistema físico.

1.2 Mallado del modelo sólido: En este paso se crea una malla de nodos y elementos del modelo. El mallado del modelo consiste en tres pasos:

- Establecimiento de los atributos de los elementos: antes de generar una malla de nodos y elementos se debe especificar el tipo de elemento, establecer las constantes reales, establecer las propiedades del material y establecer el sistema de coordenadas de los elementos.
- Establecimiento de los controles de mallado: Aquí se establece la forma y el tamaño de los elementos a ser usados en el mallado del modelo sólido. Este paso es uno de los más importantes en el análisis, ya que afecta la precisión de los resultados obtenidos y el tiempo de análisis del computador.
- Generación de la malla: en este paso se ejecuta el inicio de la generación de la malla de elementos finitos.

1.3 Aplicación de las cargas y obtención de la solución: Una vez iniciado la carga de data, se mantiene un contacto entre usuario y programa. En este paso se define el tipo de análisis y sus opciones, se aplican las cargas, se dan las

condiciones de contorno o de frontera del modelo, se especifican las opciones de los pasos de carga y se inicia la solución por elementos finitos.

2- Solución: Esta fase es invisible para el usuario; aquí se convierte la data en códigos binarios, se formula la ecuación matricial para cada elemento, se acoplan las matrices formuladas, se inicia un proceso de sustitución para la primera iteración y finalmente se efectúan los cálculos de los flujos vectoriales. La naturaleza de las ecuaciones y los resultados dependen del tipo de análisis a realizar.

3- Post-Procesamiento: En esta etapa, al igual que la primera el usuario interacciona con el programa. Esta fase permite realizar el análisis e interpretación de los resultados, generalmente en forma gráfica mediante trazados de curvas, gráficas tridimensionales, tablas, etc.

2.15.2. Métodos para la generación del modelo ^[11]

Pueden usarse dos diferentes métodos para generar un modelo:

- Modelo sólido
- Generación directa

A través del método del modelo sólido, se describen las condiciones geométricas del modelo, se establece el control acerca del tamaño y la forma deseada de los elementos y entonces el programa genera los nodos y elementos automáticamente.

Por el contrario, con el método de generación directa, hay que indicar la localización de todos los nodos y la forma, tamaño y conexión de todos los elementos necesarios para generar el modelo. Este método es esencialmente manual.

2.16 Análisis Térmico

Este análisis es utilizado para calcular la distribución de temperaturas y las variables relacionadas térmicamente en un objeto. Las variables térmicas más importantes son: la cantidad de calor generado o perdido, los gradientes térmicos y el flujo térmico.

El análisis térmico juega un papel importante en el diseño de muchas aplicaciones de ingeniería: motores de combustión interna, intercambiadores de calor, sistemas de tuberías, componentes electrónicos, envases a presión y procesos de conformado de metales a altas temperaturas, solo por mencionar algunos.^[11]

La ecuación que rige los fenómenos térmicos en cuerpos isotrópicos (ANSYS Tutorial 1995) es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde:

$C_p : C_p(x, y, z, T)$ = Calor específico a presión constante

$\rho : \rho(x, y, z, T)$ = Densidad del material

$K : K(x, y, z, T)$ = Conductividad térmica del material

t = Tiempo

q = Calor generado por fuentes internas

$T : T(x, y, z, t)$ = Temperatura en el sólido

2.16.1 Análisis térmico transitorio ^[11]

El análisis térmico transitorio es probablemente la forma más común de análisis térmico, ya que la mayoría de los fenómenos de transferencia de calor en la naturaleza son transitorios, es decir, varían en función del tiempo. Las temperaturas calculadas por un análisis térmico transitorio son comúnmente usadas como datos para análisis estructurales para evaluaciones de esfuerzos térmicos.

Un análisis térmico transitorio (transferencia de calor) es usado para determinar la distribución de temperatura y otras cargas térmicas en una estructura o componente que esta sujeto a cargas térmicas transitorias. Por transitorio, se entiende que las cargas térmicas y por lo tanto la distribución de temperatura, son función del tiempo. Si esta dependencia del tiempo no existe o es considerada insignificante, el análisis a desarrollar será un análisis estacionario.

En sistemas en estado transitorio, la distribución de temperatura se conoce, pero debe determinarse su variación con el tiempo. Por lo tanto es necesario deducir la distribución de temperatura para algún tiempo futuro, a partir de una distribución dada en un tiempo anterior.

La ecuación que gobierna un análisis térmico transitorio es:

$$[C] \{T'\} + [K] \{T\} = \{Q\}$$

De donde:

$[C]$ = Matriz del calor específico

$[K]$ = Matriz de la conductividad térmica

$\{T\}$ = Vector nodal de temperatura

$\{T'\}$ = Derivada de $\{T\}$ con respecto al tiempo, y

$\{Q\}$ = Vector nodal del flujo de calor

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este trabajo, se realizó la modelación matemática del comportamiento térmico del horno de cocción I de la empresa C.V.G ALCASA, para lo cual se definió un modelo matemático en 2-D y estado transitorio asistido por el programa ANSYS basado en el método del elemento finito. Dicho programa ayudó a obtener la distribución de temperaturas en la fosa de la sección del horno. Este modelo servirá de ayuda para tener un mejor control sobre las temperaturas del horno, con el fin de mejorar la calidad del ánodo y por ende su desempeño en las celdas de reducción. Este procedimiento se va a dividir en dos partes, que son: la caracterización del horno y la modelación matemática del mismo.

3.1 Selección de muestras

La selección de las secciones fue realizada de forma no aleatoria y se hizo de la siguiente manera: de cincuenta y seis (56) secciones que posee Hornos de cocción I se selecciono una sección característica (sección 54) y de cinco fosas que tiene cada sección se selecciono una fosa en particular (fosa N° 03), a parte de esta sección se trabajo con las secciones: (12), (26) y (40) para verificar la reproducibilidad y repetitividad del proceso de cocción de ánodos en el horno de cocción I de la empresa C.V.G. ALCASA. Las secciones seleccionadas se especifican en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Secciones seleccionadas en el estudio

N° de la Sección	N° de la Fosa	Ubicación
54	3	Hornos I, Zona 4
12	3	Hornos I, Zona 1
26	3	Hornos I, Zona 2
40	3	Hornos I, Zona 3

Las secciones fueron escogidas tomando en cuenta los siguientes factores: ubicación en el horno, disponibilidad de materiales para la realización de la prueba y etapa en el proceso de cocción.

3.2 Técnicas y/o Instrumentos de Recolección de Datos

En este estudio se aplicaron diversas técnicas para la recopilación de datos ya que debido a la cantidad limitada de módulos para el registro automatizado de temperaturas, hubo la necesidad de realizar las medidas de temperatura de cuatro termopares de forma manual. Se realizaron consultas a personal calificado sobre la instalación y configuración del arreglo de los termopares en la fosa seleccionada para el estudio.

De igual forma se tiene que, para hacer efectivas estas técnicas se hizo empleo de una serie de materiales e instrumentos. Los materiales utilizados para llevar acabo esta experiencia fueron los siguientes:

- Alambre Alumel calibre 8 tipo K, para la fabricación de los termopares.
- Alambre Cromel calibre 8 tipo K, para la fabricación de los termopares.
- Tubos de ½ pulg, de acero galvanizado, utilizados como camisa protectora para los termopares.
- Tubos de inspección de 1 pulg, usados como termopozo para las termocuplas.
- Cinta métrica, para la medición de las diferentes longitudes de los alambres y tubos, así como para la medición de las dimensiones del horno.
- Protector cerámico, para mantener aislados los alambres del termopar.
- Cable calibre 16 tipo K, para la toma de temperaturas.
- Conector cerámico tipo K, para la instalación de los cables en los termopares.

- Módulos tipo K, para la lectura de las temperaturas.
- Programa Emulador Opto Run 22, para realizar el registro de temperaturas.
- Computador personal, el cual contiene el programa emulador y permite hacer el seguimiento de temperaturas del proceso de cocción al mismo tiempo que almacena los datos obtenidos.
- Registrador manual de temperaturas, marca Omega.
- Cámara digital fotográfica, marca Sony.

3.3 Flujograma experimental

La metodología experimental empleada se puede resumir en la Figura 3.1.

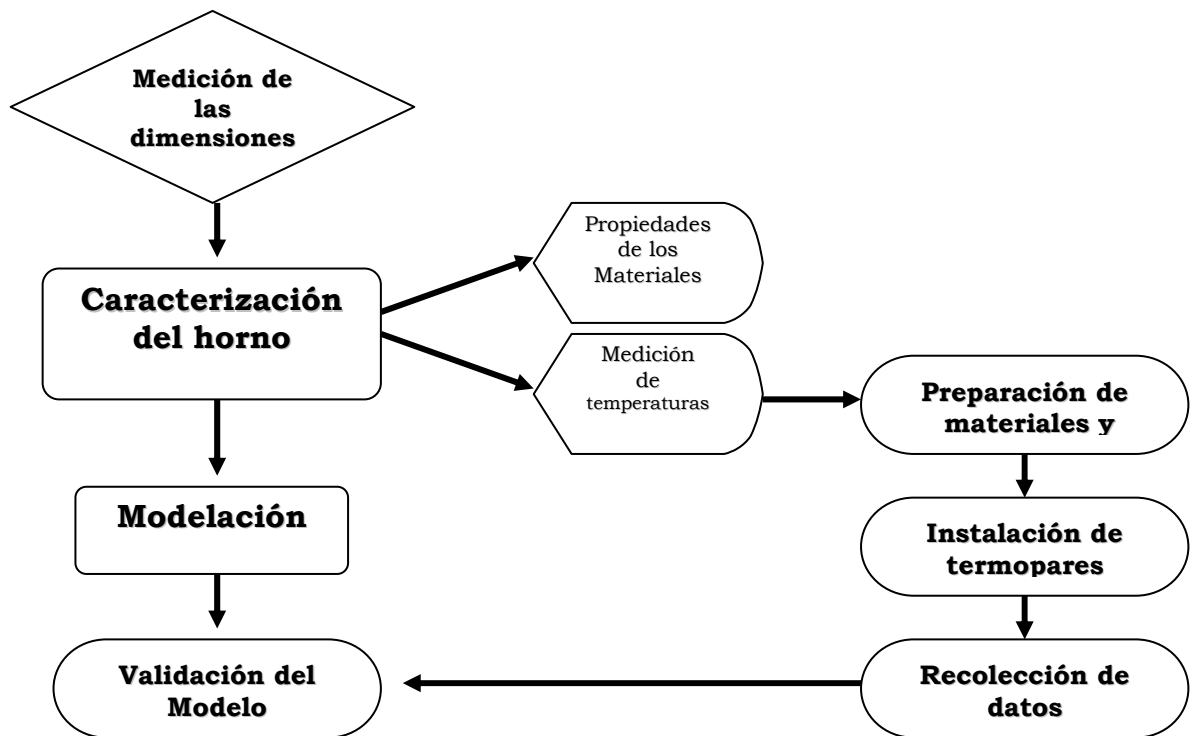


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología experimental empleada.

3.3.1 Medición de las dimensiones del horno

Para la realización del modelo el primer paso consiste en realizar la medición de las dimensiones del horno. Para ello se empleó una cinta métrica de 3 metros de largo y los planos de diseño original del horno. En Hornos I se tomaron las medidas correspondientes de las diferentes dimensiones de las secciones y sus respectivas fosas. Dichas medidas se utilizaron para la elaboración de la geometría del modelo, que se pueden observar en las Figuras 3.2 y 3.3.

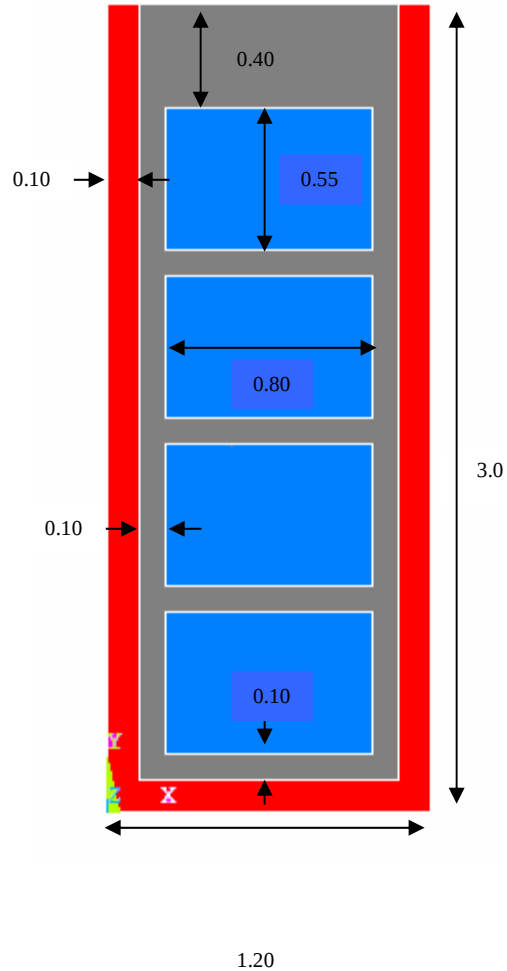


Figura 3.2 Vista frontal de una fosa del horno, medidas en metros.

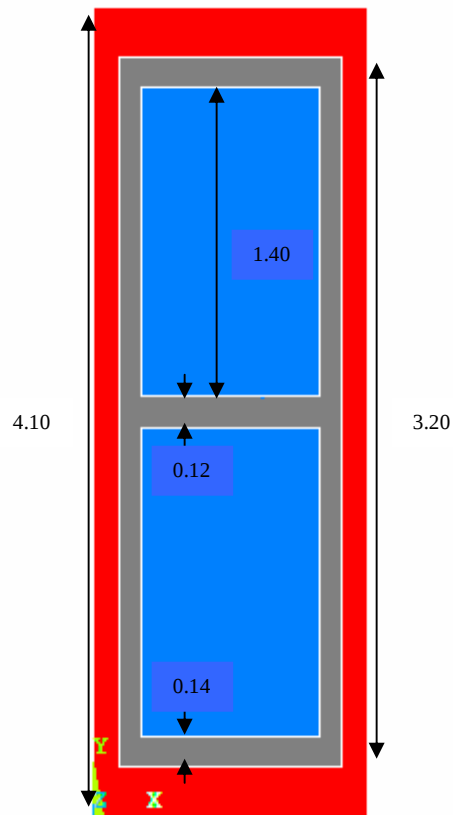


Figura 3.3 Vista de planta de una fosa del horno, medidas en metros.

Estas dimensiones serán posteriormente utilizadas para la elaboración del modelo en el programa ANSYS.

3.3.2 Caracterización del horno

La caracterización del horno está dividida en dos etapas:

- Recopilación de las propiedades de los materiales del horno.
- Medición de temperaturas.

3.3.2.1 Recopilación de las propiedades de los materiales del horno

Para la realización del modelo en el programa ANSYS, se requieren las propiedades físicas y térmicas de los materiales del horno, así como las propiedades del ánodo y del coque de petróleo, dichas propiedades son: conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (C_e).

Las propiedades de los materiales del horno son muy importantes para la elaboración del modelo, ya que de estos depende en gran medida la exactitud de los resultados del modelo matemático.

3.3.2.2 Medición de temperaturas

Para realizar el registro de temperaturas durante todo el proceso de cocción de ánodos, se emplearon termopares tipo K (Cromel-Alumel), que tienen un intervalo de operación que va desde -270°C hasta 1300°C , intervalo dentro del cual se encuentran las temperaturas de operación para cualquier componente del horno.

3.3.2.2.1 Preparación y Fabricación de Termopares

Para fabricar los termopares se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Los alambres calibre 8 para termopares tipo K se cortaron a la medida de cada longitud especificada (1,0 – 2,30 y 3,30m mas 20cm de holgura para que los alambres sobresalgan del tubo de protección y poder así tomar lectura de las temperaturas) para la prueba, se empalmaron y posteriormente se soldaron en uno de sus extremos.

2. A los alambres desnudos calibre 8 de las termocuplas se le colocaron protectores cerámicos para evitar el contacto de los alambres en otro punto distinto al soldado.

3. Los tubos de acero galvanizado se cortaron a las medidas especificadas ya definidas y se soldaron en uno de sus extremos para evitar la entrada de los gases producidos durante la cocción de los ánodos que puedan dañar los termopares. Después de sellados uno de sus extremos se introdujeron por el otro extremo los alambres que componen el termopar y el tubo se relleno con cemento refractario (HARWACO BONNS), este cemento le brinda a los alambres una protección adicional de los gases que desprende la brea de alquitrán durante el proceso de cocción, ya que este es un ambiente muy agresivo al que estarán sometidos los termopares, se deja que el cemento fragüe, para acelerar el proceso de fraguado los termopares se pueden colocar cerca del horno de cocción.

4. En el otro extremo de los termopares se colocaron los conectores cerámicos que actuarán como dispositivo de salida de las señales emitidas por el termopar y poder hacer efectivas la interpretación de esas señales.

5. Fabricación de termopozos.

En C.V.G ALCASA disponen de tuberías para inspección de la temperatura, estos se utilizaron como termopozos y para su utilización en esta prueba se realizaron los siguientes pasos: Se cortaron y soldaron los tubos de inspección de 1pulg, de diámetro y 2m de longitud para poder alcanzar las longitudes establecidas para hacer el estudio, luego en uno de sus extremos los termopozos son golpeados con una mandarina hasta producirse una soldadura mecánica y posteriormente son soldados con soldadura eléctrica, esto con el fin de evitar la entrada de partículas del material de empaque (coque) o gases ya que estos producirían el deterioro acelerado de los termopares.

3.3.2.2 Instalación de los termopares

Finalmente obtenidos los termopares en el paso cuatro, son introducidos por el extremo abierto del termopozo obtenido en el paso cinco. De esta manera los termopares están listos para ser introducidos en la fosa. Los termopares se instalan en la fosa mientras

se realiza el empaque de la misma, tratando de hacer una distribución lo más homogénea posible, para obtener curvas de cocción en diferentes zonas y a varias profundidades.

3.3.2.2.3 Recolección de datos

Luego de instalados los termopares en la fosa de estudio tal como se puede observar en la Figura 3.4, se realiza la conexión desde el conector cerámico de los termopares, a través del cable 16 tipo K hasta los módulos transductores que interpretan las señales eléctricas emitidas por los termopares y las envía hasta el computador en donde a través de un programa emulador (Opto run 22) se registran y se da lectura a las temperaturas que arroja cada termopar de forma simultanea cada minuto, la instalación de los módulos tipo K y los cables que van a los termopares pueden observarse en la Figura 3.5. Cada 24 horas el programa abre un archivo nuevo que luego de transcurridas las 24 horas guardara en la carpeta historial en donde quedará el registro de las temperaturas leídas, en la figura 3.6 se presenta el computador con la distribución de los termopares en la fosa.

Una vez que el programa emulador (Opto Run 22) haya guardado la información correspondiente a un día de lectura de temperaturas, este archivo se puede extraer del computador y llevarlo a otro para convertirlo en un archivo de hoja de cálculo para poder manipular e interpretar los datos a través de tablas y gráficos.



Figura 3.4 Ubicación de las termocuplas en la fosa de prueba

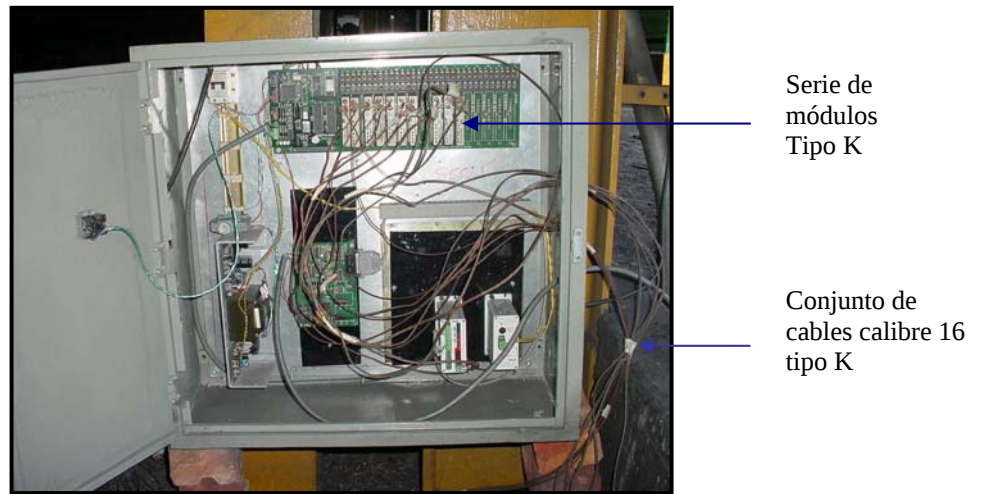


Figura 3.5 Montaje e instalación de interacción entre termocuplas y módulos tipo K.



Figura 3.6 Visualización de la distribución de termocuplas en el monitor.

Debido a la cantidad limitada de módulos fue necesario realizar mediciones de temperatura de manera manual, para esto se contó con un registrador digital con el cual se midieron cuatro termopares en la fosa estudiada (fosa N° 3 de la sección 54), además de las fosas en las otras zonas de fuego para comparar su comportamiento térmico con el de esta última, el medidor digital se ilustra en la Figura 3.7, para medir las temperaturas de esta manera fue necesario la utilización de un termopar manual el cual se conecto al equipo registrador, en la Figura 3.8 se muestra el termopar manual.



Figura 3.7 Medidor digital de temperaturas



Figura 3.8 Termopar manual.

3.4 Modelación

Para la etapa de definición del modelo se empleó el software comercial “ANSYS”, el cual está basado en el método del elemento finito el cual permite establecer geometrías, materiales y sus propiedades, y además realizar el mallado y el arreglo nodal para su posterior solución de forma iterativa.

Para la realización del modelo térmico del horno durante el proceso de cocción de ánodos, se consideró un análisis bidimensional de un corte de la sección transversal de la fosa integrante de la sección, asumiendo un plano de simetría en la mitad del corte de la sección transversal de la fosa. Adicionalmente se considera que en dicho plano el sistema es adiabático.

El primer paso consiste en establecer la geometría del modelo, esta se realiza de acuerdo a los planos del diseño original del horno y de acuerdo a las medidas tomadas en el horno, identificando los distintos materiales como áreas separadas.

Una vez establecida la geometría del modelo se procede a realizar el mallado del mismo. El primer paso consiste en fijar el tipo de elemento. El elemento utilizado consiste en un sólido térmico con la capacidad de conducir calor en dos dimensiones. Este elemento posee cuatro nodos con un grado de libertad, representado por la temperatura, para cada nodo, siendo aplicable para condiciones transitorias. Ver elemento en la Figura 3.9.

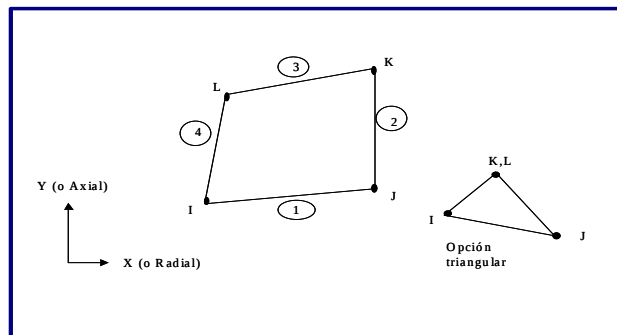


Figura 3.9 Geometría y ubicación de los nodos para el elemento de mallado.

El mallado es obtenido mediante un generador de malla integrado con el software utilizado. Una vez realizado este mallado se obtuvo un total de 860 elementos y 482 nodos. En la Figura 3.10, se observa un ejemplo del modelo mallado en una vista transversal de la fosa.

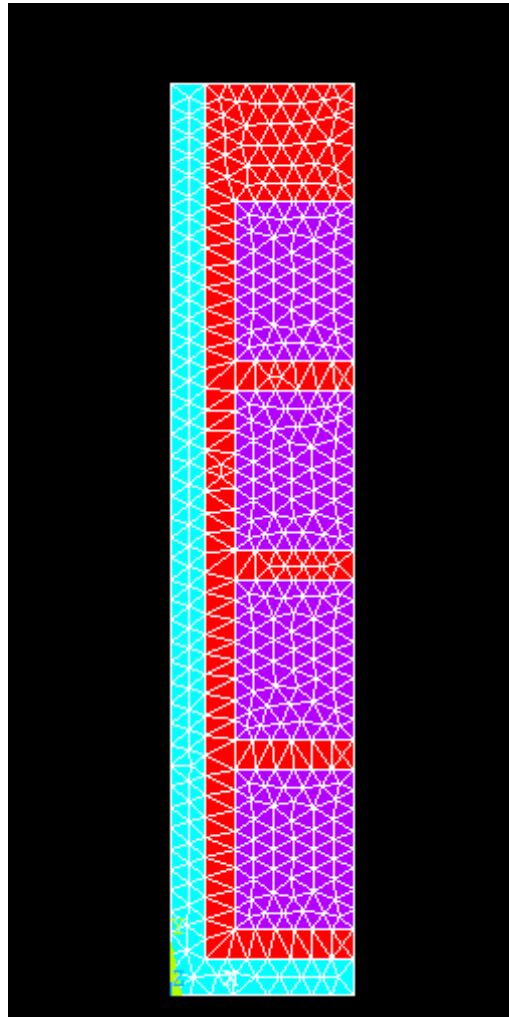


Figura 3.10 Malla empleada.

Para iniciar la solución del modelo es necesario imponer las condiciones de borde, provenientes de las temperaturas medidas experimentalmente. De manera adicional se incluyen las condiciones convectivas.

3.5 Validación del modelo

Para poder conocer la confiabilidad de los resultados de distribución de temperaturas que arroja el programa, es necesario hacer una validación de los mismos. Para ello, se realizaron mediciones de temperaturas durante el proceso de cocción de ánodos, estos valores se compararon con los obtenidos en el modelo, comprobando así la precisión del mismo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados presentados en este capítulo estarán divididos en dos partes: La primera parte consta de los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales realizadas en el horno de cocción de ánodos de la empresa C.V.G ALCASA, aquí se obtuvieron las curvas de cocción de ánodos a diferentes profundidades, también se grafico la curva de cocción teórica para realizar la comparación, estos resultados fueron utilizados para realizar la validación del modelo matemático. La segunda parte de estos resultados son los obtenidos al realizar el modelo matemático del comportamiento térmico del horno, los cuales se presentan en forma de modelos bidimensionales que contienen isothermas de temperaturas que describen el perfil térmico del horno de forma transitoria en diferentes intervalos de tiempo.

4.1 Resultados experimentales obtenidos en el horno de cocción de ánodos (Sección 54, fosa 3) de C.V.G ALCASA.

A continuación se presentan en la Figura 4.1 las curvas de cocción obtenidas a las diferentes profundidades y en diferentes zonas de la fosa, la curva teórica de cocción y la curva promedio experimental de cocción, para todas estas curvas se cumplió un ciclo de cocción de 56 horas.

Perfil Térmico de Cocción

Sección 54, Fosa 3 de Hornos I

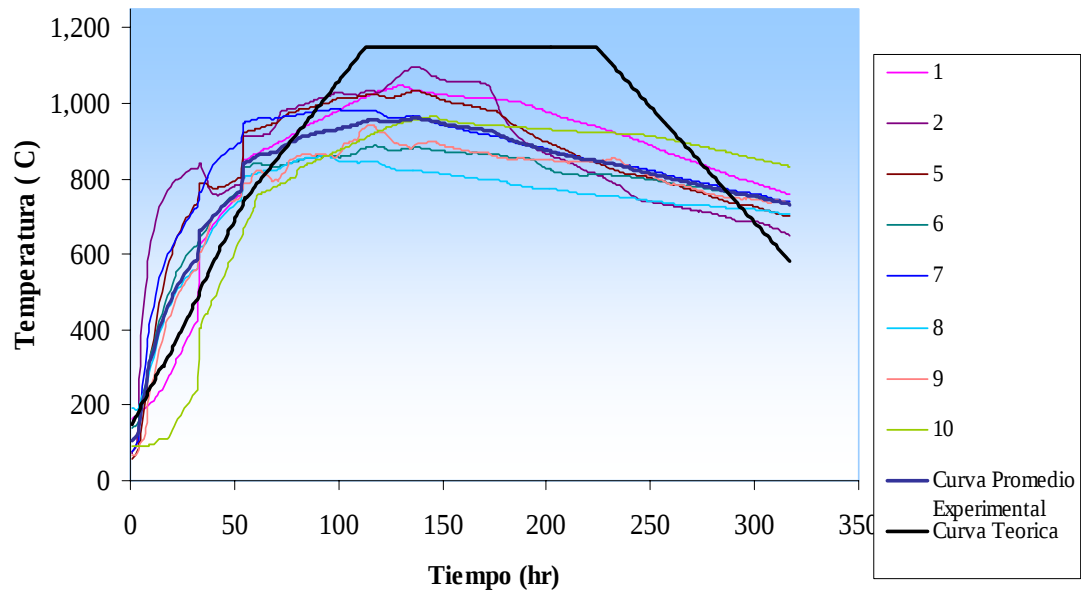


Figura 4.1 Curvas de cocción de ánodos que representan el perfil térmico de cocción

Es importante señalar que de las diez curvas de cocción experimentales que se debían haber obtenido de las diez termocuplas distribuidas en la fosa para el estudio y que se medirían de manera automatizada, solo se obtuvieron y graficaron ocho curvas ya que dos de las diez termocuplas utilizadas se dañaron durante el proceso de cocción a causa del fenómeno de descomposición en verde (ataque selectivo del azufre) en uno de los alambres (alumel) que compone la termocupla, debido al ambiente tan agresivo al que se encuentran expuestos estos instrumentos de medición.

Como resultado de esas tres termocuplas dañadas se obtuvieron gráficos de mediciones erróneas, dichos datos y gráficos no serán tomados en cuenta para efectos del promedio experimental de cocción.

En el Figura 4.1 se puede observar que las curvas de cocción experimentales presentan un comportamiento similar entre si, pero ninguna de ellas alcanza los valores máximos de la curva teórica en la etapa de cocción principal o fuego directo. Los gradientes térmicos obtenidos en la etapa de precalentamiento resultaron ser mayores que los presentados por la curva teórica.

En la etapa de precalentamiento del proceso de cocción se muestra un rápido incremento de la temperatura debido a una rata de calentamiento de $11,68\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$, el rápido incremento de la temperatura también se ve beneficiado por las reacciones exotérmicas por parte de la liberación de volátiles contenidos en la brea de alquitrán, ya que en el rango de temperaturas de $350\text{ a }600\text{ }^{\circ}\text{C}$ es donde se liberan los volátiles de la brea que contiene el ánodo.

En la etapa de cocción principal las curvas de cocción alcanzaron sus valores máximos, estos valores varían entre 822°C y 1097°C que se encuentran por debajo del valor máximo teórico de 1150°C , en la termocupla 2 se observa la temperatura más alta durante la etapa de cocción principal (1097°C), también puede observarse que el tiempo de permanencia de dicha temperatura (Soaking Time) no se mantiene el tiempo necesario y por el contrario baja gradualmente, este fenómeno puede deberse a una mala combustión

del gas (combustible) y al aumentar el caudal de flujo del gas cuando se entra en la etapa de cocción principal, queda una cantidad de gas que no combustiona por lo tanto enfría el horno, esta combustión incompleta y por ende el enfriamiento del horno se deben al mal estado físico de las paredes del horno y tanquillas del mismo, en donde se presentan obstrucciones que evitan el flujo tanto del gas combustible como del aire necesario para la combustión, así como también infiltraciones que producen una caída de presión de succión necesaria para llevar a cabo un buen proceso de combustión y por tanto no permiten una buena distribución de temperatura en el horno, no logrando tener de esta manera un buen tratamiento térmico para los ánodos.

Haciendo una comparación del perfil térmico promedio de cocción real con respecto a la curva teórica en el Figura 4.2, se puede observar que la curva de cocción experimental tiene un comportamiento aproximado a la curva teórica en la etapa de precalentamiento, luego en la etapa de cocción principal los valores de temperatura difieren considerablemente a los presentados en la curva teórica, aunque el comportamiento de la curva experimental es aproximado, para la etapa de enfriamiento ambas curvas de cocción presentan un comportamiento muy diferente, ya que en la prueba experimental el enfriamiento solo ocurrió de forma natural, es decir, no funcionaron los ventiladores, por lo tanto el enfriamiento de los ánodos fue muy lento.

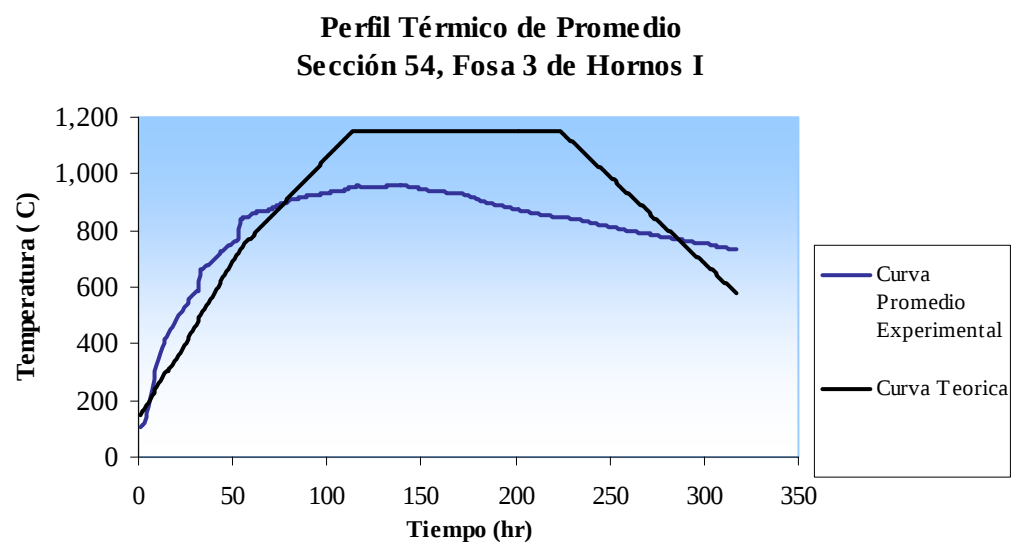


Figura 4.2 Curva de cocción promedio.

4.2 Resultados de los Modelos Bidimensionales Obtenidos con el Programa ANSYS, en la Etapa de Precalentamiento.

4.2.1 Vista frontal

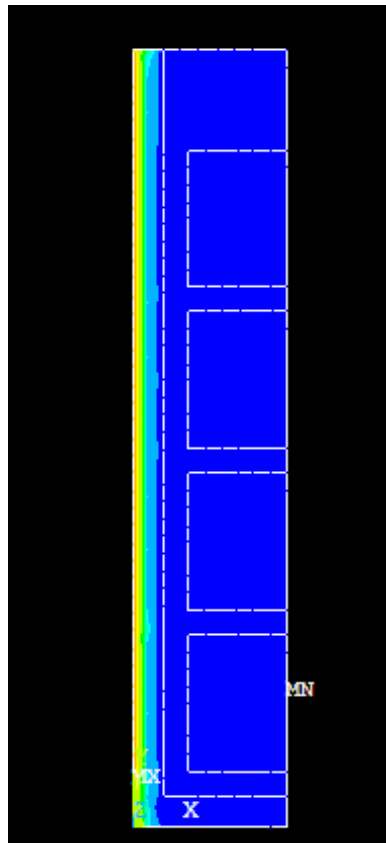
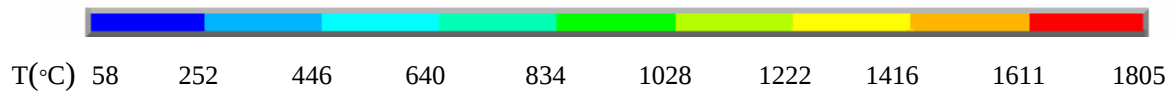


Figura 4.3 Distribución de temperaturas a las 5h 45min de operación.

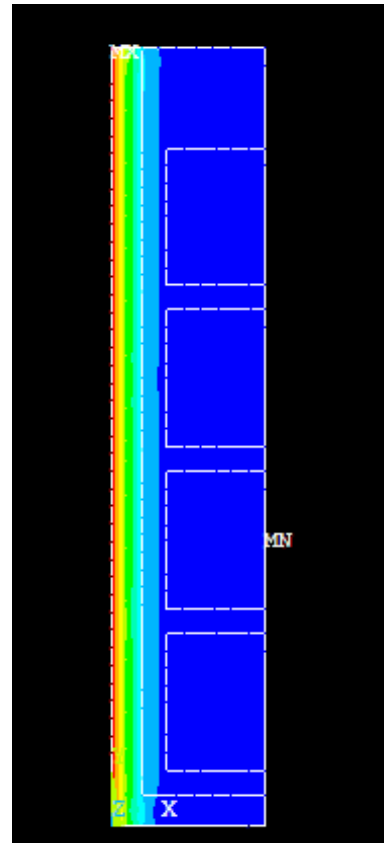


Figura 4.4 Distribución de temperaturas a las 21h 30min de operación.

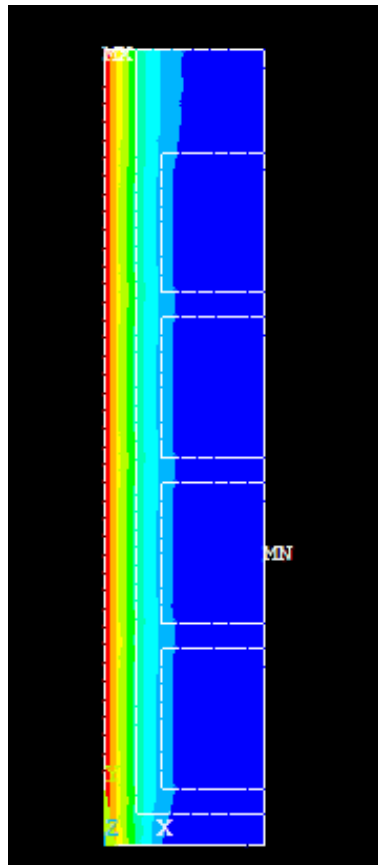
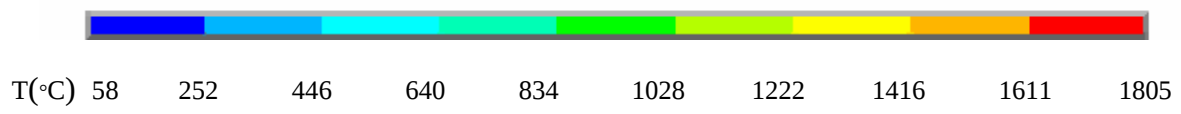


Figura 4.5 Distribución de temperaturas a las 41h 30min de operación.

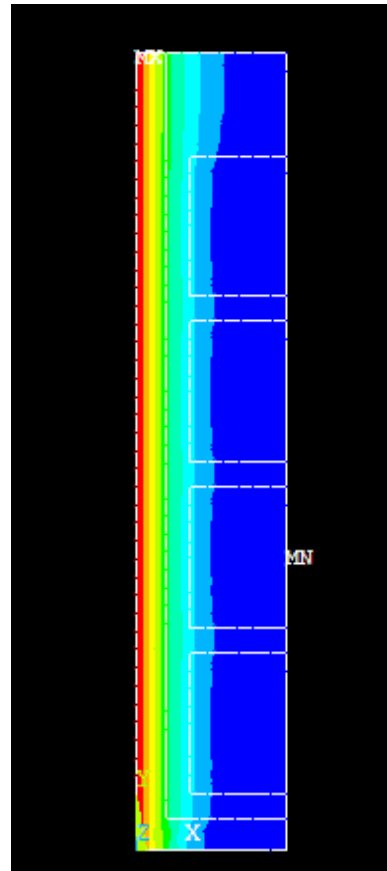


Figura 4.6 Distribución de temperaturas a las 56h de operación.

Cuando se observa la Figura 4.3, que representa el inicio de la etapa de precalentamiento en el proceso de cocción de ánodos, se puede ver que la temperatura más alta es de unos 1028°C en la pared de ladrillos a las seis horas de iniciado el proceso y la temperatura es inferior hacia el centro de la fosa como es de esperarse, en el ánodo y en el coque la temperatura es inferior a los 252°C . En la Figura 4.4 se puede observar que a las 21h 30min de operación la temperatura en la pared de ladrillo oscila entre 834 y 1805°C , mientras que en el extremo del ánodo mas próximo a la pared del horno la temperatura es de unos 58°C y en el coque de petróleo es de unos 446°C . Observando la Figura 4.5 se puede ver que a las 41h 30min la temperatura del ánodo en su extremo mas cercano a la pared de ladrillos es de 252°C y en la última foto de esta secuencia, es decir la foto 4.6 a las 56 horas del proceso de cocción, la parte del ánodo mas cercana a la pared de flujo presenta una temperatura de 640°C y el coque de petróleo una temperatura de 834°C .

Con respecto a los resultados obtenidos por el modelo bidimensional en la etapa de precalentamiento se puede decir, que la temperatura aumento durante toda esta etapa y que la rata de crecimiento fue de 13.85°C/h lo que se puede considerar bastante alto en comparación con el valor teórico de 7.5°C/h . Este incremento de temperatura tan brusco, puede producir defectos como grietas o rajaduras que dependiendo de sus dimensiones, afectan la calidad del ánodo al extremo de desecharlo.

4.2.2 Vista de Planta

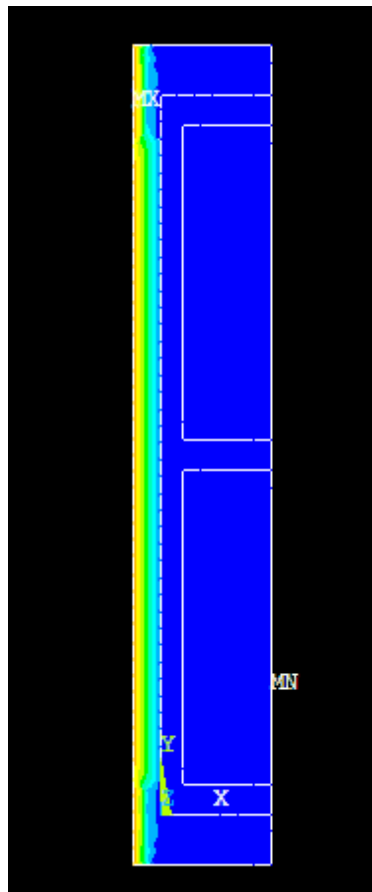
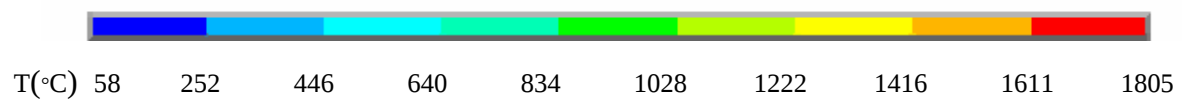


Figura 4.7 Distribución de temperaturas a las 5h 45min de operación.

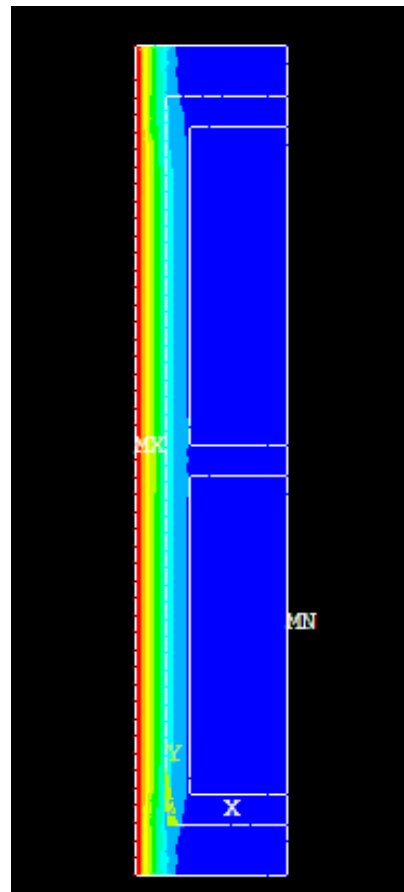


Figura 4.8 Distribución de temperaturas a las 21h 30min de operación.

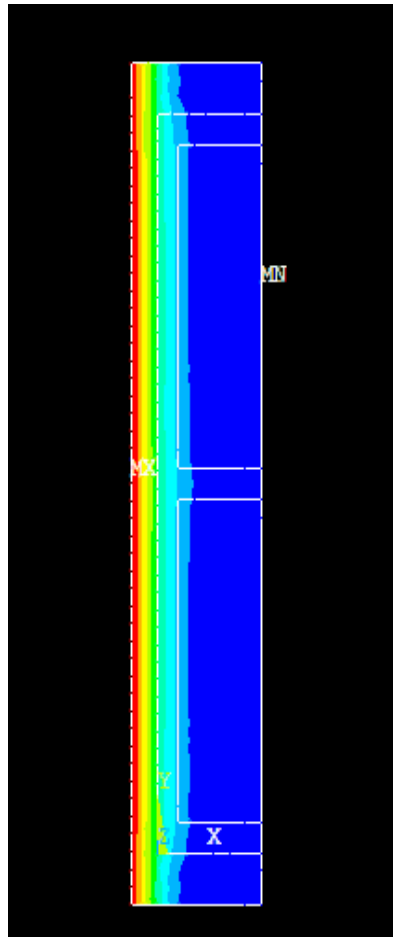
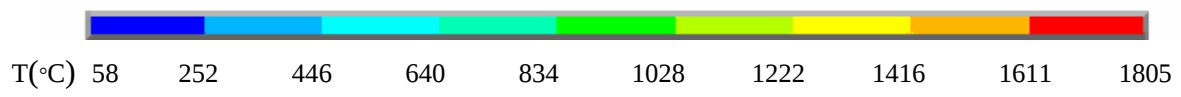


Figura 4.9 Distribución de temperaturas a las 41h 30min de operación.

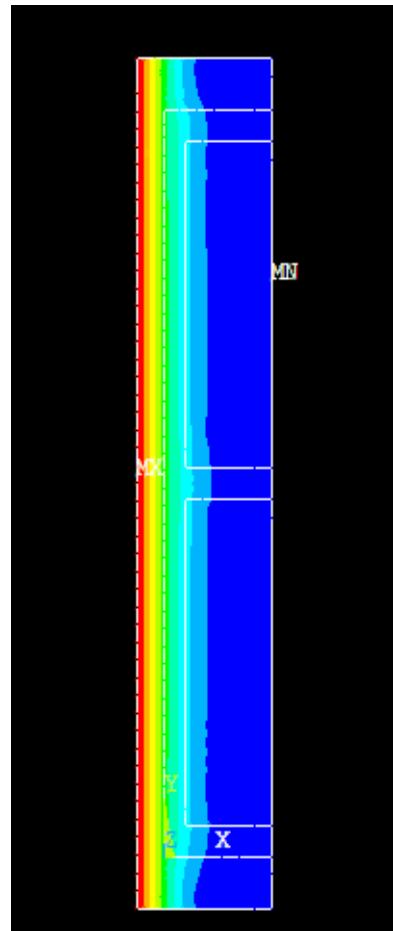


Figura 4.10 Distribución de temperaturas a las 56h de operación.

Observando la Figura 4.7, se puede ver que a las seis horas de haberse iniciado la etapa de precalentamiento, el ánodo aún permanece a una baja temperatura que esta alrededor de los 60°C, mientras que en la pared de ladrillos ya se alcanzan temperaturas que están alrededor de los 1220°C y en el coque de petróleo la temperatura es la misma que en el ánodo ya que el proceso apenas comienza. En la Figura 4.8 se observa que el coque ya posee una temperatura de unos 446°C, el ánodo permanece prácticamente a la misma temperatura que presentaba en la figura anterior aunque transcurrieron 21h 30min de la etapa de precalentamiento y la pared ya en su parte mas externa alcanza la temperatura de 1805°C. Al observar la Figura 4.9 se puede observar que el ánodo comienza a precalentarse y a las 41h 30min alcanza temperaturas de 446°C, mientras que el coque ya esta sobre los 640°C, y finalmente en la Figura 4.10 se puede ver que la temperatura continua avanzando hacia el interior del ánodo y este en su parte mas externa casi alcanza los 640°C.

La rata de calentamiento es de 13.85°C/h lo que se considera alto si se toma en cuenta que el valor teórico es de 7.5°C/h, este gradiente térmico tan alto puede dañar la estructura interna del ánodo y producir agrietamientos, esto también ocasiona que en esta etapa el ánodo presente temperaturas muy diferentes en sus dimensiones, esto se debe a lo rápido que ocurre el precalentamiento tal como se observa en los modelos bidimensionales y que será mas significativo en la etapa de cocción principal.

En la tabla 4.1 se muestran los valores obtenidos tanto en la parte experimental como en el modelo matemático, estos valores se presentan en diferentes intervalos de tiempo. Con la finalidad de facilitar su comparación estos valores han sido graficados y se presentan en la figura 4.11.

Tabla 4.1 Etapa de precalentamiento, profundidad 2.20m

Tiempo	Temperaturas (°C)	
	Modelo Bidimensional	Prueba Experimental
5 h 45 min	105	165
21 h 30 min	446	484
41 h 30 min	640	694
56 h	834	856

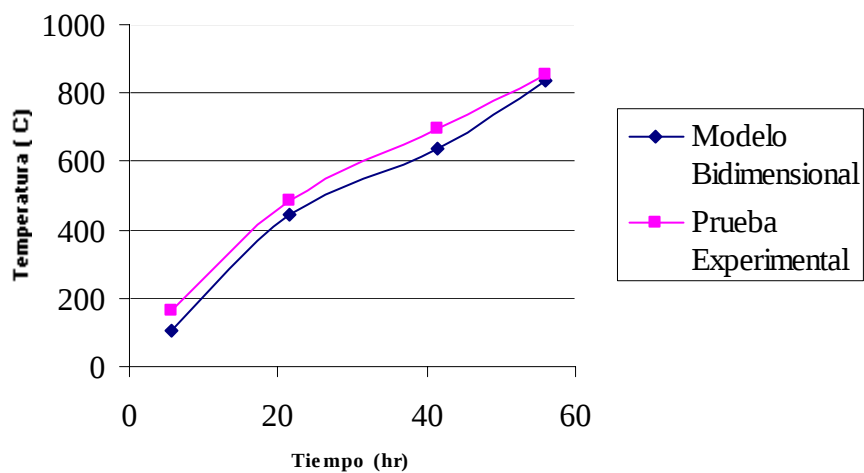


Figura 4.11 Validación del modelo bidimensional con las medidas experimentales para la etapa de precalentamiento

En la Figura 4.11 se hace una comparación de los valores obtenidos en el modelo matemático y los obtenidos de manera experimental durante la prueba realizada en el horno de cocción, se puede ver que la tendencia de ambas curvas es bien aproximada, lo que indica que existe una buena relación entre ambos resultados.

4.3 Resultados de los Modelos Bidimensionales Obtenidos con el Programa ANSYS, en la Etapa de Cocción Principal.

4.3.1 Vista Frontal

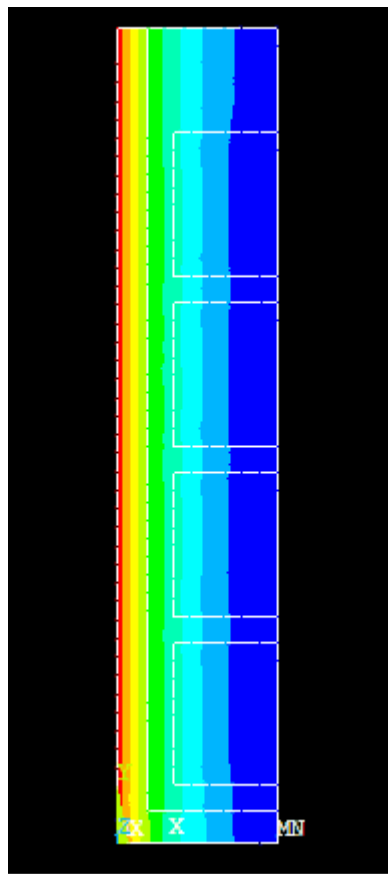
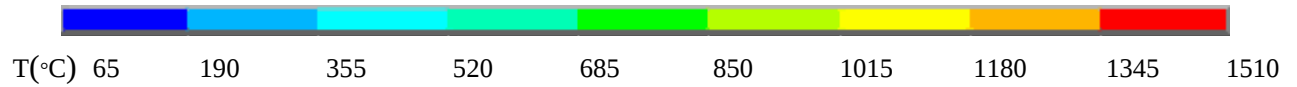


Figura 4.12 Distribución de temperaturas a las 30h de operación.

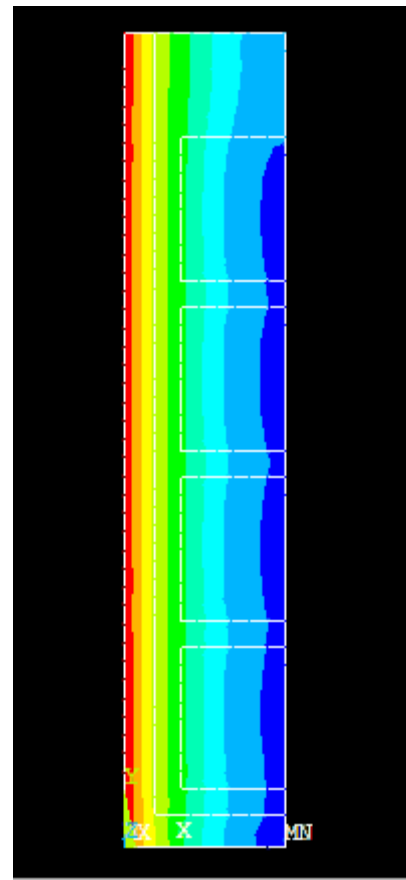


Figura 4.13 Distribución de temperaturas a las 73h de operación.

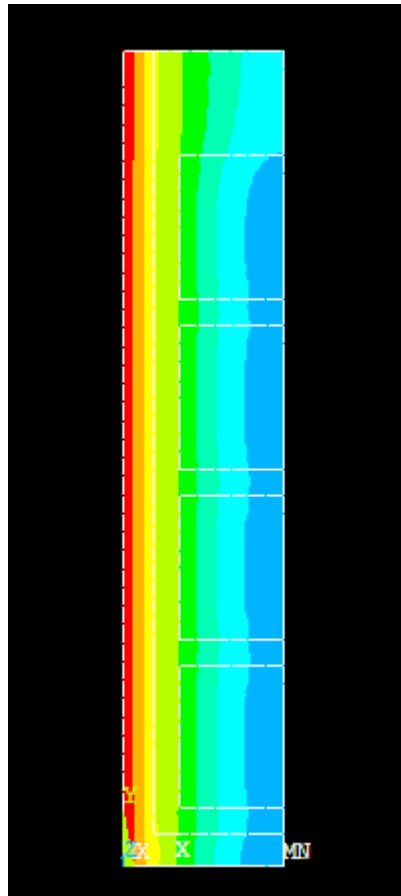
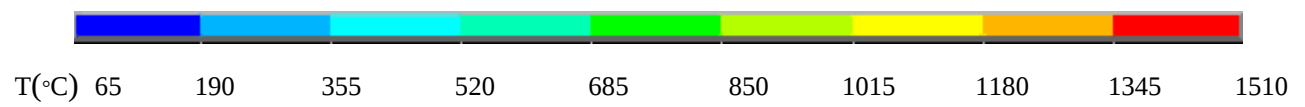


Figura 4.14 Distribución de temperaturas a las 120h 30min de operación.

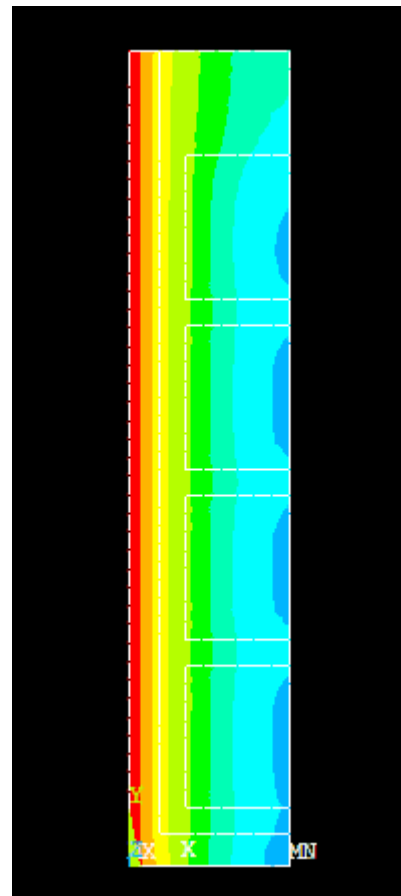


Figura 4.15 Distribución de temperaturas a las 168h de operación.

La Figura 4.12 presenta el proceso de cocción a las 30hr de haberse iniciado el mismo, como es de esperarse ya se pueden observar temperaturas mas elevadas que en la etapa anterior, en el ánodo hay temperaturas de hasta 520°C mientras que el coque presenta una temperatura de 850°C, esto quiere decir que la temperatura del coque no ha aumentado significativamente desde la etapa de precalentamiento y por el contrario tiende a estabilizarse. En la Figura 4.13 se puede observar que el ánodo continuo aumentando su temperatura, hasta alcanzar en la zona más cercana a la pared de ladrillos una temperatura de 685°C, por otro lado la temperatura del coque permaneció estable, es decir, a 850°C. En la Figura 4.14 se puede ver que a las 120h 30min de la etapa de cocción principal el ánodo ha alcanzado una temperatura de 850°C en su parte mas próxima a la pared de ladrillo y en su parte mas interna aún hay temperaturas de 355°C, esto revela que en el ánodo existen coeficientes de expansión muy diferentes, lo que provoca la aparición de defectos que dependiendo de su importancia conllevan a su posterior rechazo, mientras que en el coque la temperatura a aumentado a 1015°C. Por último en la Figura 4.15 se presenta el final de la etapa de cocción principal, aquí las temperaturas han permanecido estables en el coque y en la parte mas externa del ánodo, aunque hacia la zona interna del bloque anódico la temperatura ha seguido aumentando.

En esta etapa la temperatura presentó una marcada tendencia a estabilizarse, especialmente en el coque y en la parte más externa del ánodo, donde se alcanzó una temperatura máxima cercana a los 1000°C, mientras que hacia el interior del ánodo la temperatura continua aumentando. Es importante destacar que según lo observado en los modelos bidimensionales hasta el final de esta etapa la temperatura en el bloque de carbón todavía no era homogénea, esto puede deberse al alto gradiente térmico experimentado durante la etapa de precalentamiento, esto a su vez implica que se obtendrán unas propiedades muy variables a lo largo de la geometría ánodo, lo que sin duda afectara su desempeño en las celdas de reducción.

4.3.2 Vista de Planta

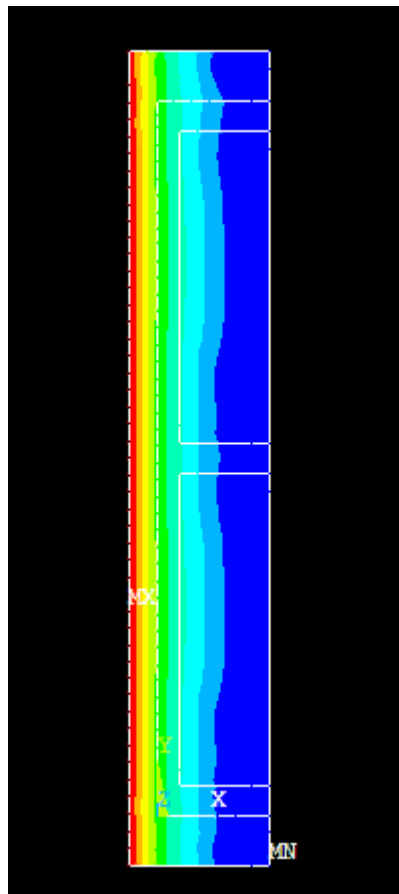
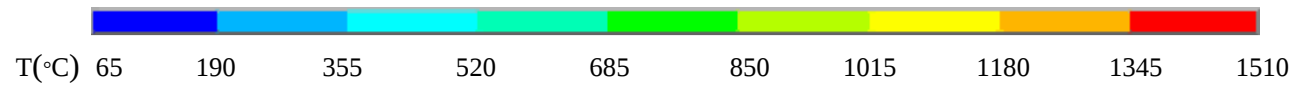


Figura 4.16 Distribución de temperaturas a las 30h de operación.

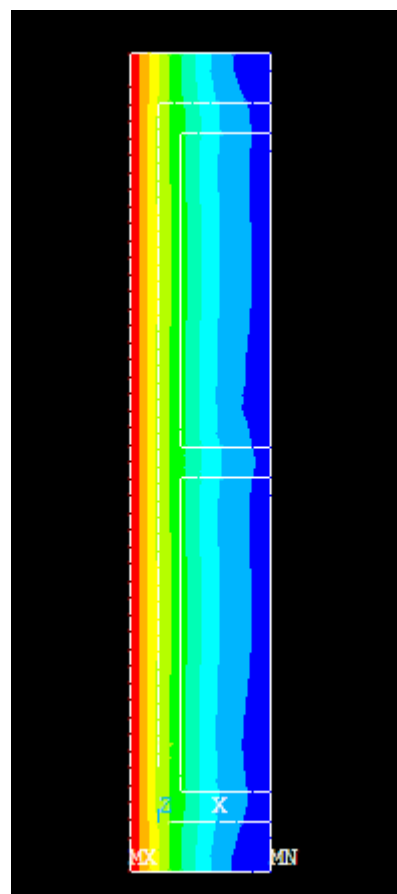


Figura 4.17 Distribución de temperaturas a las 73h de operación.

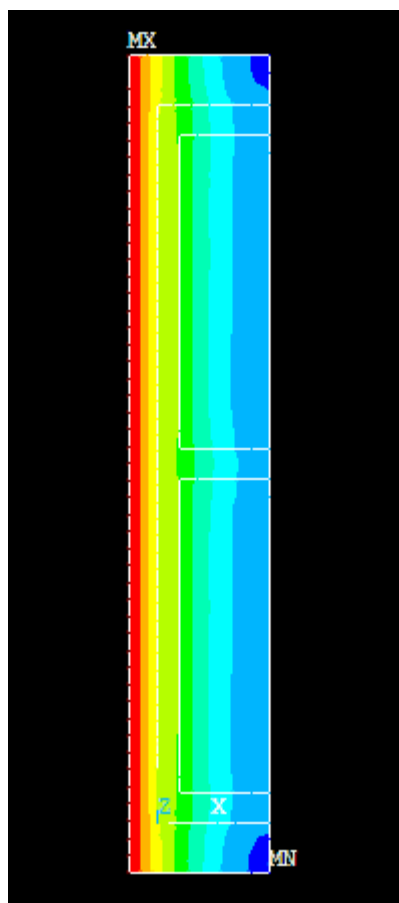
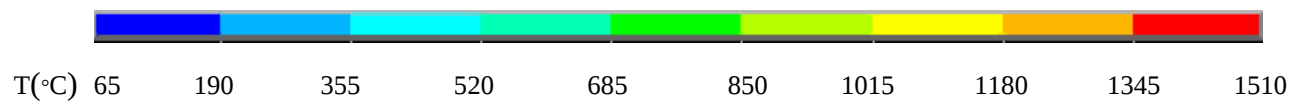


Figura 4.18 Distribución de temperaturas
a las 120h 30min de operación.

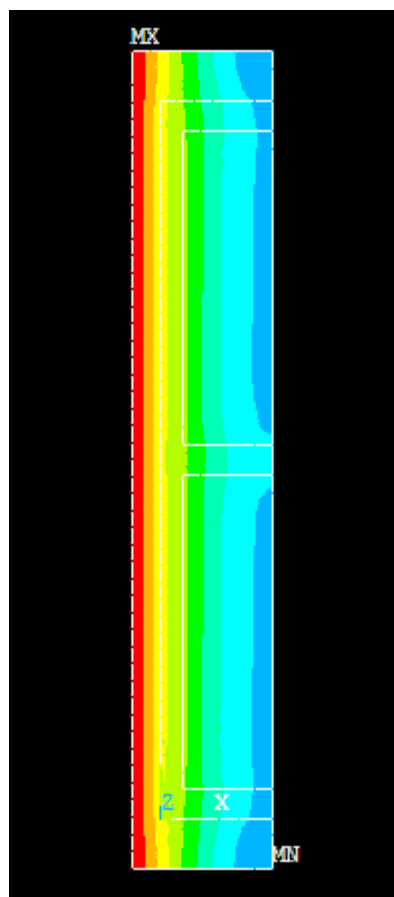


Figura 4.19 Distribución de temperaturas
a las 168h de operación.

En la Figura 4.16 se puede observar en una vista de planta el proceso de cocción de ánodos a las 30 horas de haberse iniciado, las temperaturas en el ánodo alcanzan los 520°C y el coque presenta temperaturas de 685°C. Observando la Figura 4.17 se puede ver que la temperatura mas alta es de 685°C y la mas baja de 190°C, lo que evidencia la diferencia de temperaturas en el bloque de carbón, mientras que en el coque la temperatura es de 850°C, lo que demuestra que la etapa de calentamiento continua avanzando. La Figura 4.18 presenta el proceso de cocción a las 120h 30min, aquí el ánodo ya alcanza una temperatura de 850°C y su temperatura mas baja en la zona mas interna es de 350°C, por otro lado el coque tiene una temperatura de unos 900°C, lo que indica que la tendencia de dicha temperatura es a estabilizarse. En la Figura 4.19 se muestra el final del proceso de cocción, donde se han alcanzado en el ánodo temperaturas de unos 850°C y en el coque de petróleo temperaturas de 1015°C.

En los resultados correspondientes a esta etapa, se pudo observar que el ánodo presenta temperaturas muy diferentes en su geometría, esto implica que el bloque de carbón posee zonas con mayor expansión que otras, lo que puede producir el defecto de agrietamiento en su estructura. La temperatura presento un comportamiento mas estable en esta etapa, sin embargo hacia el interior del ánodo continúa aumentando. Esta falta de homogeneidad en la temperatura del bloque anódico, implica propiedades diferentes a lo largo de su geometría.

La tabla 4.2 presenta los valores obtenidos tanto en la prueba experimental como en el modelo matemático, estos serán graficados para facilitar la comparación de ambos, las temperaturas están registradas en cuatro tiempos, 30, 73, 120 y 168 horas, este último valor representa el final del proceso de cocción.

Tabla 4.2 Etapa de cocción principal, profundidad 2.20m

Tiempo	Temperaturas (°C)	
	Modelo Bidimensional	Prueba Experimental
30 h	850	946
73 h	950	1047
120 h 30 min	1015	1011
168 h	1015	938

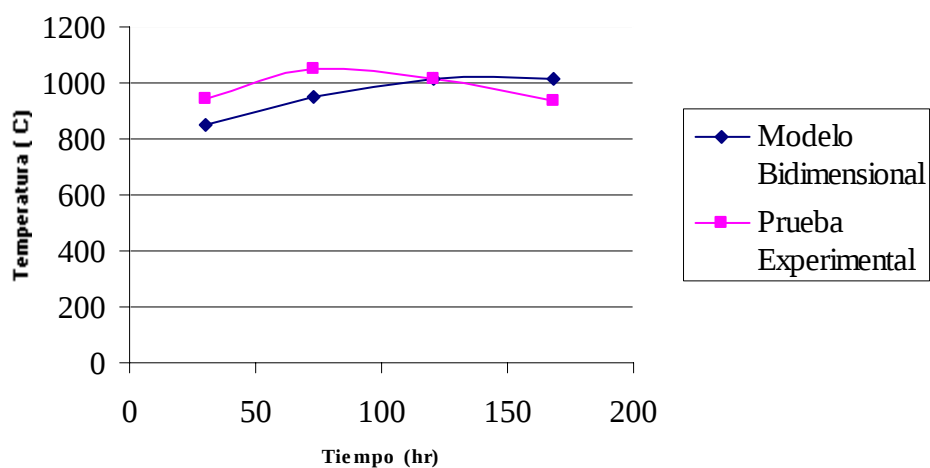


Figura 4.20 Validación del modelo bidimensional con las medidas experimentales para la etapa de cocción principal

En la Figura 4.20 se han graficado las curvas correspondientes a los valores obtenidos en el modelo bidimensional, así como los valores registrados durante el proceso de cocción de ánodos, esto permite hacer una buena comparación de ambos. Se observa que el comportamiento de ambas curvas es bien aproximado, lo que implica que existe una semejanza entre ambos resultados.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- El modelo matemático obtenido del comportamiento térmico del horno de cocción I de la Empresa C.V.G ALCASA realizado en el programa ANSYS, predijo de una manera bastante aproximada el comportamiento del horno durante el proceso de cocción de ánodos.
- El modelo matemático es confiable según la validación realizada con los datos obtenidos de manera automatizada en la fosa 3, de la sección 54 que fue objeto de estudio mediante la medición de temperaturas.
- La distribución de temperaturas obtenidas a través de la modelación del proceso de cocción en las fosas estudiadas no es la más apropiada para la cocción uniforme de los ánodos.
- El presente modelo térmico puede ser utilizado para el mejoramiento de las condiciones de trabajo del horno de cocción I, y así mejorar la calidad de los bloques anódicos para obtener un mejor desempeño en las celdas de reducción.
- La modelación térmica que se desarrolló en este trabajo, puede ser usada para hacer predicciones del comportamiento térmico del horno con una buena precisión y gran confiabilidad.
- Se determinó que el proceso de cocción de ánodos no es mas eficiente, debido a que este se encuentra en muy mal estado físico, presentando una serie de anormalidades

tales como paredes obstruidas, infiltraciones, tanquillas dañadas, costras de coque adheridas a las paredes, etc.

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES

- Elaborar un manual de operaciones de mantenimiento preventivo de las paredes de las fosas en horno de cocción I, para evitar el deterioro que vienen presentando dichas paredes.
- Llevar a cabo un control sobre las variables de succión y cantidad de gas combustible que entra al horno, para controlar de una manera mas completa y eficiente el proceso de cocción de ánodos.
- Determinar si la relación aire-gas que entra al sistema es la adecuada para que la combustión sea completa.
- Ingresar una segunda sección a la etapa de precalentamiento para disminuir el elevado gradiente térmico al que están expuestos los ánodos y que ocasiona defectos a los mismos.
- Verificar el cumplimiento de las prácticas operativas establecidas para el proceso de cocción de ánodos que se lleva a cabo en hornos de cocción I.
- Realizar un estudio más detallado acerca de los coeficientes de expansión que experimenta el ánodo, debido a las diferentes temperaturas que presenta en su geometría.
- Realizar una investigación mas detallada de los coeficientes de convección involucrados en el proceso de cocción, de tal manera de ajustar mejor los resultados del modelo.
- Refinar el modelo empleando propiedades termofísicas variables con la temperatura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Gonzalez, Javier, (2005). “Predicción del Perfil de Solidificación del Lecho de Criolita en una Celda de Reducción de Alúmina P-19 en C.V.G ALCASA”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, 115 p.
2. Tousaint P, Lorenzo R, (2004). “Caracterización de Curvas de Cocción de Ánodos con dos Secciones en Precalentamiento Hornos de Cocción I C.V.G ALCASA”. Entrenamiento Industrial. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, 97 p.
3. Betancourt, Ramón. (1996). “Tecnología del Carbón en la Industria del Aluminio”, Gerencia de carbón, Venalum. 118 p.
4. Belitskus D. (1994). “Evaluación Calcined Coke for Aluminium Smelting by Bulk Density”, Light Metals, 245-251.
5. Fischer W., Perruchoud R. (1995). “Influence of Coke Calcining Parameters on Petroleum Coke Quality”, Light Metals, 812-826.
6. Rodríguez, Adelaida, (2002). “Horno de Cocción I de C.V.G ALCASA, Estudio del Proceso de Cocción de Ánodos”. Práctica Profesional. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, 85 p.
7. Holman, J. (1998). “Transferencia de Calor”, Octava edición, México. McGraw-Hill, 484 p.
8. Hurtado P., Anna J. (2003). “Modelación Matemática del Proceso de Enfriamiento de Ánodos Verdes en la Planta de Carbón de C.V.G ALCASA”, Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, 112 p.

9. Cook, R. (1995). "Finite Element Modeling for Stress Analysis", New York. Editorial John Wiley Inc, 454 p.
10. Rao, S. (1989). "The Finite Element Method in Engineering", New York. Pergamon Press, 400 p.
11. Lorenzo, Celiana, (2000). "Documentación Básica para la Propuesta: Modelación Matemática del Proceso de Cocción a gas con Banqueo Previo de las Celdas P-20 y P-20S". Entrenamiento Industrial. Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", 95 p.
12. Incropera F. P, Dewitt, D. P. (1999). "Fundamentos de Transferencia de Calor" Cuarta edición, México. Prentice Hall, 912 p.

APÉNDICE A. Propiedades Térmicas de los Materiales Considerados en Función de la Temperatura

Tabla A.1 Propiedades térmicas para el ánodo.^[12]

PROPIEDADES	
Densidad (Kg/m ³)	1300
Calor Especifico (J/Kg K)	4.56
Conductividad Térmica (W/m K)	2.10

Tabla A.2 Propiedades térmicas para el ladrillo refractario^[12]

PROPIEDADES	
Densidad (Kg/m ³)	2000
Calor Especifico (J/Kg K)	3.50
Conductividad Térmica (W/m K)	1.5

Tabla A.2 Propiedades térmicas para el coque de petróleo^[12]

PROPIEDADES	
Densidad (Kg/m ³)	2060

Calor Especifico (J/Kg K)	1.86
Conductividad Térmica (W/m K)	1.60

APÉNDICE B. Disposición de las Termocuplas en la Fosa

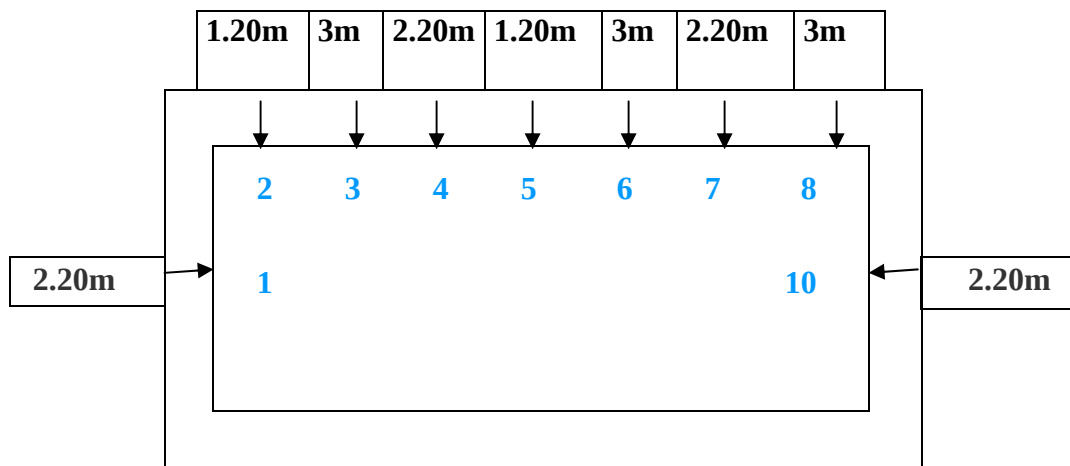


Figura B.1 Disposición de las 10 termocuplas en la fosa y sus respectivas profundidades.

APÉNDICE C. Procedimiento para Modelar

Paso 1. Establecer tipo de análisis.

1. **Main Menu> Preferences**
2. (check) “Individual discipline(s) to show in the GUI” = Thermal
3. [OK]

Paso 2. Construir la geometría.

4. **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas> Rectangle> By Dimensions**
5. Introduzca las coordenadas de las esquinas del rectángulo que conforma el área:
6. Apply para crear el primer rectángulo.

Repetir los pasos 4-6 hasta completar los rectángulos que conforman el área de la celda.

Paso 3. Definir las propiedades de los materiales.

7. **Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models**
8. **Material> New Model**
9. (double-click) “Thermal”, después “Conductivity”, después “Isotropic”
10. Introducir las propiedades del material, “KXX, C, ENTH, DENS”.
11. OK.

Repetir los pasos 8-11 hasta completar todos los materiales.

Paso 4. Definir el tipo de elemento a utilizar.

12. **Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete**
13. [Add ...]
14. “Thermal Solid” (left column)
15. “Quad 4node 55” (right column)
16. [OK]
17. [Close]

Paso 5. Generar el mayado.

18. **Utility Menu> Plot> Areas**
19. **Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool**
20. (check) “Smart Size”
21. (slide) “Fine Course” = 4
22. [Mesh]
23. Seleccione el área a mallar
24. [OK]
25. (desplazar hacia abajo en MeshTool) “Element Attributes” = Global, entonces [Set]
26. (desplazar hacia abajo) “Material number” = 2
27. [OK]
28. [Close] en MeshTool

Repetir los pasos 23-27 hasta mallar cada área con su respectivo material.

Paso 6. Aplicar las cargas convectivas.

29. **Utility Menu> Plot> Lines**
30. **Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Thermal> Convection> On Lines**
31. Seleccionar las líneas que están expuestas a las cargas convectivas.
32. [OK]
33. “Film coefficient” = coeficiente de convección de la superficie
34. “Bulk temperature” = Temperatura de los alrededores
35. [OK]

Repetir los pasos 31-35 hasta aplicar todas las cargas convectivas.

Paso 7. Definir el tipo de análisis.

36. **Main Menu> Solution> Analysis Type> New Analysis**
37. (check) “Type of analysis” = Transient
38. [OK]
39. (check) “Solution method” = Full
40. [OK]

Paso 8. Especificar condiciones iniciales.

41. **Utility Menu> Plot> Areas**
42. **Utility Menu> Select> Entities**
43. (Primero desplazar abajo) “Areas”
44. [OK]
45. Seleccionar area a especificar condiciones iniciales
46. [OK]
47. **Utility Menu> Select> Everything Below> Selected Areas**

- 48. **Utility Menu> Plot> Nodes**
- 49. **Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Initial Condit'n> Define**
- 50. [Seleccionar All] para usar nodos seleccionados.
- 51. (Desplazar abajo) "DOF to be specified" = TEMP
- 52. "Initial value of DOF" = Temperatura de trabajo del material
- 53. [OK]
- 54. **Utility Menu> Select> Everything**

Repetir pasos 45-53 hasta establecer todas las condiciones de trabajo para cada material.

Paso 9. Establecer el tiempo de operación del análisis

- 55. **Main Menu> Solution> Load Step Opts> Time/Frequenc> Time-Time Step**
- 56. "Time at end of load step" = 10

Nota: Esto representa 10 horas.

- 57. "Time step size" = 0.01
- 58. (check) "Stepped or ramped b. c." = Stepped
- 59. "Minimum time step size" = 0.001
- 60. "Maximum time step size" = 0.25
- 61. [OK]

Paso 10. Solución del análisis.

- 62. **Main Menu> Solution> Solve> Current LS**
- 63. [OK] para iniciar solución del análisis.

Paso 11. Lectura de los resultados.

- 64. **Main Menu> General Postproc> Read Results> First Set**
- 65. **Utility Menu> PlotCtrls> Numbering**
- 66. (check) "Node numbers" = Off
- 67. (drop down) "Elem / Attrib numbering" = No numbering
- 68. (drop down) "Replot upon OK/Apply?" = Do not replot
- 69. [OK]

Paso 12. Animar resultados.

- 70. **Utility Menu> PlotCtrls> Animate> Over Time**
- 71. [OK]

