



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

**MODELO NUMÉRICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR
PARA FUNDIDO DE ALUMINIO MEDIANTE
ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

ENERGÍA

PRESENTA:

IME. OMAR ÁLVAREZ BRITO

TUTOR:

DR. ARMANDO ROJAS MORÍN

2011





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado Asignado

Presidente: Dr. Wilfrido Rivera Gómez-Franco

Secretario: Dr. Armando Rojas Morín

Vocal: Dr. Arturo Barba Pingarrón

Primer suplente: Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes

Segundo suplente: Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado

Lugar donde se realizó la tesis:

Centro de Investigación en Energía de la UNAM, TEMIXCO, MORELOS.

Tutor de tesis:

Dr. Armando Rojas Morín

Firma

Dedicatorias

A Dios y a Santa María de Guadalupe:

Son para ustedes las primicias y lo mejor de mis más grandes e importantes esfuerzos.

A mi familia y mis Padrinos:

Maestros del amor, la entrega y la fidelidad. Es por ustedes que hoy tengo voluntad para la dedicación y el esfuerzo en todo proyecto que realizo.

A la familia Sánchez Herrera: Proveedores siempre de apoyo e impulsores de toda actividad que emprendo.

Agradecimientos

A mi director de tesis, Dr. Armando Rojas Morín:

Gracias por su voluntad y su trabajo, por recibirme como amigo y estudiante siempre de manera tan cordial. Gracias por brindarme sus valiosos conocimientos e insustituible apoyo. A usted debo la ejecución entera de este trabajo.

A mis sinodales

Dr. Wilfrido Rivera Gómez-Franco

Dr. Arturo Barba Pingarrón

Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes

Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado

Por su gran generosidad y valiosas contribuciones a este proyecto.

Agradecimientos, dirigidos en estricto orden alfabético

A mi amigo Dr. Arturo Barba Pingarrón

Gracias por ser mi gran amigo y brindarme su buen humor. Porque por su dedicación y conocimientos he sido formado en la ingeniería y en la maestría.

A mi amigo IEC Josué Bonfil Hernández

Gracias por ser mi gran amigo. Porque por tu esfuerzo desinteresado hoy este proyecto está terminado. Has sido fundamental en el desarrollo de este trabajo.

A mi amigo LAE José Luis Álvarez Gómez

Gracias por ser mi gran amigo y brindarme tu dedicación y empeño para llegar a ser un investigador más integral con responsabilidad social.

A mi amigo Lic. Marco Antonio Guerrero Ramírez

Gracias por ser mi gran amigo. Por tener siempre un consejo adecuado y oportuno ante las situaciones desfavorables.

A mi amigo Dr. Miguel Ángel Hernández Gallegos

Gracias por ser mi gran amigo; por ser el maestro diligente, templado y visionario. Porque por su dedicación y haberme brindado sus conocimientos he sido formado en la ingeniería y en la maestría.

A mis amigos y colegas EXATEC

Gracias por ser mis grandes amigos, por renovar mis ánimos e impulsarme siempre en toda situación inconveniente. Gracias por darme siempre confianza y su extraordinario humor, son esenciales en mi vida, en mis actividades académicas y el trabajo (alfabéticamente): IMA Aarón Pérez Becerril, LAE Adriana Santiago Cervantes, IMA Arturo Gómez Becerra, IME Berenice Negrete Jiménez, IMA David Espinosa Martínez, IIS Héctor Medina Vázquez, IME Manuel Enrique Fuentes López, IME Miguel Ángel Gómez Espinoza, IMA José Luis del Valle Castillo, IEC Juan Ramón Galván Pérez, IME Rogelio Omar Hernández, IME Rogelio Sánchez Moreno

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Por haberme proporcionado la importante beca que me permitió finalizar

este proyecto. Gracias a ustedes los actuales y futuros investigadores mexicanos pueden realizar su trabajo.

Agradecimientos especiales

A la Sra. Yolanda, por su invaluable y desinteresado apoyo en la presentación de este trabajo. A usted le debo la excelente presentación que tiene este proyecto.

Al Instituto para el Desarrollo Social Sostenible (IDeSS) del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey; por brindarme su confianza y recibirme de manera tan cordial en mis eventuales visitas para realizar este trabajo.

A todos ustedes, constructores del proyecto que ahora presento, mi profundo y permanente agradecimiento. Dios les bendiga enormemente.

Índice general

Lista de figuras	III
Lista de tablas	VIII
Nomenclatura	X
Resumen	XVII
Abstract	XX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes de la fundición de aluminio mediante concentración solar con concentradores solares tipo disco parabólico.	2
1.2. Planteamiento del problema.	8
1.3. Descripción del problema.	10
1.4. Objetivos generales y particulares.	11
1.5. Justificación y alcance.	12
2. FUNDICIÓN CONVENCIONAL DEL ALUMINIO Y ALEACIONES	15
2.1. Aplicaciones del Aluminio	15
2.2. Ganancias y ventajas.	16
2.3. Aplicaciones e investigaciones del reciclado de aluminio	16
2.4. Propiedades del Aluminio y sus aleaciones	21
2.5. Fundición convencional de aluminio y los diferentes hornos empleados en su fundición.	24
2.6. Desventajas de la obtención de Aluminio por métodos convencionales.	29
2.7. Proceso de fundición de latas de aluminio para reciclaje.	30

2.8. Componentes y usos típicos de las aleaciones de Al 3004 y 5182.	31
3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR	37
3.1. Descripción del concentrador solar de disco parabólico.	37
3.2. Análisis del trazado de rayos del concentrador solar.	39
3.3. Resultados de SolTRACE.	42
3.4. Descripción del problema	46
3.5. Balance de energía en el receptor solar.	48
3.6. Análisis por el método de diferencias finitas.	49
3.6.1. Determinación del coeficiente de convección h.	62
4. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES PARA EL CRISOL	76
4.1. Material del crisol: Acero al carbono 1018	77
4.2. Material del crisol: Acero inoxidable 316	80
4.3. Material del crisol: Inconel 625LCF.	85
4.4. Material del crisol: Arcilla refractaria.	88
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	94
5.1. Metodología para la selección de la ubicación del crisol sobre el eje focal	98
5.2. Resultados numéricos de temperaturas en el receptor solar: Acero al carbono 1018	100
5.3. Resultados numéricos de temperaturas en el receptor solar: Acero inoxidable 316	106
5.4. Resultados numéricos de temperaturas en el receptor solar: Inconel 625LCF	112
5.5. Resultados numéricos de temperaturas en el receptor solar: Arcilla refractaria.	118
5.6. Comparación entre los materiales seleccionados.	124
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	129
Apéndice A	132
Apéndice B	156
Apéndice C	161

Lista de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1. Concentrador solar tipo disco parabólico.

Capítulo 2

Figura 2.1. Procedencia del consumo de aluminio en el mundo.

Figura 2.2. Proceso convencional simple de reciclado de aluminio por fundición.

Figura 2.3. Proceso convencional de reciclado de aluminio para productos extrusión.

Figura 2.4. Método de conversión directa para reciclado de aluminio aplicada a productos de extrusión

Figura 2.5. Moldura de aluminio empleada en tapicería. Estas molduras son hechas mediante extrusión.

Figura 2.6. Cable de aluminio con núcleo de refuerzo. Producto empleado en las redes eléctricas de distribución.

Figura 2.7. Cancelería hecha de aluminio. Se prefiere al aluminio a otros materiales por la resistencia a la corrosión que lo caracteriza.

Figura 2.8. Proceso de producción y reciclado general de aluminio.

Figura 2.9. Esquema de un horno combustible directo.

Figura 2.10. Esquema de un horno de crisol

Figura 2.11. Esquema de un horno de inducción

Figura 2.12. Diagrama de fase Aluminio – Manganeso.

Figura 2.13. Diagrama de fase Aluminio – Magnesio.

Capítulo 3

Figura 3.1. Concentrador solar de 70 grados de apertura

Figura 3.2. Intersecciones de los rayos. Resultado de SolTrace

Figura 3.3. Magnitud de la concentración solar, a una posición de 0.769 m

Figura 3.4. Magnitud de la concentración solar, a una posición de 0.744 m

Figura 3.5. Magnitud de la concentración solar, a una posición de 0.714 m

Figura 3.6. Magnitud pico de los flujos radiativos en función de la distancia sobre el eje focal.

Figura 3.7. Diámetro del distribución del flujo radiativo en función de la distancia sobre el eje focal

Figura 3.8 Composición y flujos de calor en el receptor solar.

Figura 3.9. Dimensiones de la sección bidimensional del receptor solar

Figura 3.10. Sección bidimensional del receptor solar (reducida por simetría)

Figura 3.11. Modelo de diferencias finitas, el flujo de calor viene de los nodos contiguos.

Figura 3.12. Modelo de la resistencia de contacto en diferencias finitas.

Figura 3.13. Modelo de generación del nodo virtual de tamaño grande.

Figura 3.14. Modelo de generación de los nodos virtuales de tamaño pequeño.

Figura 3.15. Modelo de la transferencia de calor por convección para un nodo del dominio.

Figura 3.16. Inclinación del receptor solar de un ángulo φ con respecto a la horizontal.

Figura 3.17. Nodos bajo la influencia de la transferencia de calor dentro de una cavidad abierta cuadrada estudiada por Hinojosa et al.

Figura 3.18. Números de Nusselt globales para una inclinación de $\varphi = 0^\circ$ con respecto la horizontal.

Figura 3.19. Números de Nusselt globales para una inclinación de $\varphi = 30^\circ$ con respecto la horizontal.

Figura 3.20. Números de Nusselt globales para una inclinación de $\varphi = 45^\circ$ con respecto la horizontal.

Figura 3.21. Distribución de las zonas de convección.

Capítulo 4

Figura 4.1. Diagrama de fase hierro-carbono.

Figura 4.2. Curvas de datos correspondientes a la conductividad térmica para la aleación 625LCF de INCONEL.

Figura 4.3. Curvas de datos correspondientes a la capacidad calorífica para la aleación 625LCF de INCONEL.

Capítulo 5

Figura 5.1. Selección de los nodos en la malla

Figura 5.2. Distancia de la cavidad interna del receptor a partir del foco, sobre el eje focal.

Figura 5.3. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de acero 1018. Inclinación de 0° .

Figura 5.4. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de acero 1018. Inclinación de 30° .

Figura 5.5. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de acero 1018. Inclinación de 45° .

Figura 5.6. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero al carbón 1018, para una inclinación del receptor de 0° respecto a la horizontal.

Figura 5.7. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero al carbón 1018, para una inclinación del receptor de 30° respecto a la horizontal.

Figura 5.8. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero al carbón 1018, para una inclinación del receptor de 45° respecto a la horizontal.

Figura 5.9. Curvas de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de acero inoxidable 316. Inclinación de 0° .

Figura 5.10. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de acero inoxidable 316. Inclinación de 30° .

Figura 5.11. Curva de evolución de temperaturas de los nodos en el crisol de acero inoxidable 316. Inclinación de 45° .

Figura 5.12. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero inoxidable 316, para una inclinación de 0° con respecto a la horizontal.

Figura 5.13. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero inoxidable 316, para una inclinación de 30° con respecto a la horizontal.

Figura 5.14. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero inoxidable 316, para una inclinación de 45° con respecto a la horizontal.

Figura 5.15. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de INCONEL 625LCF. Inclinación de 0° .

Figura 5.16. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de INCONEL 625LCF. Inclinación de 30° .

Figura 5.17. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de INCONEL 625LCF. Inclinación de 45° .

Figura 5.18. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el receptor solar con crisol de aleación INCONEL 625LCF, en segundos; para una inclinación de 0° con respecto a la horizontal.

Figura 5.19. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el receptor solar con crisol de aleación INCONEL 625LCF, en segundos; para una inclinación de 30° con respecto a la horizontal.

Figura 5.20. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el receptor solar con crisol de aleación INCONEL 625LCF, en segundos; para una inclinación de 45° con respecto a la horizontal.

Figura 5.21. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de material refractario. Inclinación de 0° .

Figura 5.22. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de material refractario. Inclinación de 30° .

Figura 5.23. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de material refractario. Inclinación de 45° .

Figura 5.24. Campo de temperaturas resultante para el receptor solar hecho con material refractario en su totalidad, en segundos; para una inclinación del receptor de 0° con respecto a la horizontal.

Figura 5.25. Campo de temperaturas resultante para el receptor solar hecho con material refractario en su totalidad, en segundos; para una inclinación del receptor de 30° con respecto a la horizontal .

Figura 5.26. Campo de temperaturas resultante para el receptor solar hecho con material refractario en su totalidad, en segundos; para una inclinación del receptor de 45° con respecto a la horizontal.

Apéndice C

Figura C.1. Localización de los nodos centrales y nodo 1 en el crisol.

Figura C.2. Localización de los nodos 2 al 44 y nodo 45 en el crisol.

Figura C.3. Localización de los nodos 46 y 91 en el crisol.

Figura C.4. Localización de los nodos 92 al 111 y 112, 113, 114 en el crisol.

Figura C.5. Localización de los nodos 136 y 137 en el crisol.

Figura C.6. Localización de los nodos 138 y 142 al 208 en el crisol.

Figura C.7. Localización de los nodos 143 al 245 y 118 al 132 en el crisol.

Figura C.8. Localización de los nodos 141 al 249 y 139 al 247 en el crisol.

Figura C.9. Localización de los nodos 144 al 246 y 256 al 268 en el crisol.

Figura C.10. Localización de los nodos 271 y 272 en el crisol.

Figura C.11. Localización de los nodos 273 y 90 al 270 en el crisol.

Figura C.12. Localización de los nodos 250 y 251 en el crisol.

Figura C.13. Localización de los nodos 252 y 253 en el crisol.

Figura C.14. Localización de los nodos 254 y 255 en el crisol.

Figura C.15. Localización de los nodos 274 y centrales en la sección de aislante.

Figura C.16. Localización de los nodos 3 11 al 317 y 291,300,309 en la sección de aislante.

Figura C.17. Localización de los nodos 282 y 275 al 281 en la sección de aislante.

Figura C.18. Localización de los nodos 310 y 283, 292, 301 en la sección de aislante.

Figura C.19. Localización del nodo 318 en la sección de aislante.

Lista de tablas

Capítulo 2

Tabla 2.1. Elementos componentes de la aleación 3004. El elemento sobresaliente es el Manganeseo.

Tabla 2.2. Elementos componentes de la aleación 5182. El elemento sobresaliente es el Magnesio.

Capítulo 3

Tabla 3.1. Características del concentrador solar.

Tabla 3.2. Valores de la intensidad solar.

Tabla 3.3. Parámetros utilizados en la definición de la geometría óptica.

Tabla 3.4. Parámetros geométricos y de tiempo para el receptor solar.

Capítulo 4

Tabla 4.1. Las propiedades termofísicas del acero 1018.

Tabla 4.2. Composición química del acero al carbón 1018.

Tabla 4.3. Composición del acero inoxidable 316 (% en peso).

Tabla 4.4. Propiedades termofísicas del acero inoxidable 316.

Tabla 4.5 Composición química de la aleación 625LCF de INCONEL (% en peso).

Tabla 4.6 Propiedades termofísicas de la aleación 625LCF de INCONEL.

Tabla 4.7 Propiedades termofísicas de la arcilla refractaria.

Capítulo 5

Tabla 5.1. Distancias sobre el punto focal y tiempos para las diferentes inclinaciones en los que se consigue calentamiento efectivo del aluminio para el receptor solar con crisol de los diferentes materiales considerados.

Tabla 5.2. Diferencia de temperatura entre el nodo 116 y 255 para los diferentes materiales a las inclinaciones consideradas.

Nomenclatura

A_c Área de la superficie donde incide la radiación, $[m^2]$

A_s Área de la superficie donde se lleva a cabo la convección, $[m^2]$

$[A(m, n)^{-1}]^{t+1}$ Matriz de coeficientes en el tiempo $t + 1$

α Difusividad térmica, $[m^2 s^{-1}]$

α_I Difusividad térmica del material del crisol, $[m^2 s^{-1}]$

α_{Al} Difusividad térmica del aluminio, $[m^2 s^{-1}]$

α_r Absortividad del material del receptor

α_R Difusividad térmica del material refractario (arcilla refractaria), $[m^2 s^{-1}]$

Bi Número de Biot

Bi_j Número de Biot de la zona j , donde $1 \lesssim j \lesssim 11$

C_p Calor específico a presión constante, $[J kg^{-1} K^{-1}]$

C_{pAl} Es la capacidad calorífica del aluminio $[J kg^{-1} K^{-1}]$

C_{pI} Es la capacidad calorífica del material del crisol, $[J kg^{-1} K^{-1}]$

Cp_R Es la capacidad calorífica del material refractario, $[J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}]$

Cp_r Es la capacidad calorífica global del receptor, $[J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}]$

$[C(m, n)]^t$ Matriz de los coeficientes de las condiciones iniciales

$\frac{dT}{dt}$ Variación de la temperatura del receptor con respecto al tiempo, $[K \text{ s}^{-1}]$

$\frac{\partial T}{\partial x} |_{m+1, n}$ Cambio de la temperatura con respecto a x para un nodo de la derecha en la discretización, $[K \text{ m}^{-1}]$

$\frac{\partial T}{\partial x} |_{m-1, n}$ Cambio de la temperatura con respecto a x para un nodo de la izquierda en la discretización, $[K \text{ s}^{-1}]$

$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ Segunda derivada parcial de la temperatura con respecto a x , $[K \text{ s}^{-2}]$

$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} |_{m, n}$ Segunda derivada con respecto a x en el nodo m, n , $[K \text{ s}^{-2}]$

$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ Segunda derivada parcial de la temperatura con respecto a y , $[K \text{ s}^{-2}]$

$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} |_{m, n}$ Segunda derivada con respecto a Y en el nodo m, n , $[K \text{ s}^{-2}]$

$\frac{d\rho}{dT}$ Cambio de la densidad con respecto a la temperatura, $[kg \text{ m}^{-3} \text{ K}^{-1}]$

Δd Distancia discreta en X ó Y equivalente a cinco veces Δx $[m]$

Δt Intervalo discreto de tiempo, $[s]$

Δx Distancia discreta en X equivalente a 0.00167 m, $[m]$

Δy Distancia discreta en Y equivalente a 0.00167 m, $[m]$

\dot{E}_{alm} Energía que se almacena en el nodo, $[W]$

\dot{E}_{ent} Energía que entra al nodo, $[W]$

-
- \dot{E}_g Energía que se genera dentro del nodo, $[W]$
- Fo Forma en diferencias finitas del número de Fourier
- Fo_A Número de Fourier de los nodos de aluminio
- Fo_I Número de Fourier de los nodos del crisol
- Fo_R Número de Fourier de los nodos de refractario del aislante
- Gb Irradiación que incide sobre al área o bien la velocidad a la que la radiación incide sobre la superficie, $[W m^{-2}]$
- Gr Número de Grashof
- h Constante convectiva de proporcionalidad, $[W m^{-2} K^{-1}]$
- \bar{h} Constante convectiva de proporcionalidad promedio, $[W m^{-2} K^{-1}]$
- k Conductividad térmica del material, $[W m^{-1} K^{-1}]$
- k_A Conductividad térmica de material A, $[W m^{-1} K^{-1}]$
- k_{Al} Conductividad térmica del aluminio, $[W m^{-1} K^{-1}]$
- k_B Conductividad térmica de material B, $[W m^{-1} K^{-1}]$
- k_I Conductividad térmica del material del crisol, $[W m^{-1} K^{-1}]$
- k_R Conductividad térmica del material refractario empleado como aislante, $[W m^{-1} K^{-1}]$
- L Longitud característica de la superficie tomada en el sentido donde se considera la convección, $[m]$
- M_r Masa total del receptor, $[kg]$
-

\overline{Nu} Número de Nusselt promedio

\overline{Nu}_L Número de Nusselt promedio en una longitud característica

p Constante multiplicadora del tiempo discreto

P Perímetro de la superficie donde se lleva a cabo la convección, $[m]$

Pr Número de Prandtl

q Transferencia de calor por unidad de tiempo, $[W]$

q'' Flujo de calor, $[W m^{-2}]$

q''_0 Flujo de calor inicial, $[W m^{-2}]$

q''_{rad} Flujo de calor de radiación, $[W m^{-2}]$

q''_{conv} Flujo de calor de convección, $[W m^{-2}]$

q''_{cond} Flujo de calor de conducción, $[W m^{-2}]$

$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)}$ Transferencia de calor en el tiempo de un nodo a la izquierda al nodo de referencia, $[W]$

$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)}$ Transferencia de calor en el tiempo de un nodo a la derecha al nodo de referencia, $[W]$

$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)}$ Transferencia de calor en el tiempo de un nodo arriba del nodo de referencia, $[W]$

$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)}$ Transferencia de calor en el tiempo de un nodo abajo del nodo de referencia, $[W]$

Ra Número de Rayleigh

Ra_L Número de Rayleigh local, considerado en la superficie donde se lleva a cabo

la convección

RA Resistencia térmica total desde los nodos de aluminio hacia los nodos del crisol, $[K W^{-1}]$

RI Resistencia térmica total desde los nodos del crisol hacia los nodos de aluminio, $[K W^{-1}]$

RIR Resistencia térmica total desde el nodo del crisol hacia los nodos del refractario aislante, $[K W^{-1}]$

RR Resistencia térmica total desde el nodo del refractario aislante hacia los nodos del crisol, $[K W^{-1}]$

$R''_{t,C}$ Resistencia térmica de contacto $[m^2 K W^{-1}]$

R_{Tot} Resistencia térmica total entre el material del crisol y el aluminio, o viceversa $[K W^{-1}]$

ρ Densidad, $[kg m^{-3}]$

ρ_{Al} Densidad del aluminio, $[kg m^{-3}]$

ρ_I Densidad del material del crisol, $[kg m^{-3}]$

ρ_R Densidad del material refractario (arcilla refractaria), $[kg m^{-3}]$

ρ_r Densidad del material del receptor, $[kg m^{-3}]$

t Tiempo, $[s]$

T_j^p Temperatura del nodo j para el instante actual en el tiempo, donde $1 \lesssim j \lesssim 318$, $[K]$

T_j^{p+1} Temperatura del nodo 1 para el instante siguiente en el tiempo, donde $1 \lesssim j \lesssim 318$, $[K]$

T_a^{p+1} Temperatura del primer nodo de la discretización fina en contacto con el nodo de discretización gruesa para el instante siguiente en el tiempo, $[K]$

T_b^{p+1} Temperatura del segundo nodo de la discretización fina en contacto con el nodo de discretización gruesa para el instante siguiente en el tiempo, $[K]$

T_c^{p+1} Temperatura del tercer nodo de la discretización fina en contacto con el nodo de discretización gruesa para el instante siguiente en el tiempo, $[K]$

T_d^{p+1} Temperatura del cuarto nodo de la discretización fina en contacto con el nodo de discretización gruesa para el instante siguiente en el tiempo, $[K]$

T_e^{p+1} Temperatura del quinto nodo de la discretización fina en contacto con el nodo de discretización gruesa para el instante siguiente en el tiempo, $[K]$

$T_{m,n}$ Temperatura del nodo de referencia, $[K]$

$T_{m+1,n}$ Temperatura para un nodo a la derecha en la discretización, $[K]$

$T_{m-1,n}$ Temperatura para un nodo a la izquierda en la discretización, $[K]$

$T_{m,n}^p$ Temperatura del nodo de referencia para el instante actual en el tiempo, $[K]$

$T_{m,n}^{p+1}$ Temperatura del nodo de referencia para el instante siguiente en el tiempo, $[K]$

$T_{m+1(a \rightarrow e),n}^{p+1}$ Temperatura promedio de los cinco nodos de la malla fina que están a la derecha del nodo de la malla gruesa (material refractario aislante) para el instante siguiente en el tiempo, $[K]$

$T_{m+1,n}^{p+1}$ Temperatura del nodo a la derecha del nodo de referencia para el instante siguiente en el tiempo, $[K]$

$T_{m-1,n}^{p+1}$ Temperatura del nodo a la izquierda del nodo de referencia para el instante siguiente en el tiempo, $[K]$

$T_{m,n+1}^{p+1}$ Temperatura del nodo arriba del nodo de referencia para el instante si-

guiente en el tiempo, $[K]$

$T_{m,n-1}^{p+1}$ Temperatura del nodo abajo del nodo de referencia para el instante siguiente en el tiempo, $[K]$

T_s Temperatura de la superficie del receptor, $[K]$

T_∞ Temperatura del ambiente, $[K]$

$[T(m,n)]^{t+1}$ es la temperatura nodal en el tiempo $t + 1$

V Volúmen de control, $[m^3]$

Resumen

Debido a la necesidad de reciclar aluminio dada la importante ventaja económica que se obtiene al no obtenerlo a partir de la extracción del mineral de bauxita, en este trabajo se presenta la simulación de fundir aluminio para reciclado en un concentrador solar de tipo plato parabólico. Esto plantea una ventaja más: reducir las emisiones de contaminantes producidos por los combustibles empleados para fundir el aluminio.

En el este trabajo se presenta una simulación bidimensional del fenómeno de transferencia de calor en un receptor, para un concentrador solar, por los mecanismos de conducción, convección y radiación. Dentro de este receptor se dispone un crisol que contendrá al aluminio para fundir, mismo que puede estar fabricado de los siguientes materiales:

- Acero al carbono 1018
- Acero inoxidable 316
- Arcilla refractaria
- Un material de reciente desarrollo para aplicaciones térmicas: INCONEL 625LCF (M.R.)

Se han seleccionado estos materiales por sus propiedades físicas y estabilidad química principalmente; además de que son materiales que se pueden obtener fácilmente en el mercado. Para esta simulación se considera un concentrador solar de plato parabólico que será construido en el Laboratorio de Materiales y Superficies

del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados de la Universidad Nacional Autónoma de México. El concentrador posee las siguientes características:

- Diámetro de abertura: 2 m
- Área del concentrador: $3,14\text{ m}^2$
- Distancia focal: $0,714\text{ m}$
- Ángulo de apertura: 70°

El diseño del receptor solar que se usará en conjunto con el dispositivo de concentración solar parte de una simulación previa del trazado de rayos mediante el programa SolTRACE de NREL (M.R.) que se presenta en este mismo trabajo, y cuya finalidad es obtener las magnitudes de concentración solar a diferentes distancias sobre el eje focal del concentrador, así como el área que cubre este flujo de radiación solar. Con base en este flujo se determinó que un crisol con cavidad inferior que estará dispuesto dentro del receptor deberá tener un área circular cuyo diámetro es de $0,065\text{ m}$.

Las pruebas que se llevaron a cabo mediante la simulación sirvieron para determinar cuál es el mejor material para construir el crisol dentro del receptor solar, con base en criterio de tiempo y de gradientes térmicos, para lograr que la masa de aluminio alcance 97% de la temperatura de fusión de este material. Este criterio se estableció así de manera que el aluminio pueda fundirse en el menor tiempo posible, siendo esto benéfico para la economía de la producción; mientras que es imprescindible no poner en riesgo al crisol dentro del receptor, pues las altas temperaturas alcanzadas también pueden dañarlo.

La simulación también se lleva a cabo para las diferentes inclinaciones que puede adoptar el sistema de concentración solar de 30° y 45° , así como una inclinación de 0° para establecer un marco de referencia más amplio para la comparación de resultados. Estas diferentes inclinaciones deben ser consideradas debido a que la dinámica del aire dentro de la cavidad del receptor solar es afectada con la variación de la inclinación.

Se obtuvieron los resultados de la magnitud de concentración solar, el tiempo y la inclinación del receptor solar para lograr un calentamiento efectivo de la masa de

aluminio; así como los gradientes de temperatura del material, para cada uno de los materiales considerados en esta simulación. Con esta información se establecieron los parámetros de operación del sistema de concentración solar para cada material.

Ante estos resultados y los gradientes térmicos obtenidos y que se ilustran en los campos de temperatura de este trabajo se concluye que los materiales seleccionados se prefieren en el siguiente orden:

1. INCONEL 625LCF (M.R.)
2. Acero inoxidable 316
3. Acero al carbono 1018
4. Arcilla refractaria

Así mismo, se demostró para cada uno de los materiales del que se construye el crisol del receptor solar que a pesar de que existe una diferencia entre los tiempos para lograr la temperatura de fusión del aluminio para cada inclinación del receptor, esta diferencia no es significativa, pues para un mismo material a diferentes inclinaciones la variación es de tan solo algunos pocos segundos comparado con el tiempo total que cada material requiere.

Abstract

Due to the necessity to recycle aluminum because of the economic advantage that it is obtained when it is not obtained from the extraction of the bauxite ore, in this work is presented the simulation to fuse aluminum for recycling in a parabolic dish solar concentrator. This raises one more an advantage: to reduce the emissions of polluting agents produced by used fuels to fuse aluminum.

In this work a bidimensional simulation of the heat transfer phenomenon in a receiver of a solar concentrator by the mechanisms of conduction, convection and radiation is presented. Inside this receiver, there is a crucible with the one that aluminum is going to be smelted and that can be made of the following materials:

- 1018 carbon steel
- 316 stainless steel
- Refractory clay
- A material of recent development for thermal applications: INCONEL 625LCF (T.M.)

For this simulation a parabolic dish solar concentrator is considered, which will be constructed in the laboratory of materials and surfaces of the Universidad Nacional Autónoma de México. The concentrator has the following characteristics:

- Opening diameter of 2 *m*

- Concentration area 3,14 m^2
- Focal length 0,714 m
- Aperture angle of 70°

The design of the solar receiver that will altogether be used with the solar device of concentration begins with a previous simulation of the solar ray-trace by means of NREL the SolTRACE (T.M.) program that appears in this same work, and which purpose is to obtain the magnitudes of concentration to different distances on the focal axis of the concentrator, as well as the area that covers the solar radiation flux. On the basis of this concentrated flow, it was determined that a crucible with inferior cavity that will be arranged within the receiver must have a circular area whose diameter is 0,065 m .

The tests that were carried out by means of the simulation served to determine which is the best material to construct the crucible within the solar receiver, based on the criterion of time and thermal gradients, so that the mass of aluminum reaches 97% of the fusion temperature of this material. This criterion settled down thus so that the aluminum can be fused in the smaller possible time, being this good for the economy of the production; whereas it is essential not to put in risk the crucible within the receiver, because the high temperatures also reached can damage it.

The simulation also is carried out for the different inclinations that can adopt the system of solar concentration of 30° and 45°, as well as an inclination from 0° to establish a ampler frame of reference for the comparison of results. These different inclinations must be considered because the dynamics of the air within the cavity of the solar receiver is affected with the variation of the inclination.

The results of the magnitude of solar concentration, the time and the inclination of the solar receiver were obtained, so that with those it could be gotten an effective heating of the mass of aluminum; as well as the temperature gradient of the material for each one of the materials considered in this simulation. With this information it could be established the operation parameters of the solar system of concentration with each material.

With these results and the thermal gradients obtained that are illustrated in the fields of temperature of this work, it was possible to conclude that the selected

materials are preferred in the following order:

1. INCONEL 625LCF (T.M.)
2. 316 stainless steel
3. 1018 carbon steel
4. Refractory clay

Also it was demonstrated for each one of the materials that the crucible of the solar receiver is made of, that a difference between the times required to obtain the fusion temperature of aluminum for each inclination of the receiver was is not significant; because for a same material to different inclinations the variation is of only some few seconds compared with total time that each material requires.

CF (T.M.)

1. 316 stainless steel
2. 1018 carbon steel
3. Refractory clay

Also it was demonstrated for each one of the materials that the crucible of the solar receiver is

1

INTRODUCCIÓN

¿Por qué es importante fundir aluminio?

El proceso de fundición se lleva a cabo en cualquier metal, calentándolo hasta llegar al estado líquido, ejemplo de esto es el aluminio, que se funde en lingotes a partir de su obtención de la bauxita o de chatarra para reciclaje. Visto también desde la perspectiva económica, en la industria de la manufactura es conveniente pensar en reciclar algunos materiales en lugar de llevar a cabo todo el proceso para la obtención de material “nuevo”. Tal es el caso del aluminio.

Debido al considerable ahorro producido durante el reciclado mediante fundición de desperdicio de aluminio y a la sencillez del proceso, representa una actividad técnicamente resuelta y rentable.

Las aleaciones de aluminio necesarias para ciertos productos en particular se pueden obtener directamente del reciclaje del desecho de ese producto, lo cual recae en ahorro del recurso económico. El reciclado es un proceso rentable porque el aluminio es un metal valioso. El aluminio recuperado, una vez seleccionado y prensado, se funde sin importar el número de reciclados anteriores y con él se fabrican nuevos lingotes de aluminio que se utilizan en la aplicación conveniente.

El reciclado de aluminio debe plantear menores daños al ambiente: los procedimientos de fundido deben reducirse y llevarlos a cabo con el uso de energías renovables, además de que en ellos las pérdidas de metal y la generación de más residuos, debiera ser eliminada.

El reciclado de latas de refrescos, debido a la composición de sus elementos constituyentes, plantea un proceso ciertamente más difícil que el de una fundición simple.

Entiéndase por normal aquella en la que las materias primas se calientan hasta fundirse en el crisol de un horno de fundición.

Las latas de refrescos están fabricadas con dos aleaciones de aluminio:

- 3004 cuerpo principal
- 5182 tapas

mismas que contienen diferentes elementos aleantes: manganeso para la 3004 y magnesio para la 5182.

Mientras que la 3004 tiene una excelente formabilidad para que en ella se lleve a cabo el embutido profundo del cuerpo; la 5182 es más dura y por ello es posible la operación del dispositivo convencional de apertura de la lata [1.2].

1.1. Antecedentes de la fundición de aluminio mediante concentración solar con concentradores solares tipo disco parabólico.

La característica que distingue a los sistemas de concentración de disco parabólico es la superficie reflejante cóncava de forma circular cuya geometría es la que describe la revolución de una sección de parábola.

Estos sistemas, que realizan el seguimiento solar por medio de dos movimientos espaciales (movimiento acimutal) o por un solo movimiento (movimiento polar, solo elevación); obtienen la mayor relación de concentración en comparación con cualquier otro sistema de concentración solar, alcanzando valores de hasta 16000 soles, por lo que existen sistemas con registro de temperaturas mayores a 1500 °C en la zona focal [1.1].

Los diversos tipos de concentradores solares consisten en las siguientes partes fundamentales (véase figura 1.5): concentrador solar con superficie reflejante, receptor

solar, estructura de soporte y un mecanismo de seguimiento, cuyo funcionamiento dependerá del tipo de concentrador que manipule.

Funcionamiento del concentrador solar.

La radiación solar directa debe incidir en forma perpendicular sobre la superficie reflejante, misma que presenta una geometría definida que se tratará posteriormente. Los rayos solares incidentes a esta superficie son entonces reflejados con el propósito de ser concentrados en una zona denominada “focal” a ésta superficie. En dicha zona se coloca el receptor solar, el cual se calienta y por consiguiente transmite la energía térmica a algún material (sólido, líquido o gaseoso) contenido en el mismo.

La estructura de soporte tiene la finalidad de mantener la integridad estructural de la superficie reflejante evitando que se deforme. También albergará el mecanismo de seguimiento solar (reductores y dispositivos motrices) y al receptor solar.

El mecanismo de seguimiento solar tiene el objetivo de manipular al dispositivo para mantener la posición perpendicular de la superficie reflejante con respecto a la incidencia los rayos solares (radiación solar directa), permitiendo con ello el óptimo funcionamiento del sistema.

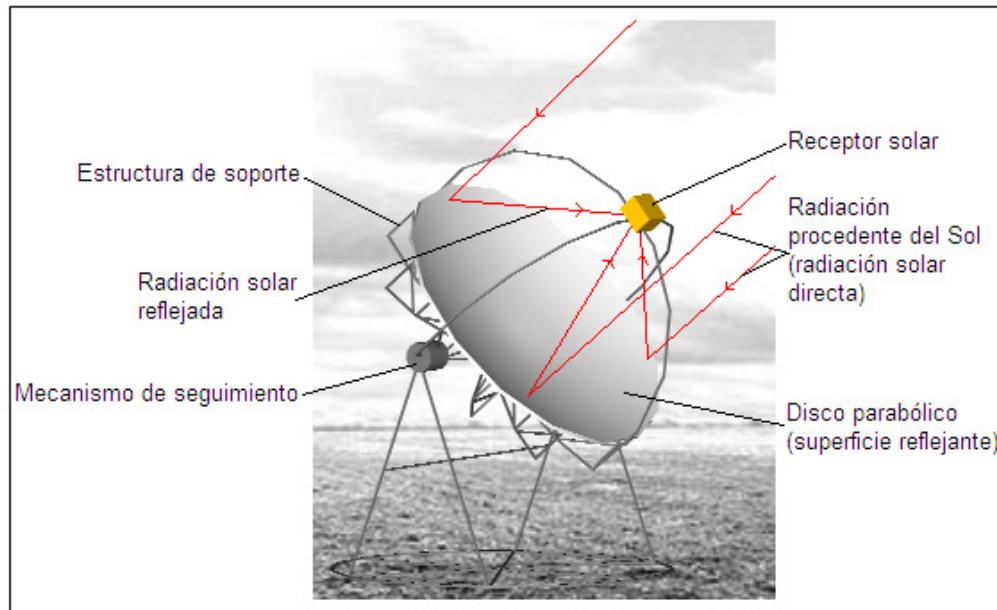


Figura 1.5. Concentrador solar tipo disco parabólico.

Ventajas y desventajas de los concentradores solares.

Algunas de las ventajas importantes que se pueden obtener con el uso de los concentradores solares residen en las características que se enuncian a continuación:

- Mayor eficiencia de conversión en el aprovechamiento de la energía solar en comparación con un colector solar.
- Aplicaciones de alta potencia que se logran mediante la obtención de altas temperaturas.
- Reducción en las pérdidas de calor al ambiente producto a las áreas reducidas que poseen los receptores solares.
- Se considera una fuente de energía limpia y por tanto libre de emisiones de gases de efecto invernadero.

Como es el caso de algunas fuentes renovables de energía, las desventajas que se presentan en los concentradores solares radican en:

- Alto costo inicial de la superficie reflejante y de los mecanismos de seguimiento.
- Sólo operan con la componente directa de la radiación solar, por lo que su funcionamiento se ve altamente afectado en los periodos de obstrucción de la luz solar (grandes nublados), se utilizan entonces en lugares de mínima nubosidad.
- En ciertos casos, se requieren grandes extensiones de terreno para su instalación.

Además, debido a los altos flujos radiativos que inciden en el receptor se presentan diferentes fenómenos que los diseños deben superar, ya que representan problemas para la operación de los sistemas:

- Cambios bruscos de temperatura en la puesta en marcha, operación y término de la operación.
- Alta presión de circulación del fluido de trabajo.
- Degradación de los materiales del receptor por corrosión.
- Grandes esfuerzos térmicos, produciendo por consiguiente en un tiempo corto la fatiga térmica del receptor.

Aplicaciones de los concentradores solares de tipo disco parabólico y su posible aplicación en la metalurgia.

Los sistemas de concentración solar de disco parabólico acoplados con motores Stirling se utilizan para la producción de energía eléctrica. Estos son los que presentan las mayores eficiencias de conversión de energía solar-térmica-eléctrica, en comparación con los sistemas de torre central y de canal parabólico pues sus eficiencias son mayores a 30 % [1.2]. Esto se debe a la mayor relación de concentración que se puede obtener con este tipo de sistemas, alcanzando altas temperaturas en la

zona focal. Dichos sistemas se utilizan principalmente en la producción de energía eléctrica en el rango de 10 kW hasta algunos MW (instalando para este fin un campo de concentradores).

Los sistemas de producción eléctrica que emplean concentradores solares de tipo disco parabólico son aplicados en regiones remotas cuyas necesidades corresponden a instalaciones de desalación de agua, bombeo de agua, o suministro de energía eléctrica en comunidades rurales.

Las temperaturas que los sistemas de concentración solar de tipo disco parabólico permiten obtener, abren las posibilidades a su aplicación en otros campos como el de la metalurgia y/o el reciclado de metales como el aluminio. Las temperaturas de fusión que las aleaciones de aluminio que se emplean para elaborar envases de bebidas van desde los 630 °C hasta 655 °C; mismas que se encuentran dentro del rango de operación en los sistemas de concentración solar del tipo disco parabólico.

Aplicación en plásticos.

Algunos concentradores modificados se emplean para aprovechar directamente la energía solar en fundición de termoplásticos. L.A. Stoynov y Prasad K.D.V. Yarlagadda [1.3] presentan la unión de probetas de termoplásticos utilizando energía solar y observaron que el aprovechamiento solar fue más favorable que los procesos convencionales en cuanto a la energía empleada y los resultados obtenidos.

La investigación del uso de la energía solar concentrada aplicada a los plásticos se enfoca a obtener mejores parámetros para los ensayos, a fin de obtener aun mejores resultados e incluso desarrollar una metodología de proceso que tome en cuenta las variables como tiempo de exposición, temperatura empleada, así como la magnitud de la concentración solar empleada.

Aplicación en metalurgia.

En algunas aplicaciones de metalurgia ha resultado más conveniente utilizar energía solar concentrada que rayos laser de alta intensidad, ya que si bien las intensidades logradas por algunos sistemas laser son mayores a la intensidad que se logra

con la concentración solar, la eficiencia de los sistemas solares llega a ser del 70% para ciertos metales en los que los rayos laser sólo obtienen 2%, debido a que estos metales absorben mejor las longitudes de onda de la luz solar [1.4].

En las líneas de investigación actuales en el campo de la metalurgia se llevan cabo en recubrimientos y aleaciones superficiales a sustratos como acero, acero inoxidable y aluminio [1.5, 1.6] para los que se ha demostrado la excelente adherencia, propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión de los recubrimientos obtenidos a partir de la sinterización con energía solar.

La búsqueda de una mayor gama de aplicaciones de la energía solar en la manufactura ha llevado a otras investigaciones a interesarse en disciplinas como la soldadura de metales que por sus características mecánicas con atractivos para diversas aplicaciones. Tal es el caso del aluminio 7075 usado en estructuras delgadas en la construcción; D.G. Karalis et al. [1.7], desarrollaron una metodología que demuestra la viabilidad del uso de la energía solar de ésta aleación.

También se ha empleado la concentración solar para activar reacciones de obtención de capas de recubrimiento de NiAl a partir de una mezcla de polvos, obteniendo un método alternativo no contaminante y libre de costos por insumo energético. Los ensayos llevados en esta disciplina conocida como pulvimetalurgia han permitido obtener resultados de estas capas de excelente calidad (i.e. sin porosidades, con buena adhesión al sustrato) [1.8]. Bajo el mismo interés de obtener recubrimientos metálicos, se ha obtenido éxito ensayando con polvos a base de Mo sobre sustratos de acero inoxidable. Con estos experimentos se ha obtenido la aleación superficial con el sustrato [1.9].

Así como en la aplicación de la energía solar para el procesamiento de plásticos, las investigaciones del uso de la energía solar dentro de la metalurgia deben tener en consideración obtener parámetros para las diferentes aplicaciones permitiendo con esto desarrollar metodologías que lleven a obtener los mejores resultados.

Aplicación en cerámicos.

Los hornos solares han servido para ensayar el potencial del horno solar como reactor para el sinterizado de polvos cerámicos. Estos ensayos demuestran que las

propiedades mecánicas de las muestras sinterizadas son comparables a aquellas manufacturadas mediante procesos tradicionales de sinterización industrial [1.5] .

Las temperaturas que es posible alcanzar mediante la concentración solar han permitido estudiar los recubrimientos cerámicos de las turbinas mediante ensayos de choque térmico. El interés en ensayar estos recubrimientos reside en que la operación de las turbinas a mayores temperaturas permite obtener mayores eficiencias.

1.2. Planteamiento del problema.

En nuestros días, muchas de las actividades productivas son causantes de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Como muestra de esto, tan sólo en México, la industria de la manufactura y de la construcción representa el tercer lugar en emisiones de GEI después de los sectores de transporte y generación eléctrica, cuyas principales fuentes de energía han sido el gas natural, el coque y el combustóleo. El problema de su producción es debido a que se cree que éstos son responsables del cambio climático actual.

Por otro lado, en sectores como el doméstico, resulta casi inimaginable la cantidad de energía que se utiliza para poner en marcha los aparatos tan comunes de la vida moderna: un televisor, una lámpara, o un termostato por mencionar algunos. Por otra parte, la energía hace posible la mayoría de nuestras actividades, desde la agricultura a la producción en la industria, el propio funcionamiento de los transportes o habilitar comunicaciones y casi cualquier otro servicio que se pueda pensar. Todas estas necesidades obtienen el suministro de energía de las plantas de carbón, gas natural y de combustibles fósiles.

Debido al crecimiento de las economías y el auge de todas las actividades, el consumo de estos combustibles se ha incrementado vertiginosamente en los últimos años [1.10] , y con ello la producción de los GEI.

El calentamiento global trae consigo diversos efectos nocivos. Se puede plantear por ejemplo la destrucción del hábitat de las especies y las modificaciones climáticas en las regiones, alterando con ello el equilibrio de los ecosistemas o las actividades agrícolas por citar algunos casos; afectando por consiguiente la salud humana [1.11] .

Pensando en éstos problemas se ha hecho énfasis en la investigación para el desarrollo de las tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables procurando particularmente aquellas que sean limpias y evitar con esto la producción de los gases de efecto invernadero, bajo la premisa de no generar GEI como productos secundarios durante sus procesos; es por eso que se les denomina inclusive “tecnologías limpias”.

Las fuentes de energía renovable son las que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Algunas de estas fuentes de energía renovable se consideran además fuentes de energía limpia; ya que no constituyen una fuente de contaminación al medio, ni de emisión de GEI; un ejemplo de ellas es la energía solar.

Hacia la década de años 1970, las energías renovables se consideraron una alternativa a las energías tradicionales de combustibles fósiles, tanto por su disponibilidad presente y futura garantizada (a diferencia de los combustibles fósiles que precisan miles de años para su formación) como por su menor impacto ambiental en el caso de las energías limpias. Sin embargo, para que las fuentes de energía renovable sustituyan a las actuales fuentes de energía convencionales, deberán proporcionar el mismo nivel de confiabilidad permitiendo disponer de energía en el momento que las diferentes necesidades los requieran.

En este sentido, al considerar a la energía solar como una fuente renovable y limpia de energía es de suma importancia considerar su aprovechamiento. Para ello, son los concentradores solares una de las opciones, los cuales pueden ser una opción viable para el suministro de energía en para las diversas necesidades, contribuyendo así con el desarrollo, a la vez que se contribuye a la disminución en la producción de contaminantes que propician el calentamiento global del planeta.

Es urgente usar menos energía por medio de combustibles fósiles y dirigir los esfuerzos hacia la búsqueda de las alternativas que brindan las fuentes renovables.

Por su parte, es indudable que el factor económico representa uno de los principales obstáculos para la implementación de las tecnologías limpias (como la proveniente del sol) en los procesos que continúan empleando las fuentes convencionales de ener-

gía, debido a que las inversiones para hacer sustituciones tecnológicas son muy altas. Junto a esta primera limitante, existen otras que son propias de estas fuentes renovables, y en las que la ingeniería debe considerar y lograr dominio para poder ofrecer las garantías que las fuentes convencionales como los combustibles fósiles proporcionan. No obstante, cuando se cuenta con la infraestructura para la aplicación de los recursos de energía renovable se obtiene la enorme ventaja económica del insumo gratuito de energía, que en el caso de la energía solar puede ser provisto incluso en regiones remotas [1.12] .

1.3. Descripción del problema.

Ante el ahorro de energía que implica el reciclar la chatarra de aluminio para obtener productos y materia prima para toda la diversidad de aplicaciones que tiene el aluminio, se recurre a la fundición y no a la extracción desde la bauxita.

Hacia la década de años 1970 las energías renovables se consideraron una alternativa a las energías tradicionales de combustibles fósiles, tanto por su disponibilidad presente y futura garantizada (a diferencia de los combustibles fósiles que precisan miles de años para su formación) como por su menor impacto ambiental en el caso de las energías limpias.

Finalmente, se conoce la forma más rápida, además de barata y con ello benéfica para la industria: usar menos energía por medio de combustibles fósiles y dirigir los esfuerzos hacia la búsqueda de las alternativas que brindan las fuentes renovables.

Visto también desde la perspectiva económica, en la industria de la manufactura es conveniente pensar en reciclar algunos materiales en lugar de llevar a cabo todo el proceso para la obtención de material “nuevo”. Tal es el caso del aluminio.

El aluminio recuperado, una vez seleccionado y prensado, se funde sin importar el número de reciclados anteriores y con él se fabrican nuevos lingotes de aluminio que se utilizan en la aplicación semejante por las propiedades que brinda la aleación. Esto se conoce como reutilización indefinida.

1.4. Objetivos generales y particulares.

Objetivo general:

Demostrar la posibilidad de calentar aluminio hasta su temperatura de fusión para mediante la utilización de un concentrador solar de disco parabólico. Lo anterior planteará una alternativa para el reciclado de aluminio con el aprovechamiento de energía de una fuente renovable (solar).

Los objetivos particulares plantean:

1. Simular el fenómeno de concentración solar mediante el trazado de rayos con el software SolTrace para evaluar la potencia alcanzada por un concentrador solar de tipo disco parabólico de 70° de abertura.
2. Diseñar un receptor solar en base a la potencia obtenida en la simulación de concentración solar.
3. Simular matemáticamente, de manera bidimensional, el fenómeno de transferencia de calor del receptor para diferentes materiales de fabricación del crisol.
4. Conocer los campos de temperatura desarrollados en el receptor para cada uno de los materiales de fabricación del crisol, a diferentes ángulos de inclinación del receptor solar.
5. Conocer los tiempos en que se logra el calentamiento del aluminio hasta su temperatura de fusión.
6. Determinar los parámetros de operación del concentrador solar para cada uno de los materiales a diferentes inclinaciones del receptor solar.
7. Determinar con ayuda de los tiempos y campos de temperatura obtenidos a las diferentes inclinaciones del receptor, cuál es el mejor material para fundir aluminio por medio del concentrador solar.

1.5. Justificación y alcance.

Como se ha tratado anteriormente, el proceso de obtención de aluminio es relativamente caro. Por las implicaciones económicas y ecológicas resulta mucho más conveniente el reciclado de materiales como el aluminio.

Una alternativa para el reciclado de aluminio es el aprovechamiento de una fuente de energía renovable y limpia como la solar. Se plantea el uso de un concentrador solar de disco parabólico para obtener en un crisol (receptor) aluminio fundido, para el posterior moldeo en lingote. La materia prima para éste proyecto es la chatarra de aluminio previamente compactada. Esta alternativa plantea además la posibilidad de implementar un proceso para la industria, dando ventajas cuando los factores económicos o el suministro de combustibles son un factor determinístico [1.13] .

Se han registrado valores de concentración en los concentradores solares de disco parabólico hasta de 16000 dependiendo del tamaño del concentrador y alcanzar temperaturas de foco de 1500 °C [1.14] . Estas características hacen factible la fundición de un metal como el aluminio y sus aleaciones, cuyas temperaturas de fusión van alrededor de los 660 °C, dependiendo del porcentaje en peso de aluminio.

Un lingote del tipo que se obtiene en esta experimentación podría ser aprovechado como materia prima en la producción denominada secundaria, o bien en moldeo de producción de piezas de forma neta, por citar algunos ejemplos.

Referencias

[1.1] Heller, P., Reinalter, W., and Martínez, D., Status of development of the dish/Stirling systems at Plataforma Solar de Almería, Proceedings. Of 10th International Stirling Engine Conference, Osnabruck, Germany, 2001.

[1.2] Schiel, W. Solarthermische Kraftwerke zur Wärme- und Stromerzeugung, VDI-Bericht 704, 1988.

[1.3] L.A. Stoykov, Prasad K.D.V. Yarlagadda., Joining of engineering thermoplastics by concentrated beam insolation—a feasibility study, Journal of Materials

Processing Technology 138 (2003) pp. 67–74.

[1.4] A. Ferriere, C. Sanchez Bautista, G.P. Rodriguez, A.J. Vazquez., Corrosion resistance of stainless steel coatings elaborated by solar cladding process, Solar Energy, 2005.

[1.5] I. Cañadas, D. Martínez, J. Rodríguez; Tratamiento térmico de materiales en el Horno Solar de la PSA: líneas actuales de actividad., CIEMAT-Plataforma Solar de Almería.

[1.6] D. I. Pantelis, A. Griniari, Ch. Sharafoglou, S. Chionopoulos., Further study on surface treatments of different combinations of advanced materials using concentrated solar energy; National Technical University of Athens, Department of Naval Architecture and Marine Engineering.

[1.7] D.G. Karalis, D.I. Pantelis, V.J. Papazoglou., On the investigation of 7075 aluminum alloy welding using concentrated solar energy., Solar Energy Materials & Solar Cells 86 (2005) pp. 145–163.

[1.8] C. Sánchez Bautista, A. Ferriere, G.P. Rodríguez, M. López-Almodovar, A. Barba, C. Sierra, A.J. Vázquez., NiAl intermetallic coatings elaborated by a solar assisted SHS process., Intermetallics 14 (2006) pp. 1270 - 275.

[1.9] D.I. Pantelis, A. Griniari, Ch. Sarafoglou., Surface alloying of pre-deposited molybdenum-based powder on 304L stainless steel using concentrated solar energy., Solar Energy Materials & Solar Cells 89 (2005) pp. 1–11.

[1.10] Houghton et al, Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el 2° informe de evaluación del IPCC. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Documento Técnico del IPCC, febrero 1997.

[1.11] Garduño, René, ¿Qué es el efecto invernadero?, INE 2004, Cambio Climático: Una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, México.

[1.12] Yum. Lytvynenko and D.V. Sshur., Utilization the concentrated solar energy for process of deformation of sheet metal; Renewable Energy 16 (1999) pp. 753-756.

[1.13] Judith Franco, Carlos Cadena, Luis Saravia; 2004. Multiple use communal solar cookers. *Solar Energy* 77, pp. 217–223.

[1.14] Soteris A. Kalogirou; 2004. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science* 30, pp. 231–295.

2

FUNDICIÓN CONVENCIONAL DEL ALUMINIO Y ALEACIONES

El aluminio es el segundo elemento metálico con mayor abundancia en la Tierra, se convirtió en un competidor económico en la ingeniería al final del siglo XIX. La aparición de tres progresos industriales importantes que exigieron materiales de características constantes con las calidades únicas del aluminio y de sus aleaciones, fueron beneficiados enormemente por el crecimiento en la producción y el uso del nuevo metal.

Al producir aluminio a partir de la fundición de chatarra existe un ahorro considerable de la energía si se compara con la producción a partir del mineral (cuya obtención consiste en colección del mineral Bauxita, trituración y lavado del mineral, proceso Bayer para obtención de alúmina, y electrólisis para finalmente obtener aluminio de alta pureza [2.1]); de manera que existe un ahorro de energía de aproximadamente 95 % [2.2]. En el proceso de reciclado no cambian las características del material ya que se obtiene un producto con las mismas propiedades. El 100 % de éste material puede reciclarse indefinidamente y sin disminuir la calidad del mismo.

2.1. Aplicaciones del Aluminio

Actualmente, del aluminio que se produce se destina aproximadamente 25 % en la industria del transporte y otra proporción igual en la producción de latas para alimentos y otros empaques. El ramo de la construcción absorbe por su parte 15 %,

al igual que las aplicaciones eléctricas con la misma parte porcentual. El restante 20 % se dirige a otras aplicaciones en general [2.1]. Lo recién descrito es la razón por la cual el aluminio es un metal valioso, mientras que en el ahorro en el consumo de energía por utilizar aluminio reciclado dejando de obtenerlo de la extracción mineral reside el interés económico por el propio material reciclado.

2.2. Ganancias y ventajas.

El costo involucrado el reciclaje del aluminio comparado con el costo de aluminio primario es altamente atractivo como resultado de ahorros de energía importantes. Por este motivo el interés de reciclar aluminio atrae cada vez a más industriales y con ellos el interés de las investigaciones en la disciplina. Los desarrollos actualmente están enfocados a obtener mejores condiciones de fundido para reciclado de aluminio que permita obtener mayor calidad (aluminio de alta pureza y menores defectos de los fundidos) a menores costos y con el menor impacto ambiental nocivo.

Es importante destacar que hoy en día el aluminio reciclado constituye un tercio del consumo de aluminio a nivel mundial [2.3].



Figura 2.1. Procedencia del consumo de aluminio en el mundo [2.3].

2.3. Aplicaciones e investigaciones del reciclado de aluminio

El proceso de reciclado de aluminio comienza con la recolección de desechos que pueden ir desde envases de bebidas y alimentos, desechos de piezas estructurales

2. FUNDICIÓN CONVENCIONAL DEL ALUMINIO Y ALEACIONES

y automotrices, limaduras y virutas procedentes del maquinado de piezas con herramientas de corte, etc. Posteriormente, los desechos se compactan y se funden en diferentes hornos según las aplicaciones que deban darse al aluminio obtenido. El aluminio líquido obtenido se vacía en los moldes que le proporcionan una forma final o semifinal de la pieza de fundición y por último se maquina para proveer a las piezas de su forma final si se requiere. En la figura 2.2 se muestra un proceso convencional simple de reciclado de aluminio mediante fundición. El suministro de energía más importante ocurre en la etapa de fundición. Obsérvese los desperdicios de material que se generan en las diferentes etapas del proceso:

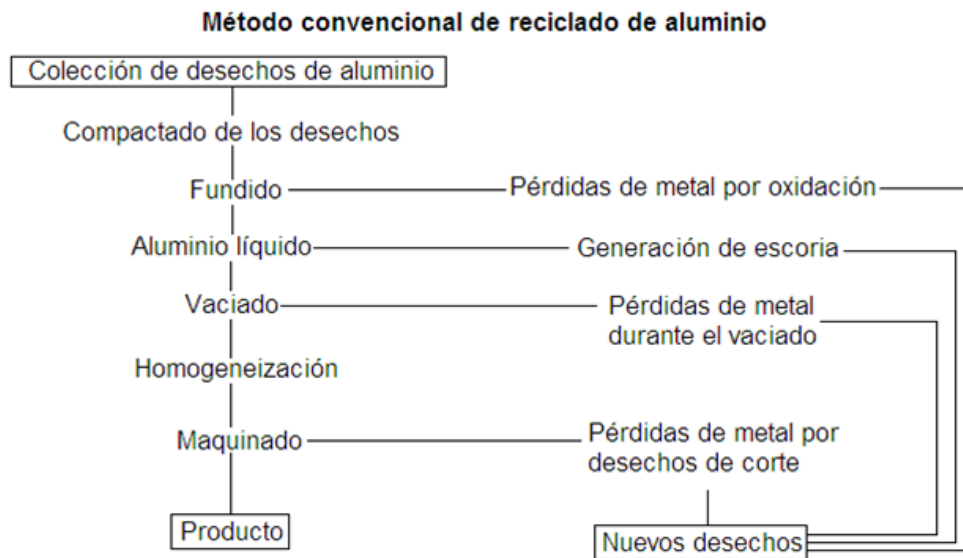


Figura 2.2. Proceso convencional simple de reciclado de aluminio por fundición[2.4].

El aluminio que se obtiene de un proceso de reciclado como el que se ha descrito es frecuentemente empleado para crear productos nuevos de la misma especie de la cual son desecho, pues las aleaciones fundidas contienen prácticamente los mismos elementos aleantes.

Además de los problemas económicos de maquinado y fundición que las empresas productoras de aluminio a partir de reciclado deben enfrentar, existe el hecho

de que en el proceso convencional se incurre en pérdidas de material [2.4], como se ha venido planteando. El diagrama en la figura 2.3 muestra el proceso convencional de reciclado de aluminio para obtener productos finales de extrusión. Obsérvese que en las etapas nuevas del proceso que permiten productos más específicos, existen nuevos desperdicios de material. En conjunto, cada uno de éstos redonda en una mayor pérdida de material y del empleo de mayor cantidad de energía provocando productos finales más caros y por consiguiente procesos menos eficientes.

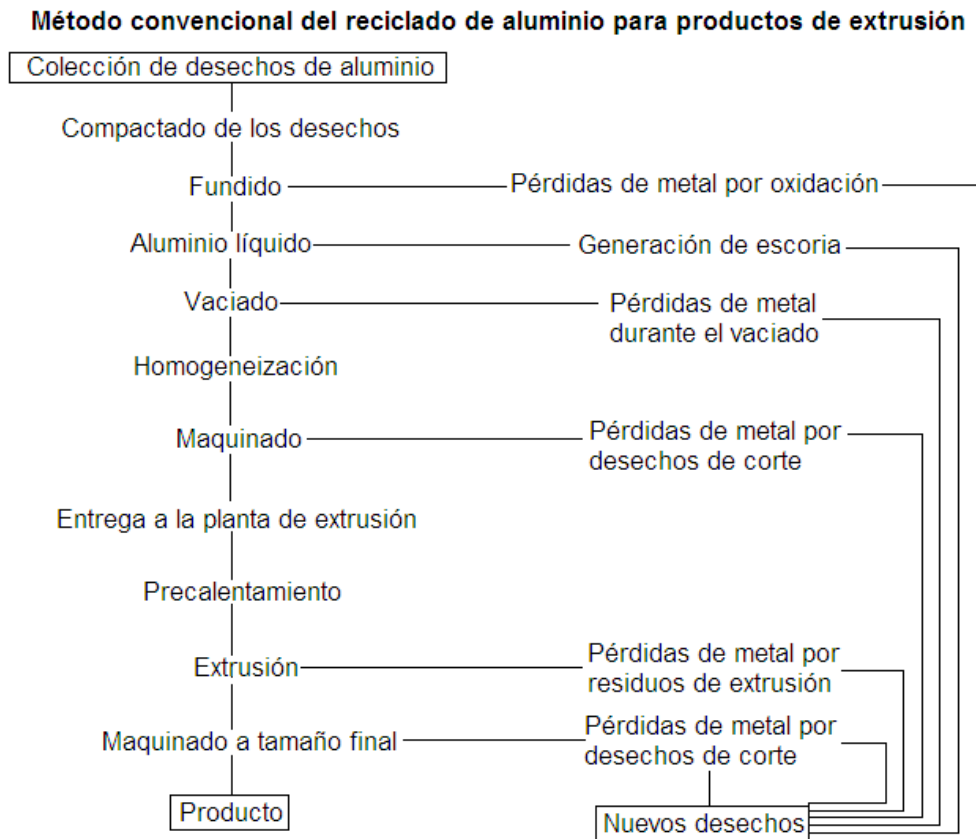


Figura 2.3. Proceso convencional de reciclado de aluminio para productos extrusión [2.4].

Alternativamente a un proceso de fundición para reciclado de aluminio M. Samuel [2.4] propone la obtención de productos finales de aluminio de una manera

más directa, que no recurre a la fundición, sin embargo requiere calor de proceso en etapas como la de sinterizado. El proceso consigue un importante ahorro de energía pero su principal impacto es el hecho de que los productos finales surgen del aprovechamiento directo de más del 90 % del producto de desecho. El método que se propone es el que se ilustra en la figura 2.4.

Método de conversión directa para reciclado de aluminio

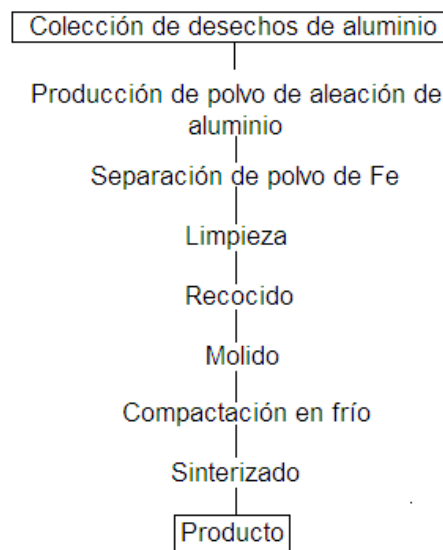


Figura 2.4. Método de conversión directa para reciclado de aluminio aplicada a productos de extrusión [2.4]

De la turbulencia en el vaciado de lingotes, se demostró que la disminución en la agitación disminuía entre otras cosas la generación de escoria en el proceso y de otros intermetálicos que disminuyen la calidad del mismo. Además es importante cuidar que los procedimientos de vaciado se lleven a cabo con la menor altura posible entre el canal de vaciado el molde.

De una manera más concreta, del proceso de fundición de aluminio y de aleaciones de aluminio de desecho y material de desperdicio de proceso, resulta que en promedio cerca del 10 % del metal se oxida y cerca del 10 % de este se pierde porque el aluminio se mezcla con la escoria y se retira de la superficie con el cucharón.

2. FUNDICIÓN CONVENCIONAL DEL ALUMINIO Y ALEACIONES

Las pérdidas son irreversibles y pueden alcanzar cerca del 35 % si la fundición se lleva a cabo en hornos de gas o de combustibles líquidos en lugar de en los hornos de inducción.

Más tarde, durante el proceso de vaciado para solidificación de lingotes de aluminio, las pérdidas ascienden a cerca del 18 %. Por lo tanto en última instancia no más el de 54 % del metal se recupera.

En el caso de la conversión directa de las virutas de aluminio y de aleaciones de aluminio en metal compacto por extrusión, el desperdicio radica en las virutas y hojuelas de las que las impurezas no pueden ser retiradas constituyendo aproximadamente el 2 %. Posteriormente el desperdicio de la extrusión constituye aproximadamente el 3 % del peso de la cantidad del material original; así en última instancia 95 % del metal se recupera.

La energía consumida para el reciclaje convencional del aluminio es generalmente 16-19 GJ por tonelada, mientras que en los métodos de conversión directa de conversión de virutas de aluminio en material compacto solamente se emplean 5-6 GJ de energía por tonelada.

Reduciendo el número de operaciones, los métodos de conversión directa permiten que el trabajo sea reducido a 2.5 a 6.5 horas-hombre por tonelada de producto, mientras que para el reciclaje convencional, este se sugiere mucho más alto, partiendo de 11 hasta 15 horas-hombre por tonelada, incluyendo 3 horas-hombre por tonelada para la producción de lingotes, 5 horas-hombre por tonelada necesarios para producir bloques para la extrusión y de 3 a 5 horas-hombre por tonelada para la producción de secciones de producto terminado [2.5].

Los beneficios de la conversión directa del aluminio de desecho y de las virutas de aleación de aluminio en metal compacto incluyen también la posible reducción en los fondos invertidos para la protección del medio ambiente como resultado del consumo reducido de insumos energéticos, y menos degradación del ambiente debido a la emisión reducida de contaminantes del aire y de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el calor necesario para las procesos industriales puede ser obtenido a partir de las fuentes de energía renovable, reduciendo al mínimo la contaminación que pueden representar procesos como el que se ha tratado.

2.4. Propiedades del Aluminio y sus aleaciones

Actualmente, es notable la gama de propiedades físicas y mecánicas que pueden ser desarrolladas, yendo desde el aluminio de gran pureza hasta las aleaciones más complejas. Se han desarrollado y son reconocidas más de trescientas composiciones de la aleación, y muchas otras son adicionales ya que se han desarrollado internacionalmente y en relación a la demanda de los consumidores.

La resistencia específica del aluminio y sus aleaciones es muy alta, por esta razón ha existido un interés en éste material para emplearlo en aplicaciones muy diversas. Otras propiedades que hacen atractivo el uso del aluminio es que tiene excelentes propiedades para la maquinabilidad, es por esto que una diversidad de piezas para decoración de interiores se fabrican en aluminio (figura 2.5).



Figura 2.5. Moldura de aluminio empleada en tapicería. Estas molduras son hechas mediante extrusión.

2. FUNDICIÓN CONVENCIONAL DEL ALUMINIO Y ALEACIONES

Además de que exhibe típicamente conductividad eléctrica y térmica excelente, sin embargo existen aleaciones específicas que se han desarrollado con altos niveles de resistencia eléctrica. Estas aleaciones son útiles, por ejemplo, en motores eléctricos del alto torque.

Hablando del aprovechamiento del aluminio por su alta conductividad eléctrica, se prefiere en ciertas aplicaciones, ya que es casi dos veces mayor que la del cobre basándose en un peso equivalente. Los requisitos de la alta conductividad y de resistencia mecánica se pueden cumplir por medio del cable de aluminio reforzado con centro de acero para transmisión a larga distancia de alta tensión eléctrica (figura 2.6).



Figura 2.6. Cable de aluminio con núcleo de refuerzo. Producto empleado en las redes eléctricas de distribución.



Figura 2.7. Cancelería hecha de aluminio. Se prefiere al aluminio a otros materiales por la resistencia a la corrosión que lo caracteriza.

El aluminio es un material que no tiene comportamiento magnético y presenta una resistencia natural a la corrosión y a la oxidación excelentes en la mayoría de los ambientes (figura 2.7), incluyendo la atmósfera, agua (incluida el agua salada), productos petroquímicos, y muchos agentes químicos[2.6].

El aluminio tiene una densidad de solamente $2,700 \text{ kg/m}^3$, poco menos de la mitad de la del acero ($7,830 \text{ kg/m}^3$), menos de un tercio del cobre ($8,930 \text{ kg/m}^3$), o del latón ($8,530 \text{ kg/m}^3$).

Las superficies de aluminio pueden ser altamente reflejantes. La energía radiante, la luz visible, y las ondas electromagnéticas se reflejan eficientemente, mientras que las superficies anodizadas y las superficies anodizadas oscuras pueden ser reflexivas o absorbentes. La reflexión del aluminio pulido, sobre una gama amplia de longitudes de onda, lleva a su selección para una variedad de aplicaciones decorativas y funcionales.

El empleo del aluminio será incentivado por las propiedades recién descritas, pero limitado por otras propiedades, como el hecho de que no es utilizable en aplicaciones donde se manejen altas temperaturas, pues el punto de fusión del aluminio es considerado bajo. Por otro lado, las aleaciones de aluminio no alcanzan durezas elevadas, implicando que su resistencia al desgaste es pobre, aun a pesar de que las aleaciones

de aluminio llegar a ser hasta 30 veces más resistentes que el aluminio puro y que la respuesta de las mismas es buena ante los mecanismos de endurecimiento. No obstante, algunas aleaciones de aluminio mejoran la resistencia específica estructural del acero, es el caso de las aleaciones que son utilizadas para la fabricación de componentes estructurales en aviones [2.7].

2.5. Fundición convencional de aluminio y los diferentes hornos empleados en su fundición.

La mayoría de los metales que se funden son aleaciones y el aluminio no es la excepción cuando se trata de reciclar; esto es referente al aluminio ya aleado (proceso de reciclado) hasta al aluminio de alta pureza, extraído de la bauxita que será aleado por medio de la fundición. En este caso, las fundiciones se llevan a cabo en una fundidora. Las fábricas que reciben el nombre de fundidoras son aquellas que cuentan con el equipo necesario para fundir, manejar los metales ya fundidos, moldear y aun procesar de manera total o parcial las piezas obtenidas, los cuales son sus productos finales.

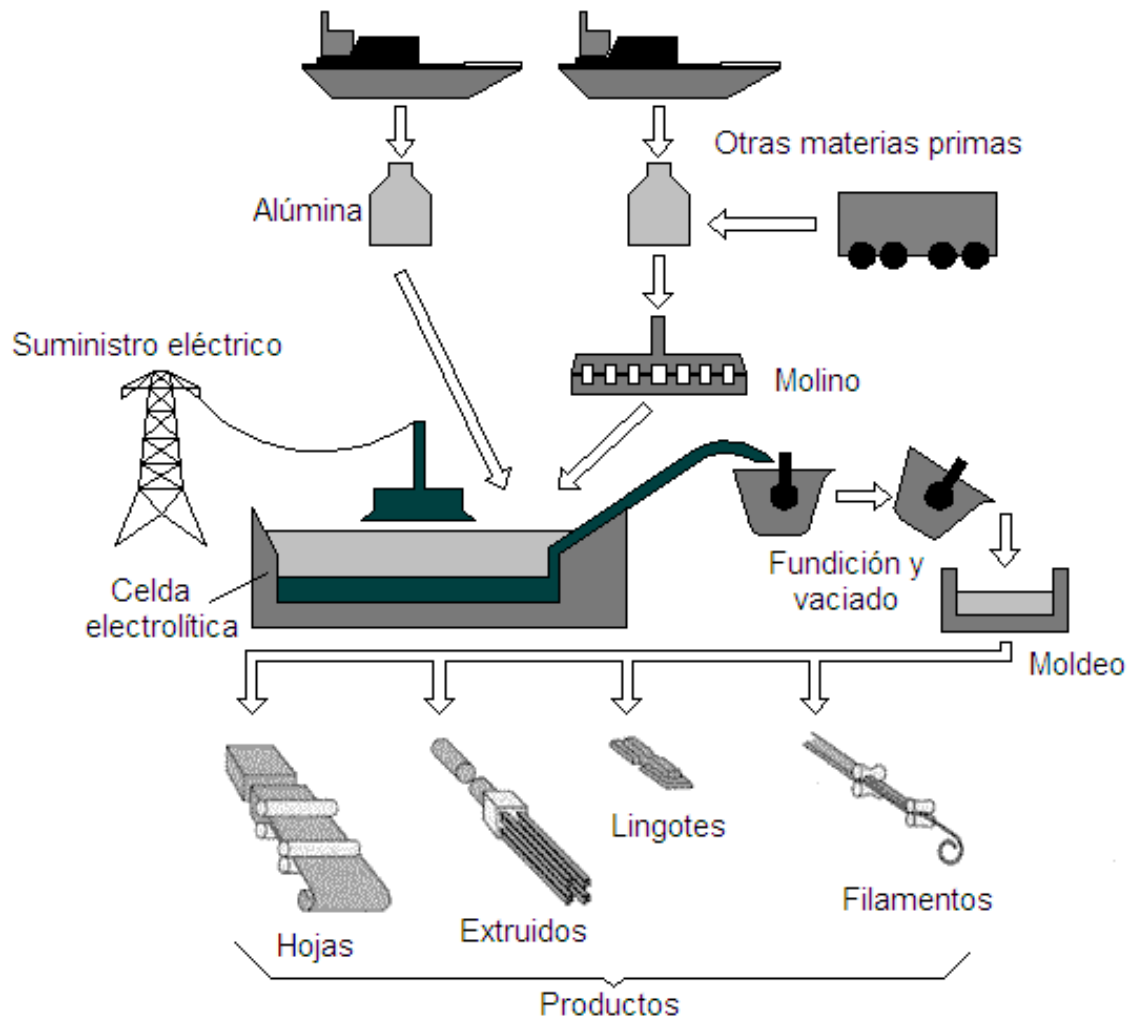


Figura 2.8. Proceso de producción y reciclado general de aluminio.

En la figura 2.8 se observa que las materias primas que vienen de reciclado o la alúmina extraída en la minería se procesan por molienda previa para ingresar a la celda electrolítica. El aluminio que se capta de este proceso se funde posteriormente para un primer moldeo; por último, en algunas fundidoras los productos del primer moldeo se procesarán parcial o totalmente para obtener un producto final.

Para el caso del aluminio, son aplicables los procesos de fundición convencionales que comienzan con el molde. Los metales tienen diferentes coeficientes de contracción, es por eso que los moldes deben de poseer un diseño adecuado para el metal

que se va a fundir en particular. Los moldes están hechos de diferentes materiales en los que se encuentran principalmente arena, cerámicos y metal.

Para la operación de fundido, el aluminio se calienta hasta que obtenga una temperatura suficientemente alta, la cual los transforme por completo al estado líquido. En el mismo proceso el metal continúa calentándose hasta que la temperatura sea algo más alta que la del punto de fusión; esto se lleva a cabo con la finalidad de que exista tiempo suficiente para que el metal no se solidifique en algún momento previo al vaciado en el molde.

La energía calorífica necesaria para fundir el aluminio la proporciona el horno de fundición. Ésta energía puede seccionarse en tres componentes principales. La primera componente es el calor sensible y corresponde al calor necesario para que el aluminio alcance la temperatura de fusión; la segunda componente es de calor latente, que servirá para convertir el total de la masa de aluminio sólido en líquido; y por último, nuevamente tratándose de calor sensible, es el calor necesario para que el aluminio ya fundido alcance la temperatura deseada para verterlo.

Para calentar el aluminio a una temperatura de fusión suficiente para la fundición, se utilizan hornos de varias clases [2.8]:

1. Hornos de combustible directo: son recintos que albergan en su interior al metal que se va a fundir y sus paredes sirven como deflectores de una flama que tiene contacto directo con el metal; es ésta particularidad de donde se deriva su nombre. Por su parte, cuentan también con orificios, el primero denominado cañón permite la salida de los gases de la combustión y el segundo que se ubica en la parte inferior es por el que se retira el metal cuando ha sido fundido.

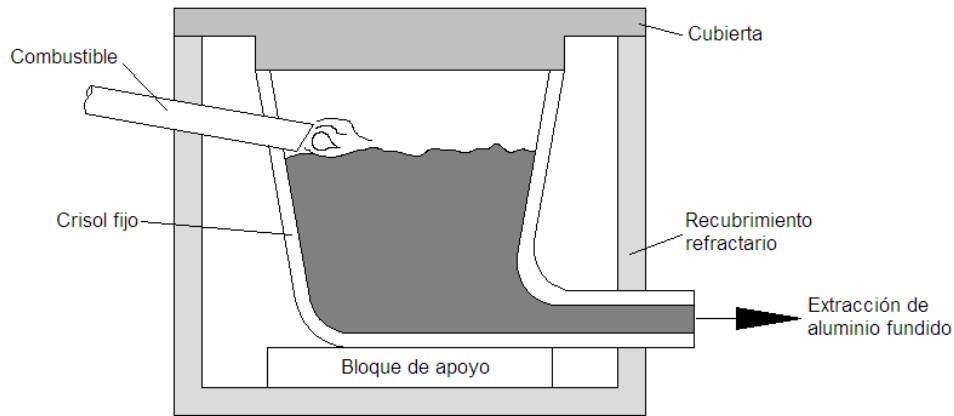


Figura 2.9. Esquema de un horno combustible directo [2.8].

2. Crisoles: a diferencia de los anteriores hornos de combustible directo, en estos hornos no existe contacto directo de la flama con el metal que se va a fundir; es por eso que en algunas ocasiones se les conoce como hornos de combustible indirecto. Este tipo de hornos en todas sus variantes (móvil, estacionario y de volteo), consisten en un recipiente construido de material refractario que contiene el material que se va a fundir. Este recipiente que se conoce como crisol se emplaza dentro de una coraza metálica o refractaria que sirve como deflector de la flama para que ésta rodee la superficie exterior del crisol en la mayor área posible.

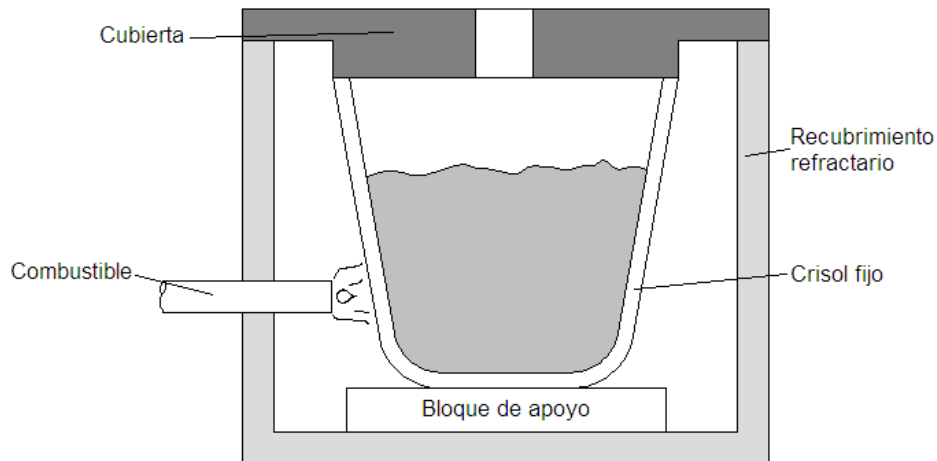


Figura 2.10. Esquema de un horno de crisol [2.8].

2. FUNDICIÓN CONVENCIONAL DEL ALUMINIO Y ALEACIONES

3. Hornos de inducción: el principio bajo el cual operan estos hornos, es que hacen pasar una corriente alterna por una bobina para que el campo magnético que se genera produzca corrientes en los metales que se desean fundir, siendo estas corrientes las responsables de producir el calor necesario debido al efecto Joule. En realidad estos hornos se utilizan para fundir todo tipo de aleaciones, sin embargo tienen una ventaja producida por su principio de funcionamiento; ya que el calor es producido por las corrientes inducidas y no por agentes químicos (como los combustibles que emplean los hornos de combustible directo y los crisoles), es posible controlar en mejor manera el ambiente donde ocurre la fundición, permitiendo lograr aleaciones de pureza muy y homogeneidad muy altas (los campos electromagnéticos crean una acción mezcladora en el liquidus).

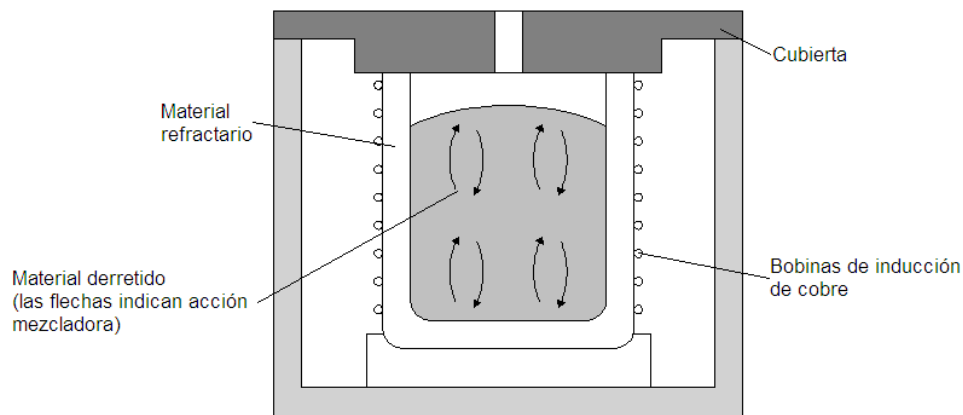


Figura 2.11. Esquema de un horno de inducción [2.8].

Tan pronto como el aluminio alcanza el punto de temperatura de congelamiento empieza a solidificarse. La solidificación involucra un cambio de fase del metal, y se requiere tiempo para este cambio de fase. Es aquí donde se debe considerar la tan importante pérdida de calor y los fenómenos que trae consigo, pues es donde el metal adopta muchas de las características y propiedades del fundido.

Posteriormente se llevan a cabo todos procesos de maquinado que incluyen desde el corte del exceso de aluminio de la pieza neta, así como pulido, limpieza, rectificación, etc., o bien como tratamientos térmicos para que la pieza obtenga las propiedades deseadas.

2.6. Desventajas de la obtención de Aluminio por métodos convencionales.

Inconvenientes de la extracción de aluminio del mineral bauxita.

Es claro que para poder obtener cierta cantidad de masa aluminio, será necesaria una cantidad de masa aún mayor de alúmina y para obtener ésta, se requiere una proporción aun mayor de bauxita. Extraer aluminio del mineral bauxita involucra los procesos que se trataron con anterioridad; extracción de bauxita, triturado y lavado, obtención de alúmina por el proceso Bayer y electrólisis en baño de criolita. Todos estos procesos –particularmente la electrólisis- involucran un consumo energético elevado, este es el gran inconveniente en lo que refiere a producción de aluminio.

Inconvenientes del reciclado del aluminio.

El reciclado de aluminio que se lleva a cabo mediante la fundición de la chatarra, permite obtener un ahorro de energía de aproximadamente el 95 % [2.9, 2.12] cuando se le compara con la energía empleada para obtener aluminio a partir del mineral. Sin embargo, el proceso de fundido en los diferentes hornos que tiene lugar la fundición de aluminio requiere combustibles como petróleo, gas o carbón en polvo involucrando aun un elevado consumo energético [2.10]. Estos combustibles son productores de los gases de efecto invernadero.

La fundición para el reciclado de aluminio y otros metales hoy en día representa un área de oportunidad para desarrollar tecnologías que permitan obtener productos por nuevos métodos ante todos estos inconvenientes que se han venido señalando. Métodos innovadores como el que presentan H. Amini Mashhadi et al. [2.11], demuestran que el reciclado de aluminio por compactación en frío de determinadas aleaciones y su posterior fundido, permite un importante ahorro energético obteniendo muestras con propiedades físicas y químicas muy cercanas a las que se obtienen preparando la aleación con el fundido convencional.

Estos inconvenientes han llevado a los países a emplear reciclado de metales no solo para el aluminio, sino para metales como el cobre y el acero. Propiamente en ciertos países Europeos el consumo total aumentó de 35 % a 55 % [2.12]; tendencia

que continúa en aumento.

2.7. Proceso de fundición de latas de aluminio para reciclaje.

El reciclado de latas de refrescos, debido a la composición de sus elementos constituyentes plantea un proceso ciertamente más difícil de una fundición simple. Las latas de refrescos están fabricadas con dos aleaciones de aluminio:

1. 3004 para el cuerpo principal
2. 5182 para la tapa de la lata

Estas aleaciones contienen diferentes elementos aleantes: manganeso para la 3004 y magnesio para la 5182. Mientras que la 3004 tiene una excelente formabilidad para que en ella se lleve a cabo el embutido profundo del cuerpo; la 5182 es más dura y por ello es posible la operación del dispositivo convencional de apertura de la lata.

Cada uno de los elementos aleantes le proporciona al aluminio determinadas características mecánicas que lo hacen apto para la aplicación que debe desempeñar sin embargo, cuando todo los elementos aleantes de una lata de aluminio se encuentran juntos en una misma fundición, el producto final no posee las características para conformar una lata nuevamente (para el cuerpo o la tapa); esto hace difícil la fundición de latas de aluminio para obtener nuevamente materia prima que permita obtener nuevos envases. Sin embargo existen diferentes opciones de proceso químicos y físicos para separar alguno de los elementos aleantes.

La primera opción plantea separar ambos constituyentes de las latas. Ambas partes se trituran y a continuación se calientan para eliminar la laca que las cubre. Nuevamente se tritura la chatarra de las latas, y se someten al crisol para dar lugar al proceso de fundición en el que esta segunda trituración se lleva a cabo a la temperatura de fusión de la 5182. Debido a las propiedades de cada una de las aleaciones (propiamente al rango de solidificación), en el proceso de fundición de los pedazos, aquellos de la 3004 existen a mayor tamaño. Dada la diferencia de los pedazos entre

una aleación y la otra pueden separados para que ambas aleaciones terminen de fundirse por separado, luego vaciadas y procesadas para constituir la materia prima de nuevas latas u otros productos.

La otra alternativa es llevar a cabo la fundición de ambos tipos de chatarra de los envases de bebida. Ya que el cloro es un gas que reacciona de manera selectiva con el magnesio formando cloruros, cuando todo el material está fundido, se hacen pasar burbujas de gas cloro a través de la aleación. La aleación que queda es rica en manganeso y puede ser ajustada para reciclarse como una aleación 3004 [2.9].

2.8. Componentes y usos típicos de las aleaciones de Al 3004 y 5182.

Aleación 3004

Los elementos que constituyen la aleación 3004 [2.6], empleada para formar el cuerpo del envase (lata) se observan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Elementos componentes de la aleación 3004. Elemento sobresaliente es el Mn.													
Porcentaje en peso de los elementos de la aleación 3004													
Desig.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Otros	Ti	No Esp.
3004	0.3	0.7	0.25	1 - 1.5	0.8 - 1.3	-	-	0.25	-	-	-	-	0.2

Ante el porcentaje de 1 % a 1.5 % en peso del manganeso en la aleación 3004, y del diagrama de fase Aluminio – Manganeso (figura 2.12), se observa que el punto de fusión de ésta aleación es 655 °C aproximadamente.

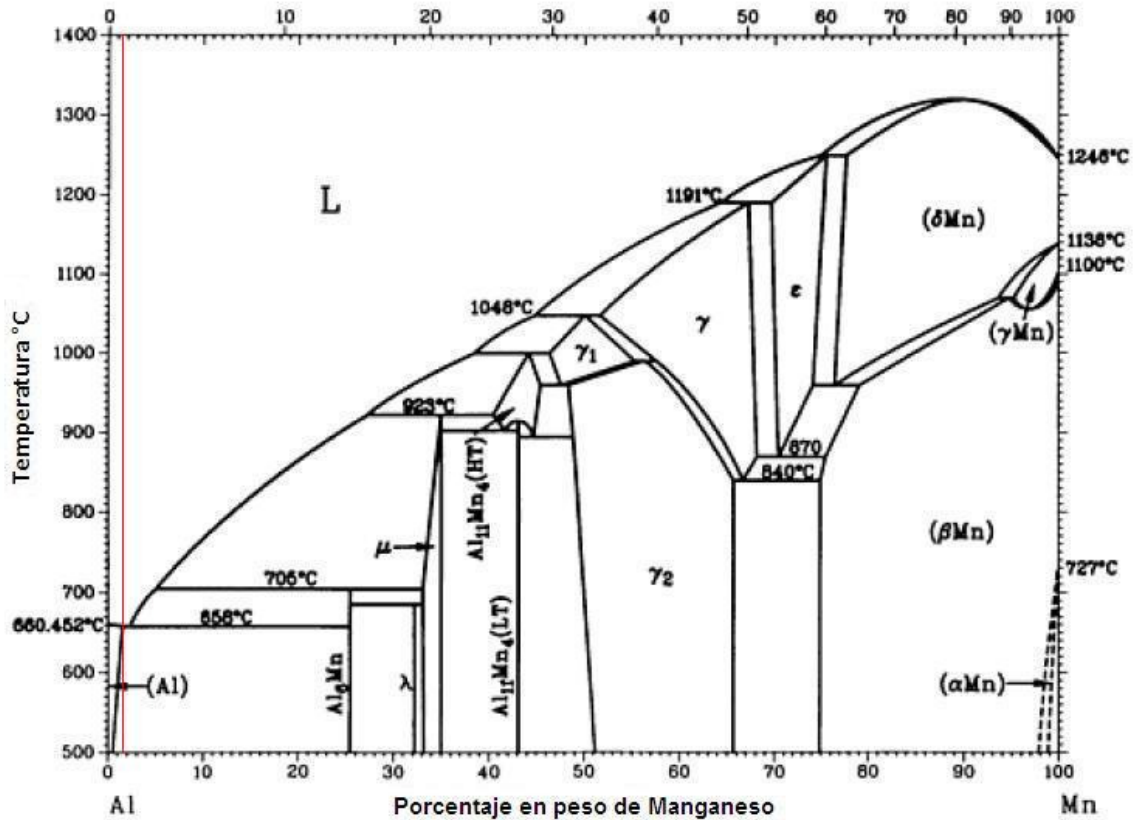


Figura 2.12. Diagrama de fase Aluminio - Manganeso [2.13].

Aplicaciones típicas de la aleación 3004.

Las aplicaciones típicas que se tienen para la aleación 3004 son las siguientes: envases rígidos (latas), almacenamiento y transporte de químicos, productos de hoja metálica de aluminio, hardware en general, bases para lámparas fluorescentes e incandescentes y otras aplicaciones similares que requieren buena formabilidad y una resistencia más alta que proporcionada por 3003.

Aleación 5182

Los elementos que constituyen la aleación 5182 [2.6], empleada para formar la tapa del envase (lata) son los siguientes:

Tabla 2.2. Elementos componentes de la aleación 5182. El elemento sobresaliente es Mg.													
Porcentaje en peso de los elementos de la aleación 5182													
Desig.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Otros	Ti	No Esp.
5182	0.2	0.3	0.15	0.2 - 0.5	4 - 5	0.1	-	0.25	-	-	-	0.1	0.15

Ante el porcentaje de 4 % a 5 % (obsérvese la línea roja de la figura 4) en peso del magnesio en la aleación 5182, del diagrama de fase Aluminio – Magnesio, se observa que el punto de fusión de ésta aleación es 632 °C aproximadamente.

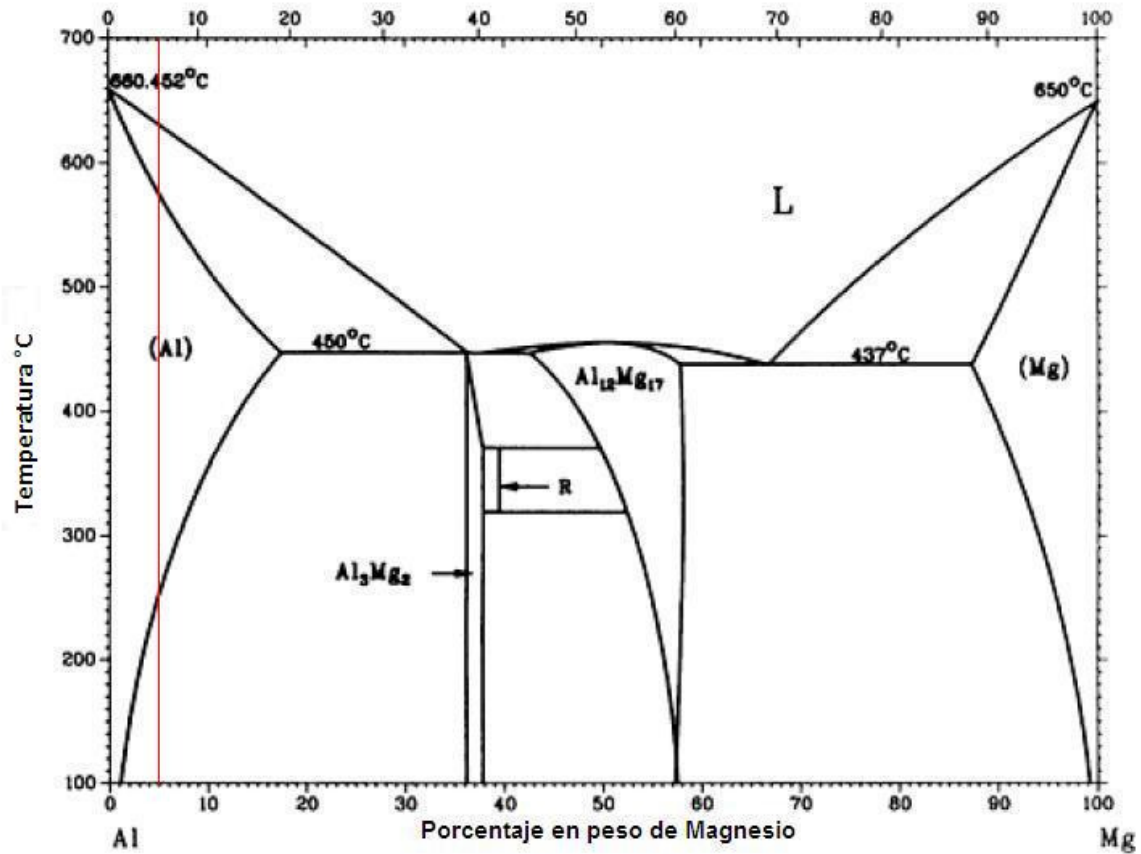


Figura 2.13. Diagrama de fase Aluminio - Magnesio [2.13].

Aplicaciones típicas de la aleación 5182.

Las aplicaciones típicas que se tienen para la aleación 3004 son las siguientes: Tapas de recipientes, cuerpos de los paneles automotrices y diversos elementos de refuerzo, soportes y partes de ensamble.

Referencias.

[2.1] Mikell P. Groover; Fundamentos de manufactura moderna; Tercera edición; ISBN - 13: 978 - 970 - 10 - 6240 - 1; ISBN - 10: 970 - 10 - 6240 - X. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. (2007).

[2.2] Donald R. Askeland, Pradeep P. Phulé; Ciencia e ingeniería de los materiales; Cuarta edición; ISBN 970 - 686 - 361 - 3. International Thomson Editores S.A. de C.V. (2004).

[2.3] Derya Dispinar, John Campbell; Effect of casting conditions on aluminium metal quality; Journal of Materials Processing Technology 182 (2007) pp. 405–410.

[2.4] M. Samuel; A new technique for recycling aluminium scrap; Journal of Materials Processing Technology 135 (2003) pp. 117 – 124.

[2.5] J. Gronostajski, H. Marciniak, A. Matuszak; New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling; Journal of Materials Processing Technology 106 (2000) pp. 34-39.

[2.6] ASM Handbook Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 1992.

[2.7] Callister, W.D., Materials science and engineering, an introduction, 7th ed., John Wiley & Sons, New York, 2007.

[2.8] Groover, M.P., Fundamentos de manufactura moderna, Tercera edición, McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, 2007.

[2.9] Askeland, D.R., Phulé, P.P., Ciencia e ingeniería de los materiales, 4^a ed., International Thomson Editores S.A. de C.V., México, 2004.

[2.10] H. Puga, J. Barbosa, D. Soares, F. Silva, S. Ribeiro, Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) pp. 5195–5203.

[2.11] H. Amini Mashhadi, A. Moloodi, M. Golestanipour, E.Z.V. Karimi; Recycling of aluminium alloy turning scrap via cold pressing and melting with salt flux; Journal of materials processing technology 209 (2009) pp. 3138–3142.

[2.12] J. Gronostajski, A. Matuszak; The recycling of metals by plastic deformation: an example of recycling of aluminium and its alloys chips; Journal of Materials Processing Technology 92-93 (1999) pp. 35-41.

[2.13] ASM Handbook Vol. 3, Alloy Phase Diagrams, ASM International 1992.

3

FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

3.1. Descripción del concentrador solar de disco parabólico.

En el Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México se ha diseñado y construido un concentrador solar de disco parabólico [3.1]; el cual se utilizará para realizar aplicaciones a la manufactura las cuales requieren de temperaturas mayores a 723 K (ver figura 3.1).

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

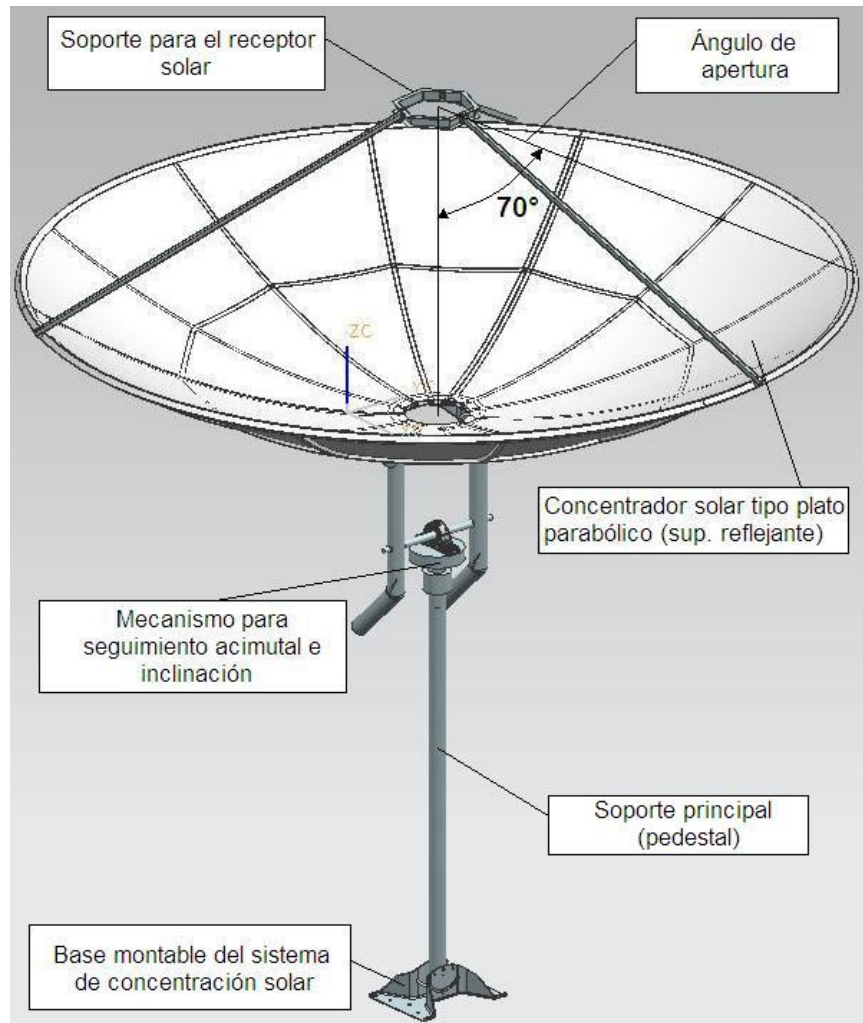


Figura 3.1. Concentrador solar de 70 grados de abertura

El concentrador solar tiene una apertura de 70 grados y posee un soporte para el receptor solar sujeto a tres puntos del concentrador. A su vez, el concentrador solar se acopla a un pedestal donde encuentra el mecanismo de seguimiento solar; el cual tiene dos grados de libertad: acimutal y de elevación. El soporte principal de este concentrador es de tipo pedestal, mismo que se sujeta a una base montable que le permite fijarse a su vez a cierta una inclinación deseada.

Las características del disco parabólico se encuentran listadas en la tabla 3.1:

Diámetro de apertura [m]	2
Área del concentrador [m ²]	3.14
Distancia focal [m]	0.714
Ángulo de apertura [grados]	70
Reflectancia	0.92

3.2. Análisis del trazado de rayos del concentrador solar.

Para determinar las dimensiones óptimas del receptor solar, así como la posición en el eje focal del concentrador se ha llevado a cabo el análisis de trazado de rayos del concentrador solar descrito en la sección 3.1. Para dicho análisis se ha utilizado el programa SolTRACE [3.4].

Los parámetros utilizados para el análisis se presentan en las tablas 3.2 y 3.3.

Introducción de los datos de intensidad solar Distribución del perfil solar. Para este caso se utilizó una distribución de tipo gaussiana, misma que se describe por la función:

$$S = \frac{1}{2\sigma^2} \exp \left[-\frac{\rho}{2\sigma^2} \right] \quad (3.1)$$

Posición del Sol.

Se ha definido, como lo demanda la metodología de SolTRACE, un punto en el sistema coordenado global (X,Y,Z) para la posición del Sol, y para la cual se ha tomado el siguiente punto: (0,0,100).

Parámetros de la geometría óptica.

Por su parte, los parámetros utilizados que se ingresaron a SolTRACE para definir la geometría óptica del concentrador solar se presentan en la tabla 3.2.

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

Tabla 3.2. Parámetros utilizados en la definición de la geometría óptica	
Número de etapas	1
Definición de la etapa	Óptica
Origen del sistema coordenado global (X,Y,Z,Global)	(0,0,0)
Punto de referencia (X,Y,Z,Global), Z-Rot (deg)	(0,0,1),(0)
<i>Elemento 1</i>	
(X-Origen, Y-Origen, Z-Origen)	(0,0,0)
(X-Ref, Y- Ref, Z- Ref), Z-Rot (deg)	(0,0,1), (0)
Tipo de apertura	Circular: Diámetro 2 [m]
Tipo de superficie	Parabólica, $c_x = c_y = 0.7$
Tipo de óptica	Reflexión
Propiedades ópticas	
Reflectancia	0.92
Transmitancia	1
Error de superficie	3 [mrad]
Error especular	3 [mrad]
<i>Elemento 2</i>	
(X-Origen, Y-Origen, Z-Origen)	(0,0,0.714 [m])
(X-Ref, Y- Ref, Z- Ref), Z-Rot (deg)	(0,0,0), (0)
Tipo de apertura	Circular: Diámetro 0.065 [m]
Tipo de superficie	Plana
Tipo de óptica	Reflexión
Propiedades ópticas	
Reflectancia	0
Transmitancia	1
Error de superficie	0 [mrad]
Error especular	0 [mrad]

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

La figura 3.2 muestra las intersecciones de los rayos trazados que el programa SolTrace permite obtener, mediante la selección de la única etapa en éste sistema y sus dos elementos que la componen:

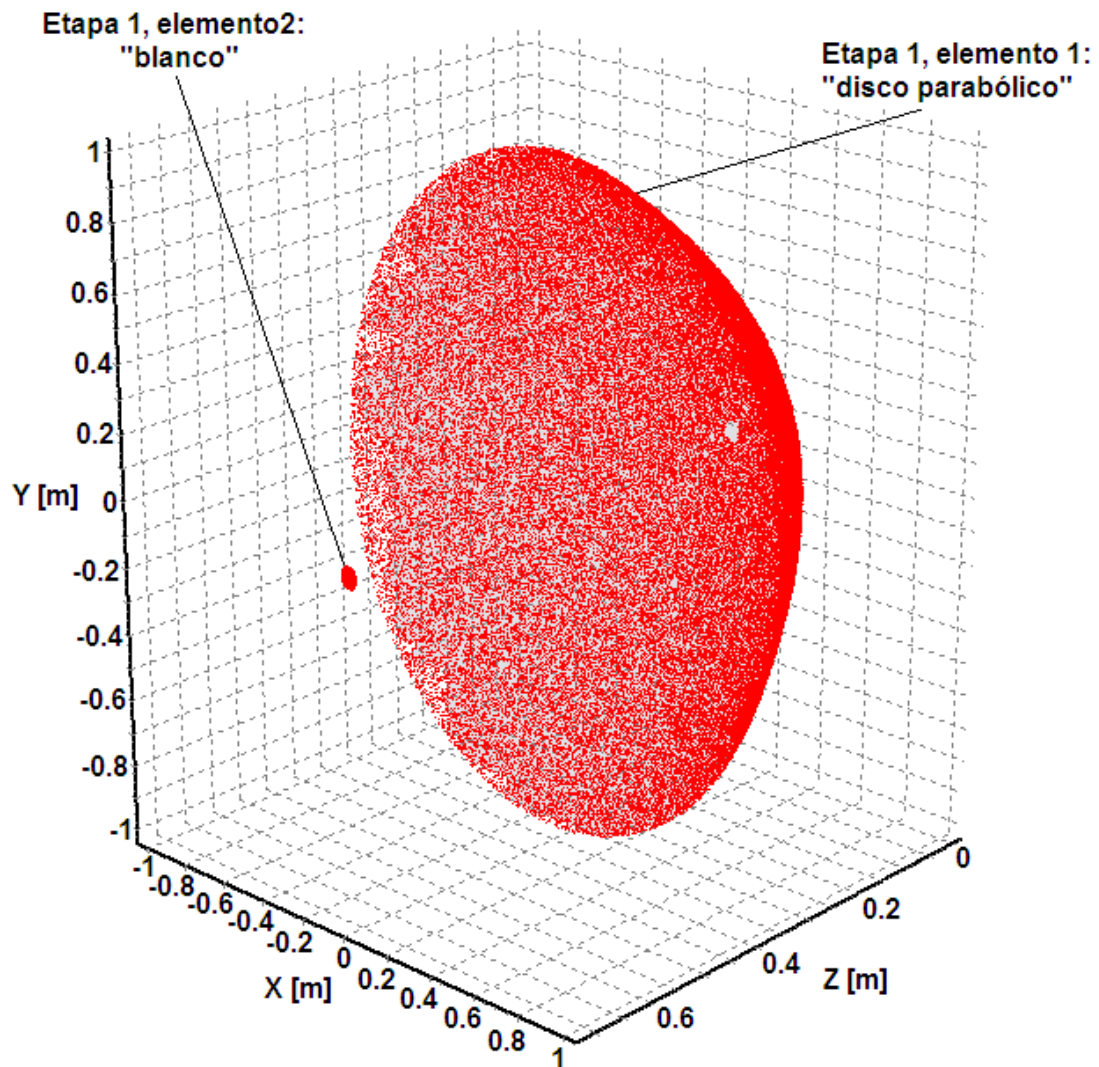


Figura 3.2. Intersecciones de los rayos. Resultado de SolTrace

3.3. Resultados de SolTRACE.

Para realizar el análisis de SolTRACE se ha utilizado un valor de insolación solar de 900 W/m^2 .

Las evaluaciones se realizan acercándose cada $0,02 \text{ m}$ a partir de la distancia de $0,14 \text{ m}$ y hasta $0,08 \text{ m}$; posteriormente se evalúan cada $0,01 \text{ m}$ hasta una distancia de $0,06 \text{ m}$, y a partir de ésta cada $0,005 \text{ m}$ hasta llegar a 0 m del punto focal.

En las figuras 3.3, 3.4, y 3.5 se observan los flujos radiativos obtenidos a una posición de 0.769 m , 0.744 m y 0.714 m sobre el eje focal. Los flujos radiativos máximos que se obtienen para cada una de estas posiciones son de $206 \text{ [kW/m}^2\text{]}$, $590 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ y $8400 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ respectivamente.

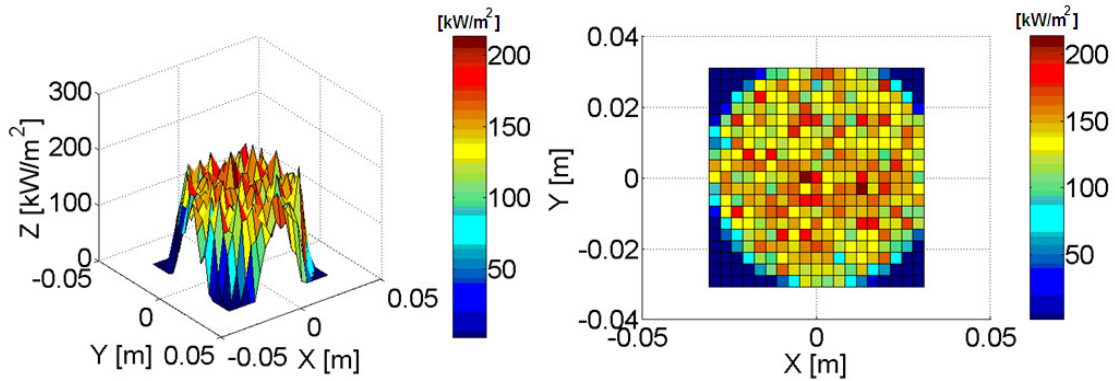


Figura 3.3. Magnitud de la concentración solar, a una posición de 0.769 m

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

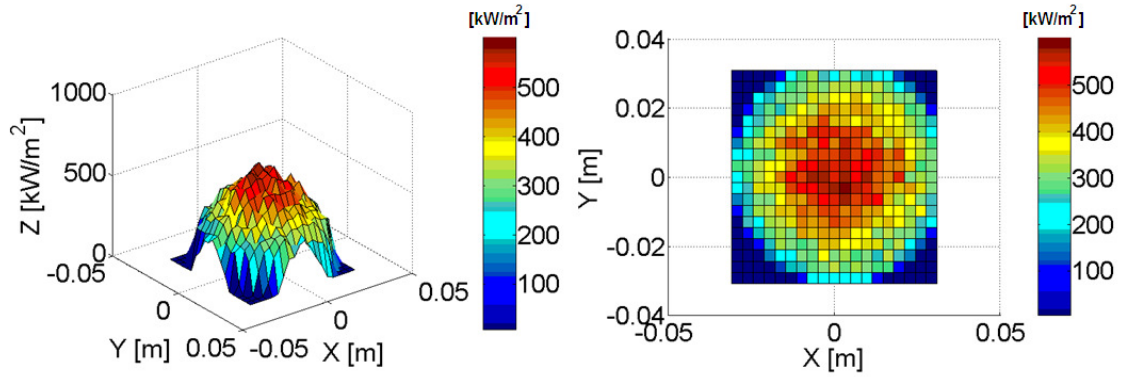


Figura 3.4. Magnitud de la concentración solar, a una posición de 0.744 m

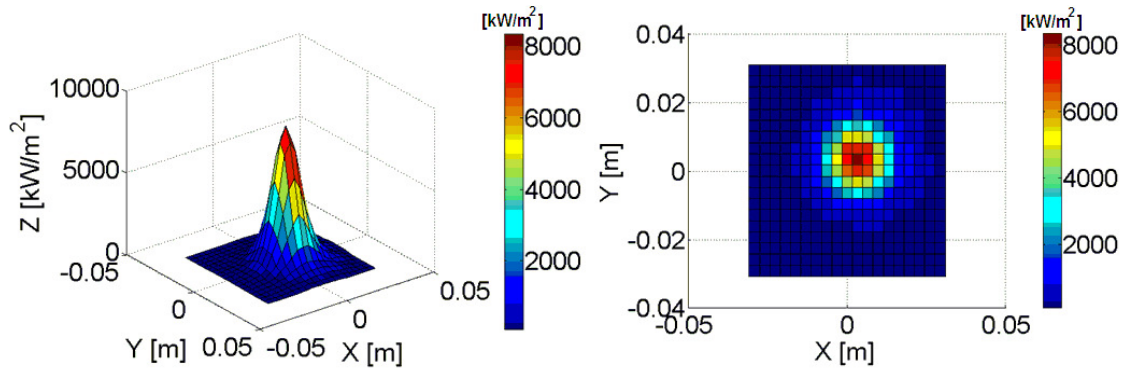


Figura 3.5. Magnitud de la concentración solar, a una posición de 0.714 m

Cuando el “blanco” se aproxima a la distancia focal, las magnitudes de concentración solar son mayores y se logra una concentración definida en un solo punto. Con base en los resultados de SolTRACE, se diseña el receptor, de manera que sus dimensiones le permitan recibir la mayor cantidad de flujo radiativo posible.

En la figura 3.6, se observa que cuando el “blanco” se aproxima a la distancia focal, los incrementos en la magnitud de concentración solar son drásticos. Esto implica que se debe ser muy cuidadoso al elegir la posición que adopte el receptor con respecto al punto focal, de lo contrario el receptor puede ser dañado fácilmente.

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

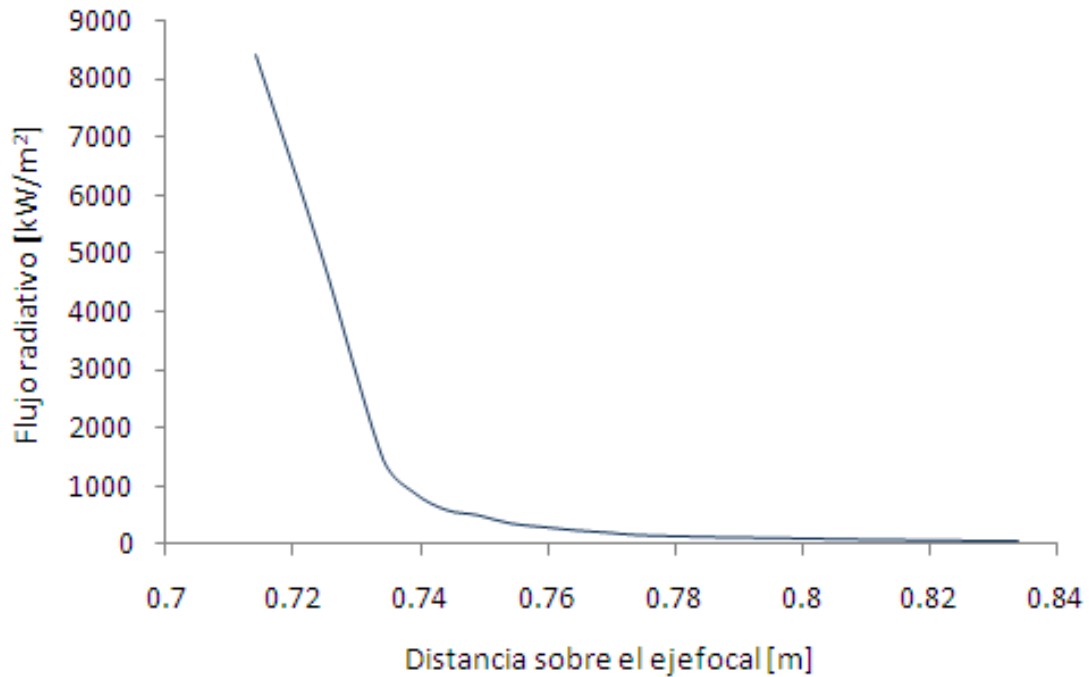


Figura 3.6. Magnitud pico de los flujos radiativos en función de la distancia sobre el eje focal.

En la figura 3.7, se encuentra el diámetro de 95 % de la distribución del flujo en función de la distancia sobre el eje focal. A una distancia de 0.86 m el diámetro que éste porcentaje de flujo alcanza no es mayor a 0.065 m , por lo que un receptor con cavidad de esta dimensión resulta adecuado en virtud de que es capaz de captar 95 % del flujo radiativo aun a $0,15\text{ m}$ del punto focal.

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

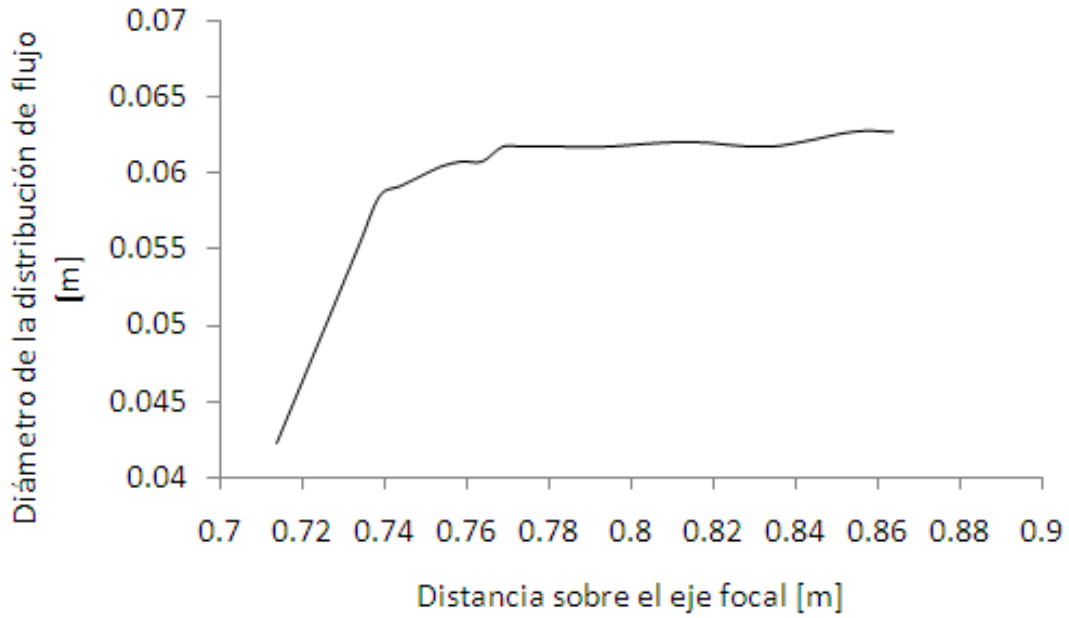


Figura 3.7. Diámetro del distribución del flujo radiativo en función de la distancia sobre el eje focal

3.4. Descripción del problema

En la figura 3.8 se observa que la energía proveniente del concentrador solar, ingresa al receptor solar por medio de la cavidad inferior, transmitiendo de esta forma la energía de radiación por conducción, aumentando la temperatura del crisol, el cual está cubierto por una capa de aislante térmico, mismo que le permitirá reducir las pérdidas de calor al ambiente; a su vez, el crisol albergará en su parte superior la muestra de aluminio que se debe fundir. El propósito de la cavidad inferior es reducir las pérdidas al ambiente por medio de convección natural. La cavidad inferior es capaz de almacenar pequeñas cantidades de aire caliente, evitando así su escape inmediato y permitiendo que el crisol dentro del receptor solar alcance mayores temperaturas. Para ayudar con el efecto recién descrito, en la parte superior del crisol se localiza una tapa que posee un orificio por el cual pueden escapar gases del calentamiento y que permitirá vaciar el aluminio cuando se haya fundido en su totalidad.

Las suposiciones son las siguientes:

- Conducción bidimensional en el crisol y el aislante.
- Solución de la temperatura para el estado transitorio.
- Radiación solar incidente en la parte inferior de la cavidad.
- Pérdidas de convección natural en la parte superior, la parte inferior de la cavidad del crisol y en la superficie exterior del aislante.

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

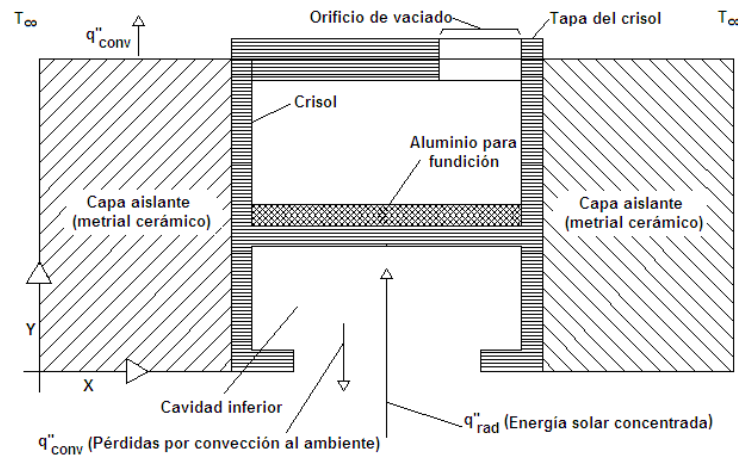


Figura 3.8. Composición y flujos de calor en el receptor solar.

Con base en el análisis de trazado de rayos, se han diseñado las dimensiones del receptor, de modo que el receptor pueda captar la mayor parte del flujo radiativo que proviene del concentrador. De esta manera, el flujo radiativo se aprovecha para calentar el crisol de forma óptima. Las dimensiones se observan en la figura 3.9:

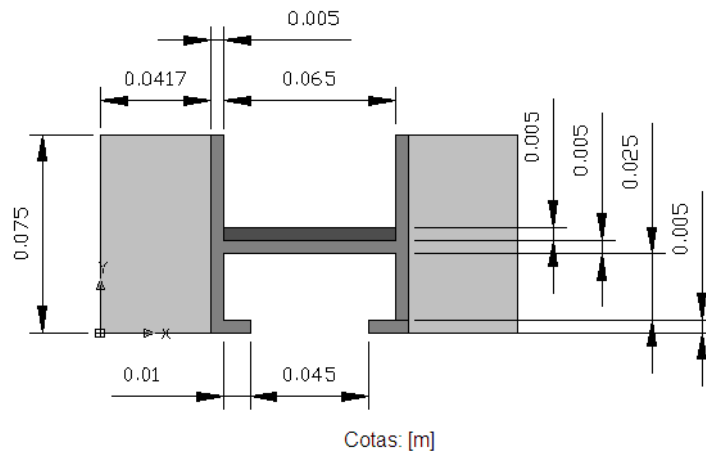


Figura 3.9. Dimensiones de la sección bidimensional del receptor solar

3.5. Balance de energía en el receptor solar.

Con base en la figura 3.8 se tiene que el balance de energía queda de la siguiente forma:

$$q''_{rad} + q''_{conv} + q''_{cond} = \rho_r C p_r \frac{dT}{dt} \quad (3.2)$$

donde:

- q''_{rad} es el flujo de calor de radiación incidente en la cavidad.
- q''_{conv} es el flujo de calor de pérdidas por convección al ambiente.
- q''_{cond} es el flujo de calor por conducción en el crisol y el aislante.
- $\rho_r C p_r \frac{dT}{dt}$ es la variación de energía interna del receptor.

La ecuación (3.2) está sujeta a las siguientes condiciones de frontera:

$$q''_0 = -k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \quad (3.3)$$

$$q''_0 = -k \frac{\partial T(y, t)}{\partial y} \quad (3.4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h [T_\infty - T(x, t)] \quad (3.5)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h [T_\infty - T(y, t)] \quad (3.6)$$

para la siguiente condición inicial:

$$t = 0 \quad (3.7)$$

$$T(x, y, t = 0) = T_\infty \quad (3.8)$$

Para obtener la solución de la ecuación (3.2) se ha utilizado el método de diferencias finitas. A continuación se describe dicho método, así como la deducción de las ecuaciones nodales, las cuales se han realizado con base en la figura 3.8 y en donde se muestra la configuración de los diferentes nodos.

3.6. Análisis por el método de diferencias finitas.

Una de las técnicas numéricas empleadas para conocer los campos de temperaturas es el método de diferencias finitas [3.5].

A diferencia de una solución analítica, que permite conocer la temperatura en cualquier punto de interés en un medio, las soluciones numéricas como la que se emplea, sirven para conocer la temperatura en puntos discretos.

La primera parte de éste método, es entonces discretizar el medio subdividiéndolo en pequeñas regiones, mismas que son representadas por un punto ubicado en el centro. Estos puntos representantes de la región en que se ha subdividido el medio se conocen como "puntos nodales" o bien simplemente "nodos".

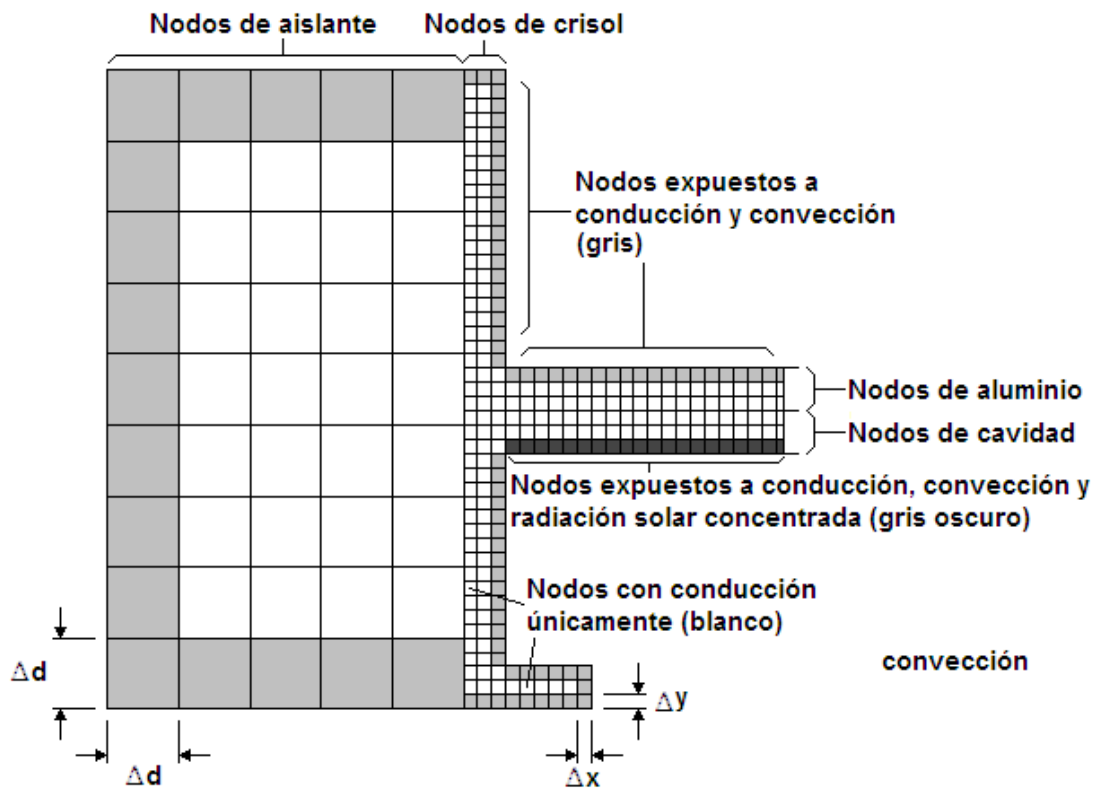


Figura 3.10. Sección bidimensional del receptor solar (reducida por simetría)

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

Cada punto nodal en el medio recibe una designación numérica. En una representación bidimensional como es el caso del presente análisis, la posición x , y y de cada nodo es representada por los índices m y n respectivamente.

Habiendo anticipado que cada nodo representa cierta región en el medio, la temperatura del nodo será entonces la temperatura promedio de su región.

La discretización se hace anteponiendo principalmente la geometría del medio y la precisión que se desea obtener tanto espacial como temporalmente; es decir, una discretización fina (regiones muy pequeñas en relación al total del medio de interés) será conveniente cuando la necesidad sea determinar el campo de temperaturas en intervalos espaciales pequeños, de la misma manera que intervalos pequeños en el tiempo darán a conocer la evolución del campo de temperaturas más detalladamente.

Probablemente resulta evidente que las discretizaciones finas y los intervalos de tiempo pequeños incrementarán la cantidad de información en los análisis y con ello un aumento en los tiempos de cálculo.

Discretización de la ecuación de difusión de calor

Debido a la geometría cilíndrica del receptor, el análisis que se presenta en este trabajo resulta limitado. La discretización que se presenta a continuación se lleva a cabo con la forma de la ecuación de calor en coordenadas rectangulares, en tanto que se pudiesen haber obtenido resultados más precisos mediante la discretización de la ecuación de calor de forma cilíndrica.

Por lo tanto el modelo que se presenta, así como los resultados obtenidos, son una aproximación de los fenómenos de transferencia de calor reales y de los campos de temperatura que se van a obtener al resolver la ecuación de calor para la geometría y condiciones que se plantean. Esta aproximación tiene una deficiencia principal; la sección que se toma para el análisis por el método de diferencias finitas, no considera la curvatura propia del receptor solar.

Lo primero que se debe advertir, es que la determinación numérica del campo discreto de temperaturas se obtiene a partir de escribir la ecuación de conservación apropiada para cada punto nodal del medio cuya temperatura deba ser conocida.

La ecuación en diferencias finitas adecuada para los nodos interiores de una red nodal se infiere a partir de la ecuación

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (3.9)$$

Si se considera la segunda derivada $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, el valor de esta derivada de la figura (sección bidimensional discretizada) en el punto m, n puede ser aproximada como

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+1,n} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-1,n}}{\Delta x} \quad (3.10)$$

Mientras tanto, los gradientes de la temperatura pueden ser expresados como una función discreta de las temperaturas nodales en ambas dimensiones. Se tiene entonces:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+1,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-1,n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad (3.12)$$

Ahora estas ecuaciones pueden ser sustituidas en la en la segunda deriada

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (3.13)$$

si se procede de manera similar,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \quad (3.14)$$

Además de llevar a cabo esta discretización en el espacio, es necesario hacer una discretización del tiempo, de manera que:

$$t = p\Delta t \quad (3.15)$$

La derivada temporal tiene su aproximación en diferencias finitas expresada como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \quad (3.16)$$

En la derivada temporal en diferencias finitas, el superíndice p sirve para denotar la dependencia con respecto al tiempo de la temperatura (T). Es entonces

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

que la derivada con respecto al tiempo se expresa en términos de la diferencia de temperatura asociada con los puntos en el tiempo; es decir, la temperatura en cierto momento (p) y la temperatura del nodo cierto tiempo después (p+1).

Es así como la ecuación en diferencias finitas no solo proporcionará las temperaturas discretas en el espacialmente sino también en puntos discretos en el tiempo.

Ahora bien, en una malla uniforme en la que $\Delta x = \Delta y$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} = \frac{T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta y)^2} \quad (3.17)$$

Si la ecuación en diferencias finitas se resuelve para la temperatura nodal en un tiempo determinado p+1, la ecuación queda

$$T_{m,n}^{p+1} = Fo (T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + (1 - 4Fo) T_{m,n}^p \quad (3.18)$$

Donde Fo en una forma en diferencias finitas del número de Fourier.

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (3.19)$$

Cuando las ecuaciones en diferencias finitas con dependencia temporal se utilizan para determinar las temperaturas nodales en el momento p+1 a partir de las temperaturas en el momento p, como las que se han encontrado hasta ahora, se dice que el sistema de ecuaciones en diferencias finitas es explícito o correspondiente al método explícito.

El método explícito sin embargo, posee la característica de que no es incondicionalmente estable, pues es posible inducir oscilaciones numéricas que son físicamente imposibles. Para evitar este tipo de oscilaciones y evitar que la solución de las ecuaciones en diferencias finitas arroje este tipo de resultados, es necesario que Δt se utilice por debajo de cierto límite que dependerá de Δx y de otros parámetros del sistema. Es muy frecuente que el método explícito requiera intervalos Δt muy pequeños, lo cual implica un número muy grande de intervalos de tiempo para obtener una solución.

Para obtener una reducción en la cantidad de cálculos necesarios para obtener una solución y con ello reducir el tiempo invertido en el mismo, se emplea un esquema

de diferencias finitas que se denomina implícito. La forma implícita de las ecuaciones de diferencias finitas consiste en obtener todas las temperaturas nodales a partir de las temperaturas en $p+1$, en lugar de evaluar de obtenerlas a partir de ecuaciones expresadas en las temperaturas nodales del momento p . La forma implícita de la ecuación para un nodo interior de un sistema bidimensional es entonces:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} = \frac{T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} - 2T_{m,n}^{p+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} - 2T_{m,n}^{p+1}}{(\Delta y)^2} \quad (3.20)$$

Si se supone nuevamente que $\Delta x = \Delta y$ se obtiene

$$(1 + 4Fo) T_{m,n}^{p+1} - Fo (T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1}) = T_{m,n}^p \quad (3.21)$$

Resulta evidente que la temperatura del nodo m, n depende de las temperaturas de los nodos contiguos en un momento $p+1$; que en el momento p son desconocidas. Es por eso que para conocer las temperaturas nodales en $p+1$, las ecuaciones nodales de toda la discretización deben resolverse simultáneamente.

Se opta por el sistema de formulación implícita porque éste es incondicionalmente estable, esto significa que el método permite obtener soluciones físicamente congruentes para todos los intervalos espaciales y temporales. No obstante es indispensable señalar que para obtener una precisión adecuada en las temperaturas calculadas es necesario considerar intervalos pequeños tanto en el espacio como en el tiempo.

Tener la libertad de llevar a cabo el cálculo con los intervalos de tiempo deseados reduce sin embargo los tiempos de procesamiento.

Esta ecuación en diferencias finitas que proviene de la ecuación de difusión de calor se aplica a cualquier nodo interior que sea equidistante a sus cuatro nodos vecinos.

Método de balance de energía para determinar las ecuaciones de una discretización

Las ecuaciones en diferencias finitas pueden determinarse a partir de una aplicación de conservación de energía para el nodo. Para éste balance de energía en el

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

nodo, se hace una formulación en la que todo el flujo de calor es hacia éste. Dicha suposición es por consiguiente imposible, sin embargo es posible obtener a partir de esta suposición la forma correcta de la ecuación de diferencias finitas.

Para condiciones de estado transitorio del sistema, la ecuación apropiada es:

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_p + \dot{E}_g = \dot{E}_{alm} \quad (3.22)$$

Donde, \dot{E}_{ent} es la energía que entra al nodo, \dot{E}_p es la energía que pierde el nodo (energía entrante, según refiere la suposición (i.e. pérdidas convectivas)) \dot{E}_g es la energía que se genera dentro del nodo (i.e. una resistencia eléctrica), \dot{E}_{alm} es la energía que se almacena en el nodo y que puede manifestarse como un aumento de temperatura del nodo.

La ecuación (3.22) debe ser aplicada para cada uno de los volúmenes de control de la discretización. Cuando el sistema es bidimensional el intercambio de energía debe ser ya sea considerando los cuatro nodos contiguos (uno por cada lado del volumen de control bidimensional), dado que para evaluar finalmente la transferencia de calor del volumen de control bidimensional se hace la suposición de que la transferencia de calor ocurre exclusivamente por las caras orientadas en x o y, y/o las condiciones de convección a las que esté expuesto uno o más de sus lados.

Las ecuaciones (3.23) a (3.26) expresan la rapidez con la que se transfiere la energía por conducción de los nodos contiguos al nodo n, m:

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k (\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} \quad (3.23)$$

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k (\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} \quad (3.24)$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k (\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} \quad (3.25)$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k (\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} \quad (3.26)$$

La resta de la temperatura del nodo m, n al nodo contiguo es necesaria debido a que resulta conveniente suponer que todo el flujo de calor es hacia el nodo como

lo muestra la figura 3.11.

Para cada nodo es necesario establecer su ecuación en diferencias finitas. La temperatura resultante del nodo será la temperatura que adquiere toda la región donde se encuentra el nodo. El método de balance de energía es especialmente útil cuando las condiciones de la superficie son convectivas o cuando la temperatura es desconocida.

Se denominan nodos interiores a los que tienen nodos del mismo material contiguos a sus cuatro lados. La ecuación para estos nodos se conoce partiendo del hecho de que el flujo de calor hacia el nodo proviene de la conducción de los cuatro nodos contiguos

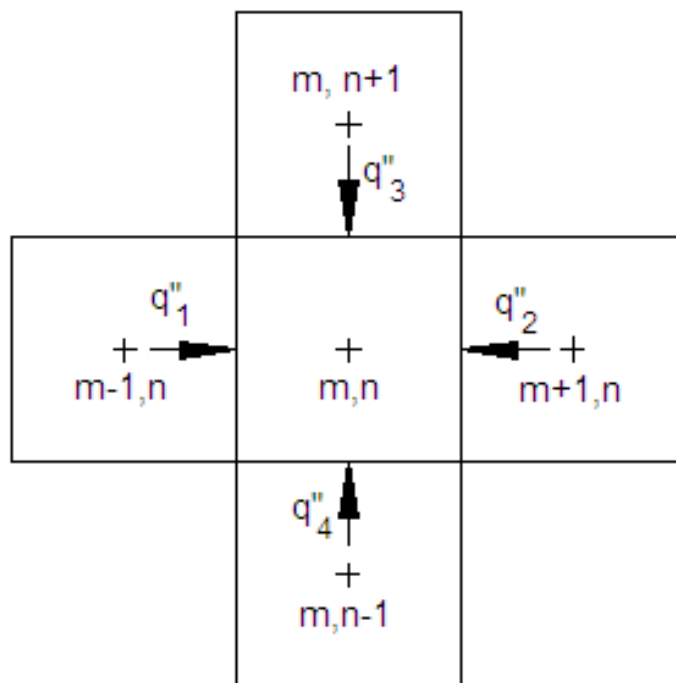


Figura 3.11. Modelo de diferencias finitas, el flujo de calor viene de los nodos contiguos.

De acuerdo al balance de energía en la ecuación (3.22) se tiene del lado derecho la energía que se almacena por el sólido en cierto intervalo de tiempo. Se tiene entonces:

$$\dot{E}_{alm} = \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.27)$$

donde ρ es la densidad, C_p es el calor específico a presión constante, V es el volúmen de control y $\frac{\partial T}{\partial t}$ es el cambio de la temperatura del material respecto al tiempo (la discretización de $\frac{\partial T}{\partial t}$ para el nodo n, m se presenta en (3.16)).

Finalmente para un nodo interno como el de la figura en el que no existe generación de energía, el balance que se debe satisfacer es:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{alm} \quad (3.28)$$

en el que cuando se supone espesor unitario, la ecuación difusión de calor que se obtiene es:

$$\begin{aligned} k(\Delta x) \frac{T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} + k(\Delta x) \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} + k(\Delta y) \frac{T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} \\ + k(\Delta y) \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} = \rho C_p (\Delta x \cdot \Delta y) \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \end{aligned} \quad (3.29)$$

si en la ecuación (3.29) se supone $\Delta x = \Delta y$, y haciendo la sustitución $1/\alpha = \rho C_p/k$ se obtiene:

$$\begin{aligned} (T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + (T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + (T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + (T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) \\ = \frac{1}{\alpha} (\Delta x)^2 \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Resistencia de contacto entre nodos de diferentes materiales.

Cuando existe una interfase entre materiales, la transferencia de calor por conducción debe llevar la consideración de que en la interfase existe una oposición natural al flujo de calor. Esto significa, en términos generales, que cuando entran en contacto dos materiales entre los que existe un gradiente de temperaturas, hay una resistencia a la transferencia de calor por conducción entre los materiales debida principalmente a un contacto deficiente entre ellos.

Como referencia, considérese el ejemplo de la figura 3.12:

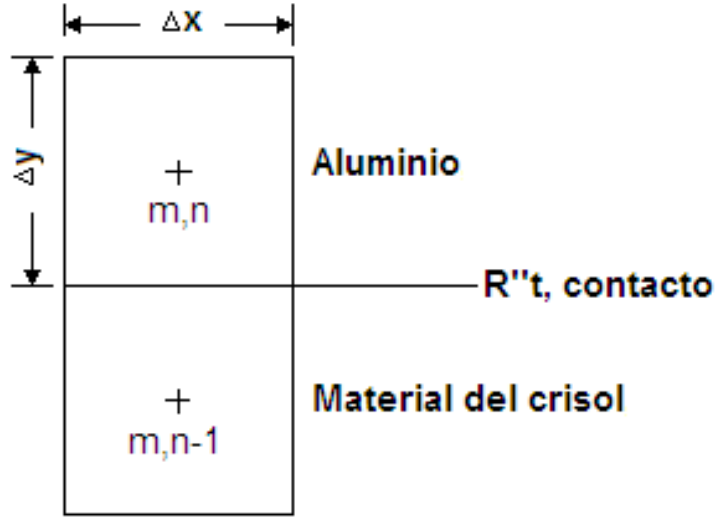


Figura 3.12. Modelo de la resistencia de contacto en diferencias finitas.

En la figura 3.12 el nodo en la parte superior es de aluminio y el de la parte inferior del material del crisol; su contacto se caracteriza por una resistencia térmica de contacto $R''_{t,C}$. Entonces la transferencia de calor del nodo $(m,n-1)$ al nodo (m, n) se expresa como

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{R_{Tot}} \quad (3.31)$$

en la que bajo la misma consideración de profundidad unitaria,

$$R_{Tot} = \frac{\Delta y/2}{k_A (\Delta x \cdot 1)} + \frac{R''_{t,C}}{(\Delta x \cdot 1)} + \frac{\Delta y/2}{k_B (\Delta x \cdot 1)} \quad (3.32)$$

Nuevamente al hacer la consideración de que $\Delta x = \Delta y$, se obtiene:

$$R_{Tot} = \frac{1}{2k_A} + \frac{R''_{t,C}}{\Delta x} + \frac{1}{2k_B} \quad (3.33)$$

El valor de $R''_{t,C}$ que se ha tomado en cuenta para el contacto entre los nodos de aluminio y los del crisol es:

$$R''_{t,C} = 2,75E - 4 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

puesto que entre ellos existe aire como fluido de contacto.

Es importante tomar en cuenta esta consideración, puesto que para el análisis de transferencia de calor por diferencias finitas, los nodos de aluminio tienen contacto en uno o dos de sus lados con los nodo del crisol. La ecuación (3.33) se toma en cuenta para cada una de las caras de los nodos donde es pertinente.

Expresión de transferencia de calor por conducción de los nodos de aislante a los nodos del crisol.

Para el caso del aislante, no es necesario utilizar un mallado fino, de manera que es necesario establecer las ecuaciones de conducción entre los nodos de mayor tamaño que corresponden al material refractario aislante, con los nodos de menor tamaño correspondientes del crisol. Obsérvese la figura 3.13:

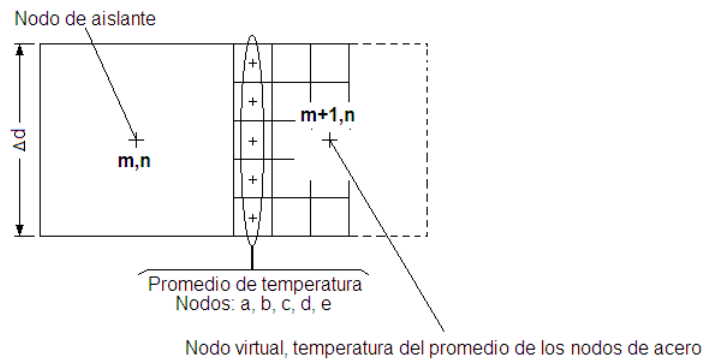


Figura 3.13. Modelo de generación del nodo virtual de tamaño grande.

Es evidente que la conducción de calor se llevará a cabo entre los nodos de mayor tamaño del lado izquierdo con los nodos de menor tamaño del lado derecho. La solución a éste planteamiento, consiste en crear un “nodo virtual” del mismo tamaño del lado derecho al que por ahora se ha designado como $(m+1, n)$ en la figura, cuya temperatura será el promedio de los nodos “a”, “b”, “c”, “d” y “e”.

Antes de escribir la expresión para la transferencia de calor, nótese que los nodos son cuadrados y cuya dimensión por lado es $\Delta d = 5\Delta x$. También recuérdese que las

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

dimensiones de los nodos pequeños correspondientes al acero inoxidable son Δy , Δx para el ancho y el largo, en las que $\Delta y = \Delta x$. La expresión para la transferencia de calor vista desde el nodo grande correspondiente a aislante resulta:

$$q = \left[\frac{T_a^{p+1} + T_b^{p+1} + T_c^{p+1} + T_d^{p+1} + T_e^{p+1}}{5} - T_{m,n}^{p+1} \right] \left[\frac{1}{R_{Tot}} \right] \quad (3.34)$$

para la que R_{Tot} es:

$$R_{Tot} = \frac{\Delta d/2}{k_R (\Delta d \cdot 1)} + \frac{\Delta x/2}{k_A (\Delta d \cdot 1)} = \frac{1}{2k_R} + \frac{1}{10k_A} \quad (3.35)$$

donde k_R y k_A , son las conductividades térmicas del material refractario y del material del crisol respectivamente.

Obsérvese que para este caso no se ha considerado una resistencia de contacto.

Por su parte, los nodos pequeños del lado derecho intercambian calor con los nodos de mayor tamaño del lado izquierdo. En la figura 3.14 se observa que se crean nuevamente otros “nodos virtuales” de igual tamaño (pequeño) del lado izquierdo, que tomarán la temperatura del nodo de mayor tamaño que corresponde al material aislante refractario.

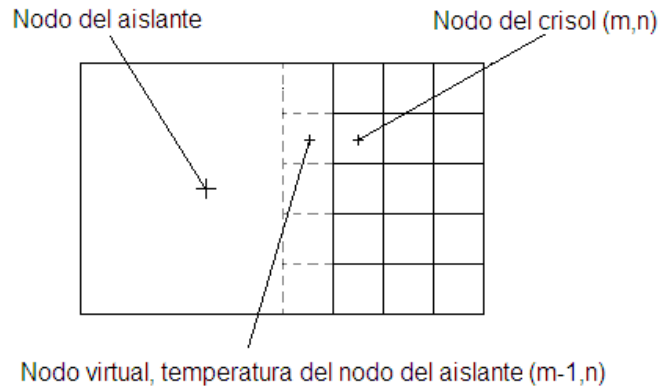


Figura 3.14. Modelo de generación de los nodos virtuales de tamaño pequeño.

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

La expresión de transferencia de calor vista desde los nodos pequeños (de acero inoxidable) considera intercambio de calor con estos “nodos virtuales” pequeños resulta:

$$q = [T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}] \left[\frac{1}{R_{Tot}} \right] \quad (3.36)$$

para la que R_{Tot} , cuando se considera $\Delta y = \Delta x$, es:

$$R_{Tot} = \frac{\Delta x/2}{k_A(\Delta y \cdot 1)} + \frac{\Delta x/2}{k_R(\Delta y \cdot 1)} = \frac{1}{2k_A} + \frac{1}{2k_R} \quad (3.37)$$

Nuevamente para este caso no se ha considerado una resistencia de contacto.

Expresión de transferencia de calor de la cara de un nodo que se encuentra sometido a convección.

Para obtener la expresión de la transferencia de calor de la cara de un nodo que se encuentra sometida convección, se emplea la ley de Newton del enfriamiento. En la figura 3.15 la cara derecha del nodo se encuentra expuesta a un fluido con temperatura ambiente T_∞ , misma que para el caso de las paredes del crisol o del aislante es menor que la temperatura superficial correspondiente T_S .

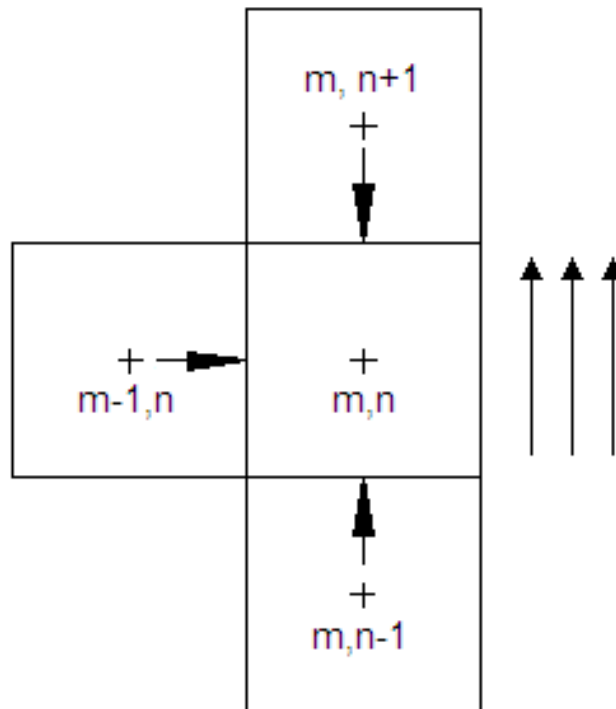


Figura 3.15. Modelo de la transferencia de calor por convección para un nodo del dominio.

La ley de Newton del enfriamiento establece que el flujo de calor por convección es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido, T_S y T_∞ respectivamente. Se tiene entonces:

$$q'' = h (T_S - T_\infty) \quad (3.38)$$

Donde h es el coeficiente de convección el cual se determina principalmente por las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y del transporte.

La ecuación en diferencias finitas que permite conocer la transferencia de calor por convección de la cara del nodo proviene de la consideración del flujo de calor en

el área que corresponda. Para la cara de un nodo en la que se considera profundidad unitaria se tiene:

$$q = h (\Delta x \cdot 1) (T_S - T_\infty) \quad (3.39)$$

3.6.1. Determinación del coeficiente de convección h .

Como se ha explicado con anterioridad, el coeficiente de convección h depende de algunos factores como la geometría de la superficie. Debido a que el análisis de transferencia de calor para el crisol es bidimensional, implica por tanto que el coeficiente de convección h se obtiene mediante:

$$\bar{h} = \frac{k \overline{Nu}_L}{L} \quad (3.40)$$

donde \overline{Nu}_L es el número de Nusselt promedio y \bar{h} es la constante convectiva de proporcionalidad promedio, mismo que es un parámetro que proporciona una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie.

El coeficiente convectivo h se determinará considerando las geometrías de placa horizontal, placa vertical e interior de la cavidad por convección libre; mismas en las que se debe establecer una constante convectiva de proporcionalidad promedio \bar{h} . La transferencia de calor por convección que aquí se ha tratado corresponde a las pérdidas de calor por convección del receptor solar.

La transferencia de calor es un fenómeno producido por la presencia de gradientes de temperatura. Los incrementos de temperatura en los fluidos ocasionan su expansión y por consiguiente una reducción en la densidad de los mismos.

La convección libre o natural se origina cuando una fuerza de cuerpo actúa sobre un fluido en el que hay gradientes de densidad. Estos gradientes de densidad son provocados por el incremento de temperatura en tal porción del fluido. La consecuencia en términos generales es una fuerza de empuje que induce corrientes en el fluido originando la propia convección libre.

El empuje que actúa sobre cierta porción de fluido se debe a la presencia combinada de un gradiente de densidad del fluido y de una fuerza de cuerpo que es proporcional a la densidad. Por lo general, la densidad de gases y líquidos al ser

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

una función de la temperatura, disminuye (debido a la expansión del fluido) con el aumento de la misma ($d\rho/dT < 0$).

Cuando el aire que circunda a las paredes calientes del crisol obtiene una mayor temperatura producto del contacto con las paredes del mismo, este se calienta, es entonces cuando disminuye su densidad y por efecto del campo gravitacional esa parcela de fluido caliente se desplaza hacia arriba logrando un efecto de “flotación” permitiendo que otra porción de fluido más frío ocupe su lugar, originando un flujo de aire. Por su parte, cuando el aire caliente que se encuentra dentro de la cavidad se calienta y por igual disminuye su densidad siendo partícipe del mismo efecto. Propiamente, cuando la diferencia de temperaturas entre el fluido que tiene contacto con la superficie caliente excede un valor crítico, las condiciones se vuelven inestables y las fuerzas de empuje son capaces de vencer a las fuerzas viscosas.

Es a este flujo de aire que al actuar como agente de transporte de calor al que se conoce como corriente convectiva y es la responsable de que en muchos sistemas exista una resistencia considerable a la transferencia de calor y que en otros existan una magnitud elevada de pérdidas de calor al ambiente. En sentido estricto, un flujo de convección libre es uno que se induce solo mediante fuerzas de flotación.

Las ecuaciones que describen la transferencia de calor por convección natural parten de los principios de conservación que están involucrados. La principal consideración, tal como se ha venido explicando, es el hecho de que las fuerzas de empuje (flotación) tienen un papel principal. Son tales fuerzas las que dan inicio al flujo de convección libre y lo mantienen mientras el gradiente de temperatura esté presente.

Por su parte la cavidad en la parte inferior del receptor funciona como una “trampa” de aire caliente que le permite restringir las pérdidas convectivas de calor en la misma zona donde se suministra la radiación solar concentrada.

Flujos externos de convección libre y flujos de convección libre restringidos por una cavidad.

Los fenómenos recién descritos son los que están involucrados en las pérdidas de calor por convección del crisol. Estas pérdidas son ocasionadas propiamente por los flujos externos al crisol y por el flujo de aire caliente que escapa de la cavidad.

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

La simulación en diferencias finitas que se lleva a cabo para determinar el campo de temperaturas del crisol, involucra esencialmente a dos mecanismos particulares de la convección libre definidos por la geometría del sistema:

- Flujos de aire externos de pared vertical
- Flujos de aire externos de placas horizontales
- Flujos de aire internos a la cavidad

De los flujos de aire externos de placas horizontales por su parte, se desprenden dos mecanismos que están involucrados con las pérdidas convectivas del crisol:

- Superficie caliente orientada hacia abajo
- Superficie caliente orientada hacia arriba

Efectos de la turbulencia.

Las capas límite en la convección libre no están restringidas a ser laminares en todos los casos. Los flujos de convección libre provienen de la inestabilidad térmica que se ha explicado. Durante el flujo, pueden originarse también inestabilidades hidrodinámicas, en las que las perturbaciones al flujo pueden verse amplificadas, lo que conduce a la transición de un flujo laminar a turbulento. La transición de un flujo laminar a uno turbulento está definido por la magnitud relativa de las fuerzas de empuje y viscosas del fluido. Esta correlación está dada en términos del número de Rayleigh, que proviene a su vez del producto de los números de Grashof y Prandtl.

$$Ra = Gr Pr = \frac{g\beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu\alpha} \quad (3.41)$$

donde:

- Ra es el número de Rayleigh
- Gr es el número de Grashof
- Pr es el número de Prandtl

- g es la aceleración gravitacional, m/s^2
- β es el coeficiente de expansión térmica volumétrica, K^{-1}
- L^3 es el cubo de la longitud característica
- ν es la viscosidad cinemática, m^2/s
- α es la difusividad térmica, m^2/s

Es importante que se defina la magnitud relativa de las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas en el flujo, dado que la transición a la turbulencia tiene un fuerte efecto en la transferencia de calor. Es por esto que las consideraciones de Ra serán adecuadas únicamente en ciertos rangos, según las condiciones geométricas.

Placa vertical.

Cuando los flujos sobre las placas verticales son laminares (como es este caso), se puede considerar la siguiente ecuación para el cálculo, ya que se puede aplicar a todo el intervalo de Ra_L mientras $Ra_L \lesssim 10^9$. Con esta ecuación se obtiene una precisión muy buena en los cálculos de ingeniería para flujos laminares:

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,670 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (3.42)$$

donde:

- \overline{Nu}_L es el número de Nusselt promedio para la placa vertical
- Ra_L es el número de Rayleigh para la longitud característica
- Pr es el número de Prandtl para el aire a temperatura ambiente

De la ecuación [3.41] se observa con facilidad que el número de Rayleigh se incrementa proporcionalmente con la diferencia de temperaturas y con la longitud característica L . Para no exceder este límite, se ha evaluado el número de Rayleigh considerando la temperaturas máximas de receptor cuando el aluminio llega a la temperatura de fusión.

Placas horizontales.

Para una superficie caliente que está orientada hacia abajo la tendencia del fluido de ascender está limitada por la propia placa, de manera que el fluido circundante que tiene contacto con la misma, se calienta, y se debe desplazar horizontalmente antes de que pueda ascender habiendo salido de los extremos de la placa; es por eso que en el caso que aquí se detalla la transferencia de calor (pérdidas) se vuelve poco efectiva. Esto es conveniente para los dispositivos donde se desean reducir las pérdidas de calor al máximo. Si los extremos de la placa se rodean a su vez por una pared vertical las pérdidas convectivas se ven reducidas en mayor magnitud, esto constituye la razón de crear una cavidad en la parte inferior del crisol.

En cambio para las superficies calientes que se orientan hacia arriba el flujo se lleva a cabo por parcelas de fluido caliente que ascienden desde la placa, en tanto que la conservación de masa dicta que este fluido sea reemplazado por fluido frío que desciende, nuevamente asciende al calentarse mediante el contacto con la placa. El proceso es simultáneo y continuo, por tanto se crea una corriente de aire para las superficies del crisol que están orientadas hacia arriba, la cual genera pérdidas convectivas que son tanto más efectivas que las de las superficies calientes orientada hacia abajo.

En razón de la reducción de las pérdidas para estas superficies, el crisol posee una tapa en la cavidad que aloja al aluminio que será fundido, la cual posee un orificio pequeño que permite el escape de una porción menor de aire caliente y de algunos gases que se desprenden del calentamiento del aluminio.

Es posible obtener una precisión mejorada al alterar la forma de la longitud característica sobre la que se basan las correlaciones. En particular, la longitud característica es definida como

$$L \equiv \frac{A_S}{P} \quad (3.43)$$

donde A_S y P son el área de la superficie y el perímetro de la placa respectivamente.

Las correlaciones que se recomiendan para el número de Nusselt promedio son [3.4]:

Superficie superior de placa caliente o superficie inferior de placa fría:

$$\overline{Nu}_L = 0,54Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \lesssim Ra_L \lesssim 10^7) \quad (3.44)$$

$$\overline{Nu}_L = 0,15Ra_L^{1/3} \quad (10^7 \lesssim Ra_L \lesssim 10^{11}) \quad (3.45)$$

Superficie inferior de placa caliente o superficie superior de placa fría:

$$\overline{Nu}_L = 0,27Ra_L^{1/4} \quad (10^5 \lesssim Ra_L \lesssim 10^{10}) \quad (3.46)$$

Al igual que en las correlaciones que permiten obtener el número de Nusselt promedio para las placas verticales, se ha evaluado el número de Rayleigh considerando la temperaturas máximas de receptor cuando el aluminio llega a la temperatura de fusión, para cuidar permanecer dentro de los límites que aquí se señalan.

Interior de una cavidad.

El hecho de desarrollar mejores correlaciones que describan el fenómeno de las pérdidas de calor en cavidades atrae el interés de los investigadores. J.F. Hinojosa y J. Cervantes de Gortari [3.6], realizaron simulaciones de la convección natural tri-dimensional en estado estable y transitorio en una cavidad abierta de forma cúbica. En este desarrollo se comprobó que las pérdidas convectivas en una cavidad son originadas por el aire caliente que escapa de la cavidad permitiendo que aire frío de los alrededores tome su espacio creando un flujo de convección natural de naturaleza tanto más compleja que los de pared plana vertical u horizontal.

En otro trabajo, J.F. Hinojosa et al. [3.7] desarrollaron resultados numéricos de la transferencia de calor por convección natural y por radiación en una cavidad bidimensional de forma cuadrada. Este estudio tiene particular importancia en el diseño térmico de los receptores para concentradores solares, como se presenta en éste caso. Los resultados que presentan J.F. Hinojosa et al. proporcionan elementos de muy alto valor, al considerar no solamente la inclinación del receptor, sino también la transferencia de calor por radiación en las paredes de la cavidad. La dinámica del aire caliente dentro de la cavidad abierta cambia con la inclinación del receptor, pero, en contraste, la radiación no tiene cambios sustanciales. Para considerar la transferencia de calor que se presenta en la cavidad, J.F. Hinojosa et al. plantean

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

números de Nusselt promedio globales para diferentes números de Rayleigh, en un rango de 10^4 hasta 10^7 , para las diferentes inclinaciones del receptor con respecto a la horizontal, como lo ejemplifica la figura 3.16.

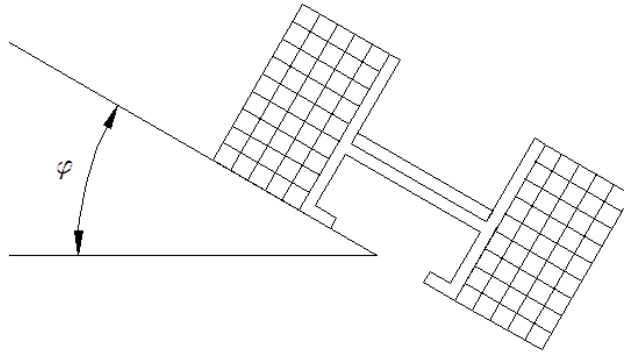


Figura 3.16. Inclinación del receptor solar de un ángulo φ con respecto a la horizontal.

Para nuestro caso, la transferencia de calor que plantean Hinojosa et al., tiene una influencia en las paredes internas del receptor, los cuales se consideran para los nodos de color gris de la figura 3.17.

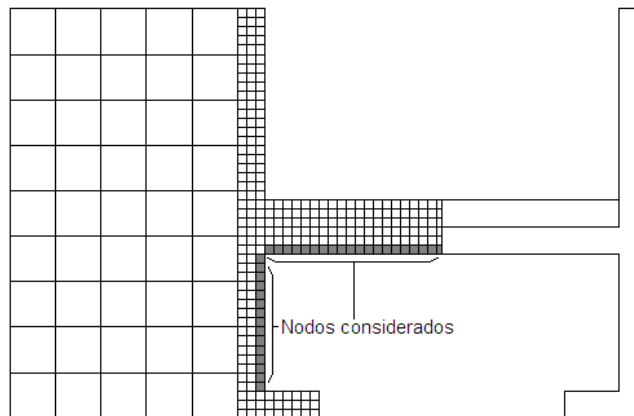


Figura 3.17. Nodos bajo la influencia de la transferencia de calor dentro de una cavidad abierta cuadrada estudiada por Hinojosa et al.

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

Las inclinaciones de las que será objeto el receptor solar para la fundición de aluminio serán de 30° y 45° , debido a que una inclinación mayor provocaría un derrame no deseado del aluminio fundido. Se considera también una inclinación de 0° para efecto de comparación de resultados. Ante esta selección de inclinaciones de los resultados que presentan Hinojosa et al. se obtienen las siguientes funciones del número de Nusselt global, los cuales se observan en las figuras 3.18, 3.19 y 3.20.

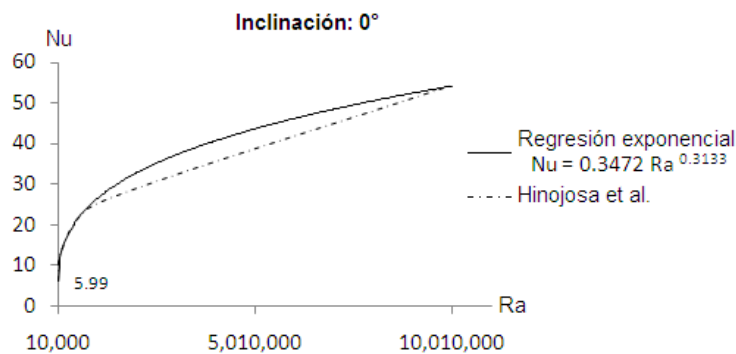


Figura 3.18. Números de Nusselt globales para una inclinación de $\varphi = 0^\circ$ con respecto la horizontal.

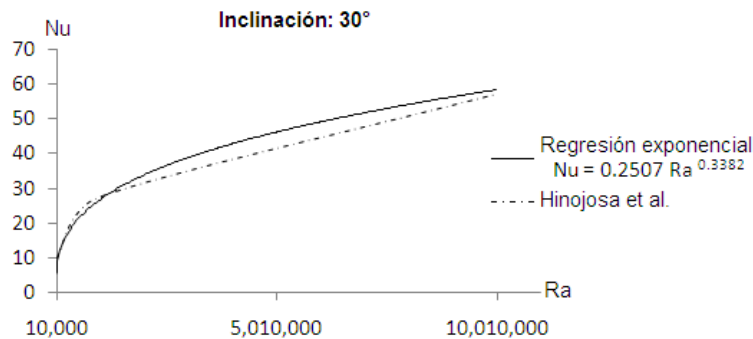


Figura 3.19. Números de Nusselt globales para una inclinación de $\varphi = 30^\circ$ con respecto la horizontal.

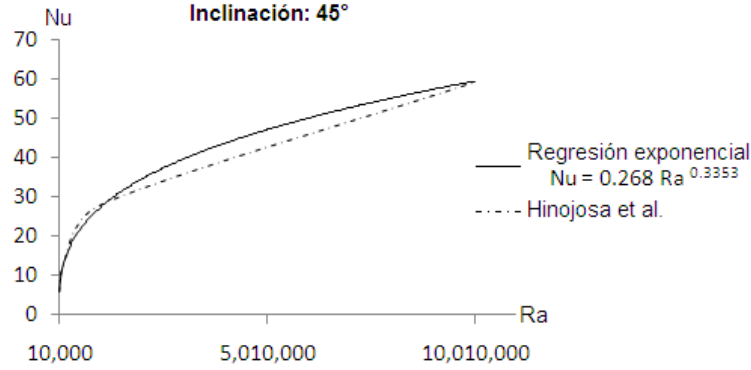


Figura 3.20. Números de Nusselt globales para una inclinación de $\varphi = 45^\circ$ con respecto a la horizontal. La línea discontinua muestra los coeficientes que proporcionan Hinojosa et al., en tanto que la línea continua muestra la regresión exponencial.

Estas tres diferentes funciones las cuales se han obtenido mediante una regresión exponencial de los coeficientes proporcionados, representan el número de Nusselt global promedio dentro de una cavidad, para los rangos del Ra especificados:

$$\overline{Nu}_L = 0,2472Ra_L^{0,3133} \quad (10^4 \lesssim Ra_L \lesssim 10^7) \quad (3.47)$$

$$\overline{Nu}_L = 0,2507Ra_L^{0,3382} \quad (10^4 \lesssim Ra_L \lesssim 10^7) \quad (3.48)$$

$$\overline{Nu}_L = 0,268Ra_L^{0,3353} \quad (10^4 \lesssim Ra_L \lesssim 10^7) \quad (3.49)$$

Distribución de las zonas de convección.

Para la sección bidimensional del crisol, las zonas convectivas quedan distribuidas como lo muestra la figura 3.21. Esta distribución coloca a los números de Biot que adopta la simulación.

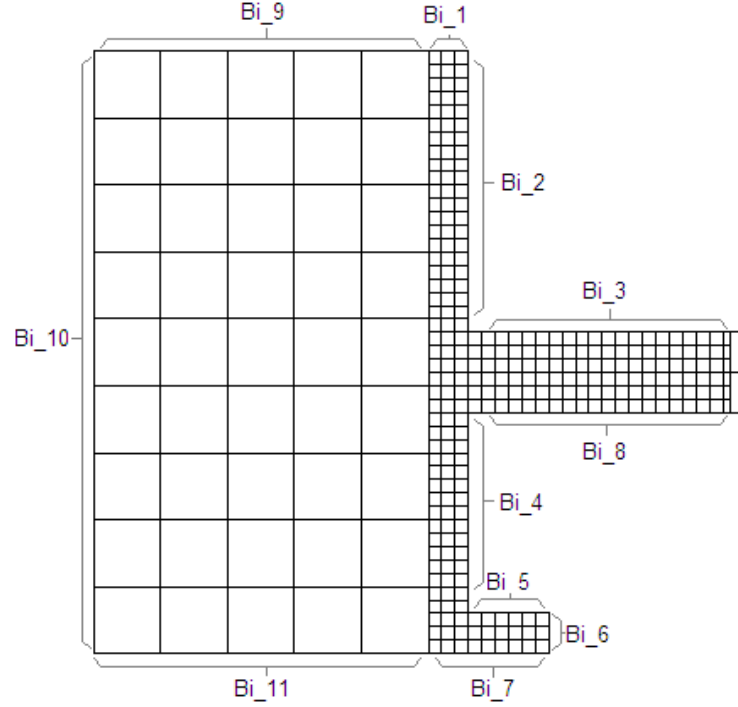


Figura 3.21. Distribución de las zonas de convección.

El número de Biot (Bi), se obtiene de la siguiente forma:

$$Bi = \frac{h \Delta x}{k} \quad (3.50)$$

el cual proporciona una medida de la caída de temperatura en el sólido en relación con la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido.

En las ecuaciones nodales, el número de Fourier (Fo_I , Fo_A y Fo_R) es un tiempo sin dimensión que, junto con el número de Biot, caracteriza los problemas de conducción transitoria. Los números de Fourier resultantes, se obtienen de la siguiente forma ($\Delta x = \Delta y$):

$$Fo_I = \frac{\alpha_I \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (3.51)$$

donde α_I es la difusividad térmica del material del crisol; misma que se obtiene de las propiedades termofísicas de éste, y que se define como sigue:

$$\alpha_I = \frac{k_I}{\rho_I C_{pI}} \quad (3.52)$$

donde:

- k_I es la conductividad térmica del material del crisol, $W m^{-1} K^{-1}$
- ρ_I es la densidad del material del crisol, $kg m^{-3}$
- C_{pI} es el calor específico a presión constante, $J kg^{-1} K^{-1}$

$$F_{oA} = \frac{\alpha_{Al} \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (3.53)$$

donde α_{Al} es la difusividad térmica del aluminio; misma que se obtiene de las propiedades termofísicas de éste, y que se define como sigue:

$$\alpha_{Al} = \frac{k_{Al}}{\rho_{Al} C_{pAl}} \quad (3.54)$$

donde:

- k_{Al} es la conductividad térmica del aluminio, $W m^{-1} K^{-1}$
- ρ_{Al} es la densidad del aluminio, $kg m^{-3}$
- C_{pAl} es el calor específico a presión constante del aluminio, $J kg^{-1} K^{-1}$

$$F_{oR} = \frac{\alpha_R \Delta t}{(\Delta d)^2} \quad (3.55)$$

donde α_R es la difusividad térmica del material aislante térmico; misma que se obtiene de las propiedades termofísicas de éste, y que se define como sigue:

$$\alpha_R = \frac{k_R}{\rho_R C_{pR}} \quad (3.56)$$

donde:

- k_R es la conductividad térmica del material aislante térmico, $W m^{-1} K^{-1}$
- ρ_R es la densidad del material aislante térmico, $kg m^{-3}$
- C_{pR} es el calor específico a presión constante del material aislante térmico, $J kg^{-1} K^{-1}$

Los parámetros geométricos Δx , Δy , Δd y el parámetro temporal Δt para el crisol, aluminio y aislante térmico se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Parámetros geométricos y de tiempo para el receptor solar				
	Δx [m]	Δy [m]	Δd [m]	Δt [s]
Crisol	0.001667	0.001667	0.00833	1
Aluminio	0.001667	0.001667	0.00833	1
Aislante	0.001667	0.001667	0.00833	1

Solución de las ecuaciones de diferencias finitas

Con este modelo se han obtenido las ecuaciones en diferencias finitas para cada nodo en el sistema. Dando por consiguiente un sistema de 318 ecuaciones, el cual está representado por medio de la siguiente ecuación matricial:

$$[T(m, n)]^{t+1} = [A(m, n)^{-1}]^{t+1} \cdot [C(m, n)]^t \quad (3.57)$$

Donde $[T(m, n)]^{t+1}$ es la temperatura nodal en el tiempo $t+1$, $[A(m, n)^{-1}]^{t+1}$ es la matriz de coeficientes en el tiempo $t+1$ y $[C(m, n)]^t$ es la matriz de los coeficientes de las condiciones iniciales. La solución del sistema se ha resuelto por medio del método de matriz inversa, para lo cual se ha desarrollado un programa en Matlab (M.R.). Este programa, consiste en lo siguiente:

El programa se inicia con el comando “Fusal6”, comando que es el mismo nombre del programa. Posteriormente, el programa solicita los parámetros de la simulación, mismos que darán lugar a las condiciones físicas así como el material que tiene lugar a selección del usuario. Los parámetros se solicitan como sigue:

- Ingreso de la distancia del receptor al punto focal del concentrador sobre el eje focal. Este parámetro permite controlar la magnitud de concentración solar que incide en el receptor solar.
- Ingreso del intervalo de tiempo en segundos. Este parámetro establece el tiempo que transcurre entre el cálculo de las temperaturas en el tiempo t y el tiempo $t+1$; mientras menor sea este interval, mayor precisión existe en los resultados. Para las simulaciones de este trabajo se tomaron solamente incrementos de 1 s, como se señaló en la tabla 3.3.

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

- Ingreso del tiempo máximo para alcanzar la temperatura de fusión (en minutos). Este parámetro limita el tiempo de cálculo hasta la cantidad deseada, en caso de que no se alcance la temperatura efectiva de fusión del aluminio.
- Ingreso del material del crisol en el receptor. Esta opción entrada en el programa permite seleccionar el material que será objeto del análisis. El programa permite seleccionar entre acero al carbono 1018, acero inoxidable 316, únicamente material refractario (también material del aislante) y el material especial INCONEL 625LCF (M.R.).
- Ingreso del intervalo de confianza. Es un porcentaje que define el usuario para la simulación que establece la proximidad de la temperatura de los nodos de aluminio a la temperatura de fusión; es decir, es una cantidad que determina en qué medida la muestra de aluminio obtiene un calentamiento efectivo. Este intervalo debe ser alto (95 % a 100 %). Para las simulaciones de este trabajo se definió en todos los casos 97 %.
- Ingreso del ángulo de inclinación del receptor. El programa, en base a los datos proporcionados por Hinojosa et al., permite seleccionar entre las inclinaciones de 0, 15, 30, 45 y 60 grados.

El programa “Fusal6”, tiene en previamente ingresadas las magnitudes de concentración solar, las funciones de Hinojosa et al., las propiedades termofísicas de los diferentes materiales. así como las dimensiones geométricas del receptor. Después de breves segundos, el programa exporta los campos de temperatura de la sección bidimensional receptor en un archivo con el nombre “Temperaturas.csv” que se puede abrir con EXCEL (M.R.) de Microsoft (M.R.), el número de iteraciones en que se terminó el cálculo (dependiente del tamaño del intervalo Δt) y el tiempo total en minutos en que se obtuvo el calentamiento efectivo de la muestra de aluminio.

Referencias.

[3.1] Rosa María Gonzáles García, Tesis de licenciatura, Diseño mecánico del disco parabólico de un concentrador solar y caracterización térmica del receptor; en proceso.

[3.2] Hugo Andrés Morales Ríos, Tesis de licenciatura, Diseño y manufactura de la estructura acimutal para un concentrador solar de disco parabólico; en proceso.

3. FUNDICIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR

[3.3] Armando Rojas-Morín; ANÁLISIS TEÓRICO DE TRAZADO DE RAYOS PARA EL DISTAL I.

[3.4] Wendelin, T; SOLTRACE software package, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden CO; EUA.

[3.5] Frank P. Incropera, David P. DeWitt; Fundamentos de transferencia de calor, 4a Ed.; ISBN - 970 - 17 - 0170 - 4; Prentice Hall, México, 1999.

[3.6] J. F. Hinojosa, J. Cervantes-de Gortari; Numerical simulation of steady-state and transient natural convection in an isothermal open cubic cavity; Heat Mass Transfer 46 (2010) pp. 595-606.

[3.7] J.F. Hinojosa, R.E. Cabanillas, G. Alvarez, C.E. Estrada; Nusselt number for the natural convection and surface thermal radiation in a square tilted open cavity; International Communications in Heat and Mass Transfer 32 (2005) pp. 1184-1192.

4

SELECCIÓN DE LOS MATERIALES PARA EL CRISOL

En el presente capítulo se presenta una preselección de los materiales que cumplen con ciertas características necesarias para llevar a cabo la fundición de aluminio. El objetivo del material es sencillo; debe permitir la construcción del crisol en el que sea contenido aluminio para fundir.

En primera instancia, el material de construcción del crisol debe tener ciertas características mecánicas las cuales permitan su fabricación en las dimensiones especificadas y la adaptación de los instrumentos de medición tales como termopares y otros elementos de sujeción y manipulación para vaciado.

A continuación se enuncian las características deseadas en el material de construcción:

- Integridad del crisol en el periodo de calentamiento y a la temperatura de fusión del aluminio.
- Que ofrezca la posibilidad de la fabricación del crisol a las dimensiones requeridas, y que permita, de igual forma, la adaptación de los instrumentos de medición de la temperatura así como la manipulación para el vaciado del material fundido.
- Estabilidad química del material, pues no debe representar un contaminante del aluminio en los periodos de calentamiento y fusión.

- Estabilidad física del material ante cierto número de ciclos de calentamiento y fusión de aluminio, permitiendo que no se requiera un crisol por cada “carga” de aluminio para fundir. Disponibilidad en el mercado.

Ante las características recién descritas, se planten 3 diferentes materiales metálicos:

- Acero al carbono 1018
- Acero inoxidable 316
- INCONEL 625LCF

Como otra opción, se considera un material cerámico más se considera para la fusión del aluminio, en tanto que los materiales cerámicos son ampliamente usados en la industria debido a su excelente estabilidad química y su capacidad de conservar su integridad a elevadas temperaturas:

- Arcilla refractaria

Es necesario considerar las características termofísicas particulares a cada material con la finalidad de que la simulación proporcione los resultados de campo de temperaturas y tiempo en el que el receptor obtiene la temperatura de fusión del aluminio con la mayor precisión posible.

4.1. Material del crisol: Acero al carbono 1018

El acero al carbono 1018 se toma en cuenta como una de las opciones para ser empleado en el crisol debido a la estabilidad que presenta, pero principalmente por sus propiedades mecánicas.

El Instituto Americano del Hierro y del Acero (AISI) define al acero al carbono de la siguiente forma:

Se define como acero al carbono, cuando no se especifica ni se requiere ningún contenido mínimo para el cromo, cobalto, niobio, molibdeno, níquel, titanio, tungsteno, vanadio o circonio, o cualquier otro elemento que se agregará para obtener un efecto de aleación deseado; además, cuando el mínimo especificado del cobre no excede el 0.40 por ciento; o cuando el contenido máximo especificado para los elementos de siguientes no excede los porcentajes a continuación: manganeso 1.65, silicio 0.60, cobre 0.60.

Las variaciones en los contenidos de carbono tienen el efecto más grande para las características mecánicas, dado que con el aumento del contenido de carbono se consigue para aumentar dureza y resistencia mecánica de los aceros.

Clasificación de los aceros al carbono.

Como tal, los aceros al carbono se categorizan según su contenido de carbono. Hablando en términos generales, los aceros al carbono contienen elementos aleantes totales de hasta 2% y se pueden subdividir en los aceros con poco carbono, aceros del mediano carbono, aceros de alto carbono, y los aceros del ultra-alto carbono. Como grupo, los aceros al carbono resultan ser el tipo de acero más empleado [4.1].

Propiedades termofísicas del acero al carbono 1018.

La tabla 4.1 muestra las propiedades termofísicas del acero AISI 1018 [4.2]; en ésta se puede observar las propiedades necesarias consideradas para el acero al carbono 1018, mismas que son variantes en función de la temperatura.

Tabla 4.1. Propiedades termofísicas del acero al carbono 1018.			
Temperatura [K]	k [W/mK]	Cp [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
300	60.5	447	7854
400	56.7	487	7854
600	48	559	7854
800	39.2	685	7854
1000	30	1169	7854

Composición química del acero al carbono 1018.

La composición química del acero al carbono 1018 se presenta en la tabla 4.2.

Denominación	C	Mn	P máx.	S máx.
1018	0.15 - 0.2	0.6 - 0.9	0.04	0.05

Aplicaciones del acero al carbono 1018.

El acero al carbono 1018 está clasificado dentro de los aceros de bajo contenido de carbono, pues estos van contienen solamente hasta 0.30%. Cuando estos tipos de acero, se emplean en las placas y las secciones estructurales de acero roladas, el contenido de carbono se puede aumentar a aproximadamente 0.30%, con una cantidad de manganeso más alto hasta 1.5%. Estos últimos materiales se pueden utilizar para las forjas, tubos, y platos de calentadores y calderas.

Por su parte, el acero al carbono 1018 tiene un punto de fusión de 1810 K; como se puede observar en el diagrama de fase hierro-carbono (figura 4.1) al localizar un 0.15-0.20% de contenido de carbono.

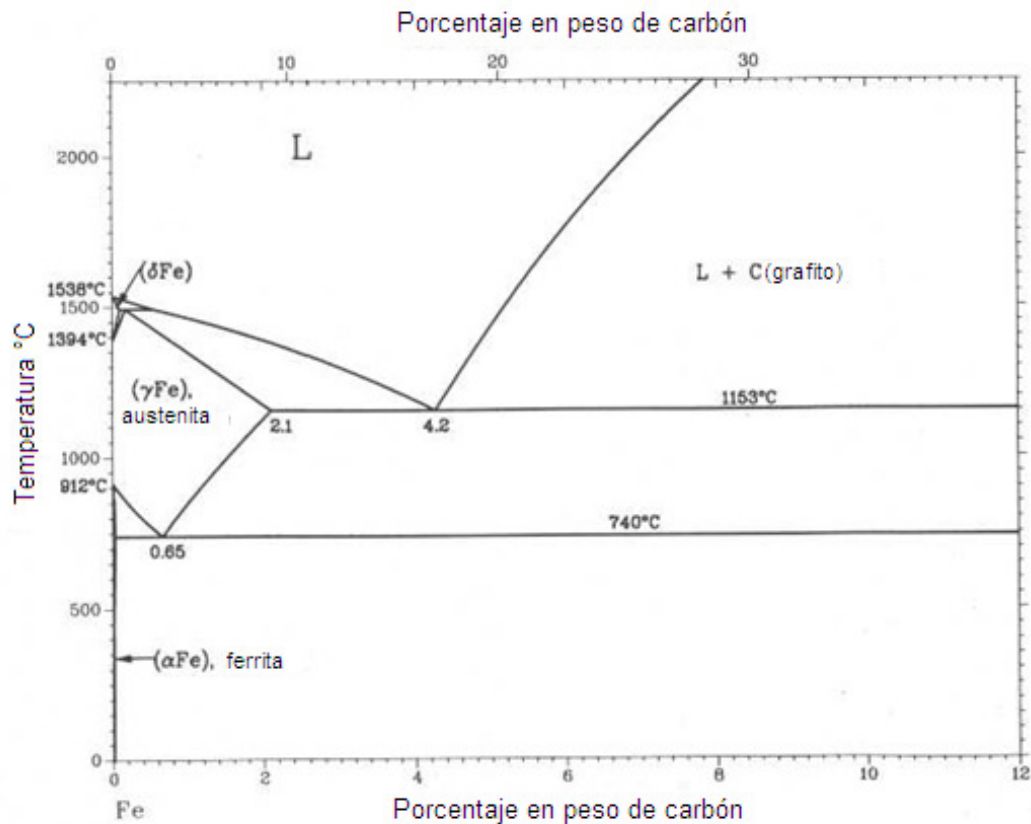


Figura 4.1. Diagrama de fase hierro-carbono.

4.2. Material del crisol: Acero inoxidable 316

Los aceros inoxidable son una clase de aceros de alto contenido de cromo y que son ampliamente utilizados para su resistencia a la corrosión en ambientes acuosos y para el servicio a altas temperaturas; son estas las propiedades que sugieren utilizar acero inoxidable como material de construcción del crisol. Los aceros inoxidable son distinguidos de otros aceros por su notable resistencia a la corrosión y a la oxidación creada por las adiciones del cromo. El cromo le brinda pasividad a las aleaciones ferrosas cuando está presente en cantidades de más de 11 %, particularmente si las condiciones son fuertemente oxidantes. Por lo tanto, los aceros con contenidos de cromo de 10 o 12 % o mayor contenido de cromo se definen a veces como aceros

inoxidables.

Pocos aceros inoxidables contienen más de 30 % de cromo o menos del 50 % de hierro. Alcanzan sus características inoxidables con la formación de una película superficial de óxido rico en cromo que no se aprecia a simple vista. Este óxido se forma y se regenera en presencia de oxígeno. Otros elementos agregados para mejorar características particulares incluyen níquel, molibdeno, cobre, titanio, aluminio, silicio, niobio, nitrógeno, azufre, y selenio. El carbono está normalmente presente en cantidades que van desde menos de 0.03 % en peso hasta 1.0 % en ciertos aceros inoxidables martensíticos.

La selección de aceros inoxidables se basa en su resistencia a la corrosión, características de la fabricación, disponibilidad, características mecánicas en gamas de temperaturas específicas y precio del acero. Sin embargo, la resistencia a la corrosión y las características mecánicas son generalmente los factores más importantes.

A lo largo de los años, los aceros inoxidables han ganado interés y se han establecido fuertemente como la materia prima para los utensilios de cocina, cuchillería en general, platos y cubiertos, elementos arquitectónico-decorativos, equipo para el uso en fábricas de productos químicos, lechería y plantas de transformación alimenticia, instrumentos de aplicación quirúrgica, la industria petrolera y plantas petroquímicas, plantas de producción textil, industrias farmacéuticas y del transporte. Algunos de estos usos implican la exposición a las temperaturas elevadas o criogénicas; para las que los aceros inoxidables austeníticos están principalmente indicados.

Clasificación de aceros inoxidables.

Los aceros inoxidables se dividen en cinco grupos principales: aceros inoxidables martensíticos, aceros inoxidables ferríticos, aceros inoxidables austeníticos, aceros inoxidables (ferrítico-austeníticos) de dos fases, y aceros inoxidables endurecibles por precipitación.

Los aceros inoxidables martensíticos son esencialmente las aleaciones de cromo y carbono que poseen una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo. Son ferromagnéticos, endurecibles por tratamientos térmicos, y son generalmente resistentes a la corrosión en forma moderada. El contenido de cromo está generalmente

4. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES PARA EL CRISOL

contenido en proporciones de 10.5 % a 18 %, y el contenido de carbono puede exceder de 1.2 %. El contenido del cromo y de carbono se balancea para asegurar una estructura martensítica al enfriar. En ocasiones los carburos pueden estar presentes para aumentar resistencia de desgaste o mantener los filos, como en el caso de los instrumentos que así lo requieran y en cuchillería. Los elementos tales como niobio, silicio, tungsteno, y vanadio se pueden agregar para modificar la respuesta al temple. Pequeñas cantidades de níquel pueden ser agregadas para mejorar resistencia a la corrosión en algunos medios y para mejorar dureza. Se agrega azufre o selenio a algunos aceros de esta clasificación para proveerles de mejores características para los procesos de maquinado.

Los aceros inoxidable ferríticos son esencialmente las aleaciones que contienen cromo y cuyas estructuras cristalinas corresponden a la cúbica centrada en el cuerpo. El contenido de cromo está generalmente en las proporciones que van desde 10.5 % a 30 %. Algunos aceros de esta clasificación pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio, y niobio para conferir características particulares. Se agrega azufre o selenio, como en el caso de los austeníticos, para mejorar las características para los procesos de manufactura. Las aleaciones ferríticas son ferromagnéticas. Su resistencia mecánica a alta temperatura es relativamente pobre comparada con los austeníticos.

Los aceros inoxidable austeníticos tienen una estructura cúbica centrada en la cara (FCC). Esta estructura se logra con el uso elementos tales como níquel, manganeso, y nitrógeno. Estos aceros son en su mayoría no magnéticos en la condición recocida y se pueden endurecer solamente por trabajo en frío. Poseen generalmente características criogénicas excelentes y buena resistencia mecánica a alta temperatura. El contenido del cromo varía generalmente a partir de 16 % a 26 %; níquel, hasta proporciones cercanas al 35 %; y manganeso, hasta 15 %. Los aceros de la serie 2xx contienen el nitrógeno, manganeso 4 % a 15.5 %, y Ni hasta 7 %. Los tipos 3xx contienen cantidades más grandes de níquel y de manganeso hasta 2 %. Molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio, y niobio se pueden agregar para conferir ciertas características tales como resistencia de las picaduras o resistencia de oxidación. También se agrega azufre o selenio para mejorar las características ante los procesos de manufactura. Es en esta clasificación donde el acero inoxidable 316 encuentra lugar; siendo elegido principalmente por sus propiedades mecánicas favorables a alta temperatura y su disponibilidad en el mercado.

Los aceros inoxidable a dos caras tienen una estructura mezclada de la ferrita

de estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo y de austenita FCC. La cantidad exacta de cada fase es una función de la composición y tratamiento térmico. La mayoría de las aleaciones se diseñan para contener cantidades iguales de cada fase. Los elementos aleantes principales son cromo y níquel, pero se agrega nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio, y tungsteno manteniendo el equilibrio estructural y brindarles con ello ciertas características de resistencia a la corrosión. La resistencia a la corrosión de aceros inoxidable de dos fases (o duplex) es como la de aceros inoxidables austeníticos con un contenido de aleantes similar. La dureza de aceros inoxidables de dos fases está entre la de aceros inoxidables austeníticos y ferríticos. La intención principal de estos aceros es conferirles las propiedades de ambos tipos de aceros que les componen.

Los aceros inoxidables endurecibles por precipitación son aleaciones de cromo y níquel que contienen elementos que son capaces de precipitarse para endurecer la aleación tales como cobre, aluminio, o titanio. Los aceros inoxidables de endurecimiento por precipitación pueden ser austeníticos o martensíticos. Los que son austeníticos son con frecuencia transformables a la martensita mediante tratamientos térmicos, a veces con un tratamiento bajo cero. En la mayoría de los casos, estos aceros inoxidables logran alta resistencia y dureza mediante la precipitación.

Composición química del acero inoxidable 316.

El acero inoxidable 316 tiene la composición que se muestra en la tabla 4.3 [4.2]:

Tabla 4.3. Composición del acero inoxidable 316 (% en peso).								
Denominación	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo
316	0.08	2	1	16 - 18	10 - 14	0.045	0.03	2 - 3

Propiedades termofísicas del acero inoxidable 316.

La tabla 4.4 presenta las propiedades termofísicas que presenta el acero inoxidable 316 a diferentes temperaturas.

Temperatura [K]	k [W/mK]	Cp [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
300	13.4	468	8238
400	15.2	504	8238
600	18.3	550	8238
800	21.3	576	8238
1000	24.2	602	8238

Aplicaciones de los aceros inoxidables a temperaturas elevadas.

Muchos aceros inoxidables -particularmente los tipos austeníticos 304, 309, 310, 316, 321, y 347 y ciertos tipos de acero inoxidables son objetos de endurecimiento por precipitación; tales se utilizan extensivamente para aplicaciones que involucran temperaturas elevadas tales como equipo de proceso químico, intercambiadores de calor de alta temperatura, y tubos de vapor sobrecalentado para las calderas de energía.

Los aceros inoxidables se utilizan también para fabricar contenedores de líquidos corrosivos; así como diferentes elementos constituyentes como alambres, tornillería, elementos estructurales, barras de secciones varias, hojas para embutidos, platos primarios para elementos mecánicos, etc. Particularmente, el acero inoxidable tipo 316 se utiliza para los reactores, columnas de fraccionamiento e instalación de tubos.

Sin embargo, el servicio prolongado a temperatura elevada puede dar lugar a fragilizar los aceros inoxidables o a la sensibilización, que degrada la capacidad del material de soportar la corrosión, particularmente en medios ácidos. Muy a menudo, tal degradación es causada por la precipitación de fases secundarias tales como carburos. Esta precipitación depende del tiempo y la temperatura; tiempos más prolongados a temperatura elevada y temperaturas más altas promueven una precipitación más extensa [4.1].

4.3. Material del crisol: Inconel 625LCF.

La composición química y la microestructura de la aleación 625LCF, es controlada en todo el proceso de producción. La aleación 625LCF se funde y se procesa especialmente para proporcionar resistencia excepcional a la fatiga térmica y mecánica. Ofrece la misma resistencia a la corrosión que la aleación 625 dada a conocer por la marina, el sector aeroespacial, e industrias del automóvil. Los productos de la aleación 625LCF ofrecen un alto nivel de funcionamiento para los usos críticos que requieren resistencia máxima a la corrosión junto con características mecánicas óptimas.

La aleación se prepara al vacío en hornos de inducción para obtener total control de su composición. El carbono, el silicio, y el nitrógeno se limitan a proporciones bajas. Este procedimiento conjuntamente con los tratamientos térmicos y mecánicos rigurosos produce una microestructura que da lugar a una enorme resistencia a la fatiga.

Los mismos factores que intervienen en la producción de la aleación 625LCF y que realzan la resistencia a la fatiga mecánica, también mejoran la resistencia a la fatiga térmica. La aleación experimenta una formación microestructural durante la exposición prolongada a un tratamiento térmico con temperatura elevada. Sin embargo, tal exposición aumenta la resistencia de la aleación; pero disminuye la ductilidad característica de la aleación.

La aleación 625LCF de INCONEL tiene igual por igual excelente resistencia a la corrosión como la aleación 625 de INCONEL. En ambientes ligeramente corrosivos tales como la atmósfera, exposición a la humedad de agua dulce y de mar, ambientes salinos y entornos alcalinos, la aleación es virtualmente inafectada. En ambientes más severos, la combinación de níquel y cromo proporciona resistencia a los productos químicos y a las atmósferas oxidantes [4.3].

Composición química de la aleación 625LCF de INCONEL.

La aleación 625LCF de INCONEL tiene la composición que se muestra en la tabla 4.5 [4.4]:

4. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES PARA EL CRISOL

Tabla 4.5 Composición química de la aleación 625LCF de INCONEL (% en peso)

Ni	Cr	Mo	Ni	Fe	C	Si	N	Mn	S	Al	Ti	P	Co
58	20 - 23	8 - 10	3.15 - 4.15	5	0.03	0.15	0.02	0.5	0.015	0.4	0.4	0.015	1

Propiedades termofísicas de la aleación 625LCF de INCONEL.

La tabla 4.6 presenta las propiedades termofísicas de la aleación 625LCF de INCONEL a diferentes temperaturas. A esta tabla se han agregado una columna a la derecha de cada una de las columnas de conductividad térmica y capacidad calorífica; éstas ostentan la leyenda “regresión lineal”. Debido a que el fabricante proporciona estas propiedades a 700 °C, fue necesario obtener funciones para estas dos propiedades a fin de poder obtener una aproximación de las mismas a temperaturas más elevadas. Las figuras 4.2 y 4.3 presentan las gráficas de los datos que proporciona el fabricante, así como de la función obtenida y los datos que de ella se obtienen para temperaturas mayores a 700 °C.

Tabla 4.6. Propiedades termofísicas de la aleación 625LCF de INCONEL

Temperatura	k	k (reg. lineal)	Cp	Cp (reg. lineal)	ρ
[K]	[W/mK]	[W/mK]	[J/kgK]	[J/kgK]	[kg/m ³]
293	9.7	9.7336	410	409.4503	8440
373	11	10.9176	429	429.2183	8440
473	12.4	12.3976	454	453.9283	8440
573	13.8	13.8776	479	478.6383	8440
673	15.3	15.3576	502	503.3483	8440
773	16.9	16.8376	528	528.0583	8440
873	18.3	18.3176	553	552.7683	8440
973	19.8	19.7976	578	577.4783	8440
1073		21.2776		602.1883	8440
1173		22.7576		626.8983	8440
1273		24.2376		651.6083	8440
1373		25.7176		676.3183	8440

4. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES PARA EL CRISOL

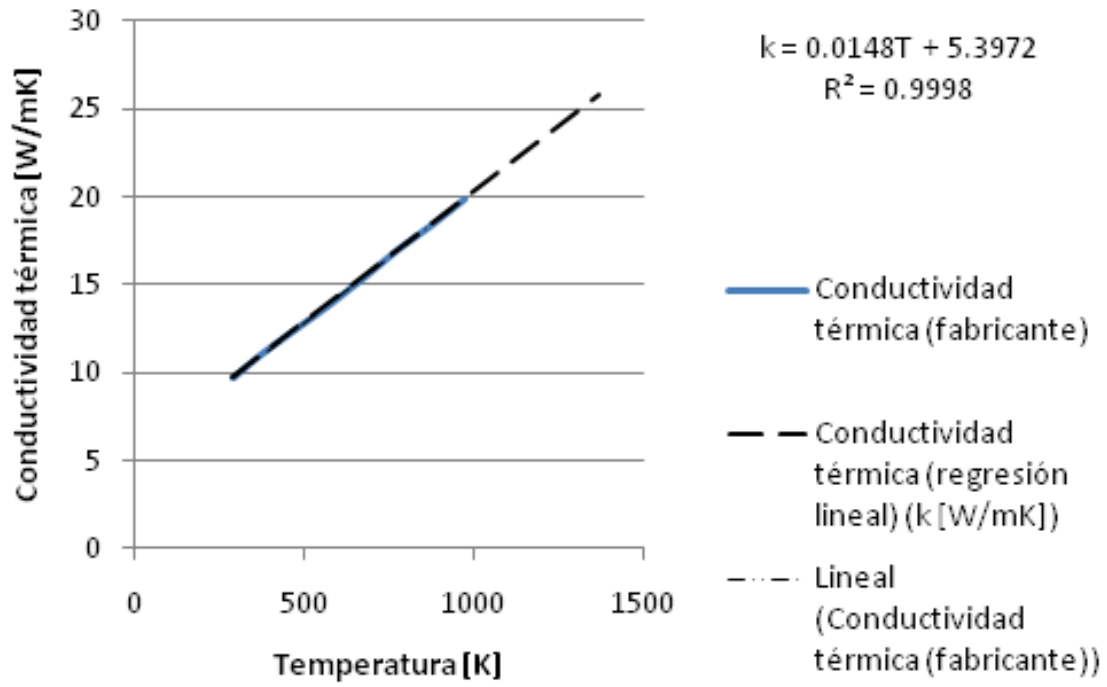


Figura 4.2. Curvas de datos correspondientes a la conductividad térmica para la aleación 625LCF de INCONEL.

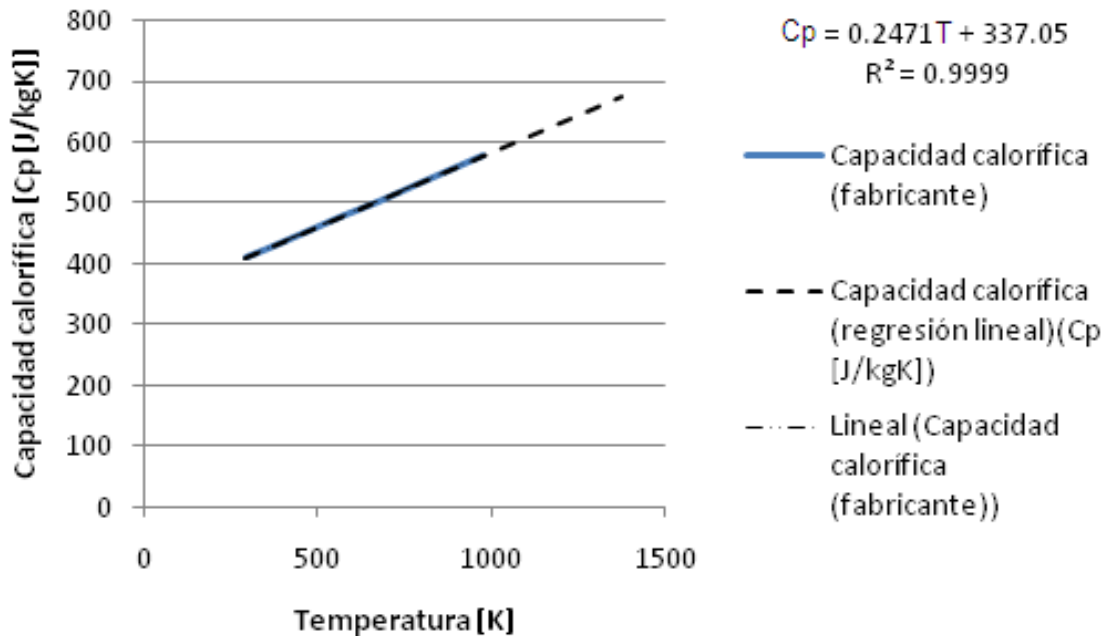


Figura 4.3. Curvas de datos correspondientes a la capacidad calorífica para la aleación 625LCF de INCONEL.

Aplicación de la aleación 625LCF de INCONEL.

La aleación ofrece características óptimas para ser usado en aplicaciones mecánicas demandantes como componentes de aviones, elementos industriales, tubería para procesos de alta temperatura en ambientes corrosivos, sector del transporte, y otros usos que implican resistencia a fatiga mecánica, térmica o combinación de ambas.

4.4. Material del crisol: Arcilla refractaria.

La importancia de considerar que el material cerámico constituya la totalidad del receptor solar (crisol y aislante) reside en que presenta propiedades mecánicas y

termofísicas muy diferentes a las de los metales.

Un material cerámico es un compuesto inorgánico que consiste en un metal (o semimetal) y uno o más no metales. La propia palabra cerámica proviene del griego *keramos*, que significa arcilla de vasijas.

Las propiedades mecánicas generales que hacen a los materiales cerámicos útiles para los propósitos de ingeniería son la alta dureza, características buenas como aislamiento térmico y eléctrico, estabilidad química y temperaturas de fusión elevadas. También son frágiles, además de que es común enunciar que virtualmente no poseen ductilidad; factor que causa problemas tanto en su procesamiento como en su desempeño.

La importancia tecnológica y comercial de los materiales cerámicos se ve demostrada por la amplia variedad de productos y aplicaciones que se basan en esa clase de materiales. A continuación se presenta una breve lista con ejemplos de productos cerámicos y sus aplicaciones:

- Productos de arcilla para la construcción, tales como ladrillos, tubos de arcilla y mosaicos constitutivos y ornamentales para la construcción.
- Cerámicos refractarios, capaces de utilizarse en aplicaciones de alta temperatura tales como muros de hornos, crisoles y moldes; esta es la clasificación que incluye a la arcilla refractaria y cuyas propiedades permiten considerarla para la construcción del receptor solar.
- Cemento para concreto, se emplea para la construcción y carreteras. Aunque el concreto es propiamente un material compuesto, estos componentes son materiales cerámicos.
- Vidrio, utilizado en botellas, anteojos, lentes, cubiertas para ventanas y lámparas en general.
- Fibras de vidrio, para lana aislante térmica, plásticos reforzados y líneas de comunicación de fibras ópticas. Productos de línea blanca, incluyen vajillas, cerámica de gres, porcelana china y fina, artículos de mesa; todos basados en arcilla y otros cerámicos.

- Abrasivos, tales como el óxido de aluminio y el carburo de silicio.
- Herramientas para cortar materiales, que incluyen carburo de tungsteno, óxido de aluminio y nitruro de boro cúbico.
- Aislantes cerámicos, que se emplean en aplicaciones tales como componentes de transmisión eléctrica, encendedores y sustratos de chips para microelectrónica.
- Cerámicos magnéticos, por ejemplo en memorias de computadora.
- Combustibles nucleares, con base en óxido de uranio.
- Biocerámicas, incluyen materiales que se usan para dientes y huesos artificiales.

Sin embargo, los materiales cerámicos se agrupan en tres tipos básicos:

- Cerámicos tradicionales: silicatos que se emplean en productos de arcilla tales como vajillas y ladrillos, abrasivos comunes y cemento.
- Nuevos cerámicos: creados recientemente con materiales que no son silicatos, tales como óxidos y carburos, y que por lo general poseen propiedades mecánicas que los hacen superiores e inclusive únicos si se les compara con los cerámicos tradicionales.
- Vidrios: cuya base principal es sílice y que se distinguen de otros cerámicos por su estructura no cristalina.

Propiedades mecánicas de los materiales cerámicos.

Los materiales cerámicos son rígidos y frágiles, muestran un comportamiento esfuerzo-deformación caracterizado como perfectamente elástico.

Debido a su enlace atómico, la resistencia de los materiales cerámicos debiera ser más alta que la de los metales. Los tipos de enlace covalente e iónico son más fuertes que el metálico. No obstante, el enlace metálico tiene la ventaja de que permite el deslizamiento, mecanismo básico por el que los metales se deforman plásticamente cuando se les sujeta a esfuerzos elevados. Los enlaces en los materiales cerámicos son más rígidos y no permiten el deslizamiento antes esfuerzos; es por eso que es muy

difícil que los materiales cerámicos absorban esfuerzos.

Como resultado de estos factores, los cerámicos fallan con mucha mayor facilidad que los metales por fractura frágil o quebradiza si se les aplica una fuerza. Su resistencia a la tensión y tenacidad es relativamente baja.

Propiedades físicas generales de los materiales cerámicos.

La mayor parte de los cerámicos son más ligeros que los metales pero más pesados que los polímeros. Las temperaturas de fusión son mayores que las de la mayoría de los metales.

Las conductividades térmicas y eléctricas de la mayoría de los cerámicos son menores que las de los metales; sin embargo el rango de estos valores es mayor, lo que permite que en algunos casos los cerámicos se usen como aislantes y en otras como conductores. Sus coeficientes de expansión térmica son menores que las de los metales, pero los efectos en los cerámicos son tanto más dañinos en razón de su fragilidad; factor que es imprescindible considerar para el uso del receptor solar hecho de arcilla refractaria.

Los materiales cerámicos con conductividades térmicas bajas y expansiones térmicas relativamente altas son especialmente susceptibles ante este tipo de fallas lo que resulta de gradientes de temperatura y cambios volumétricos significativos en regiones diferentes de la misma pieza. Los términos choque térmico y agrietamiento térmico se emplean en relación con esas fallas.

Composición de los cerámicos refractarios.

Los materiales refractarios están compuestos por Al_2O_3 , SiO_2 , Además de MgO y CaO , siendo sus materias primas la alúmina y el sílice. Las proporciones de un cerámico refractario y otro suelen ser variantes [4.5].

Propiedades termofísicas de los cerámicos refractarios.

La tabla 4.7 presenta las propiedades termofísicas de la arcilla refractaria a diferentes temperaturas [4.2].

Temperatura [K]	k [W/mK]	Cp [J/kgK]
773	1	2050
1073	1.1	2050
1373	1.1	2050

Aplicación de los materiales cerámicos refractarios.

Los refractarios cerámicos con frecuencia tienen la forma de ladrillos, son críticos en muchos procesos industriales que requieren de hornos y crisoles para calentar o fundir metales. Las propiedades útiles de los materiales refractarios son su resistencia a las temperaturas elevadas, aislamiento térmico y resistencia a la reacción química con los materiales que se hornean (por lo general metales fundidos). Cuando se emplea un material cerámico refractario es frecuente que la superficie refractaria tenga dos capas, siendo la exterior una más porosa en tanto que ello aumenta las propiedades de aislamiento.

Hasta aquí, se han visto las diferentes propiedades termofísicas de los materiales seleccionados. Estas propiedades son consideradas en un programa realizado en Matlab (M.R.), para que mediante sus resultados, se pueda evaluar y discriminar entre los materiales seleccionados el mejor para la construcción del crisol. En el siguiente capítulo se presentan los resultados de la simulación para los diferentes materiales. Se establecieron parámetros de tiempo y temperatura, a fin de que con base en estos se establece el criterio de discriminación. Se tomaron en cuenta también los gradientes de temperatura, de manera que estos no propicien esfuerzos térmicos importantes a los materiales que no poseen resistencia apropiada.

Referencias.

[4.1] ASM Handbook Vol. 1, Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys, ASM International 1992.

[4.2] Frank P. Incropera, David P. DeWitt; Fundamentos de transferencia de calor, 4a Ed.; ISBN - 970 - 17 - 0170 - 4; Prentice Hall, México, 1999.

[4.3] URL: <http://www.specialmetals.com/products/inconelalloy625lcf.php>; Archivo: Fabricating Inconel alloy 625LCF.pdf. Fecha de consulta: Enero 12, 2010.

[4.4] URL: <http://www.specialmetals.com/products/inconelalloy625lcf.php>; Archivo: Inconel alloy 625LCF.pdf. Fecha de consulta: Enero 12, 2010.

[4.5] Groover, M.P., Fundamentos de manufactura moderna, Tercera edición, McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, 2007.

5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se llevaron a cabo simulaciones a diferentes distancias en el receptor para cada uno de los diferentes materiales, estableciendo un límite de 2400 s para permitir que el aluminio llegue a su temperatura de fusión. Esta cantidad de tiempo permitirá dar un marco comparativo y en base a ello establecer el criterio que permitirá elegir alguno de los diferentes materiales como el mejor para construir el crisol y utilizarlo dentro del receptor solar.

Se ha denominado calentamiento efectivo a la evolución de la temperatura respecto al tiempo de los nodos, bajo el criterio de que 97 % del los nodos representantes de aluminio alcancen la temperatura de fusión del aluminio. Este criterio junto con el criterio de tiempo finalmente darán los elementos necesarios que permitirán elegir la correcta selección del material.

Es necesario que los calentamientos efectivos se lleven a cabo considerando la distancia más alejada por encima del punto focal de modo que con menores concentraciones solares se logre un calentamiento efectivo. Esto se plantea con la finalidad de que los gradientes de temperatura entre los nodos representativos del material del crisol dentro del receptor sean lo menor posible, para disminuir el esfuerzo térmico que sufren los materiales.

El planteamiento general es entonces: Lograr un calentamiento efectivo que permita que 97 % del material de aluminio alcance su temperatura de fusión, asegurando que los gradientes de temperatura de los materiales del crisol dentro del receptor solar sean los menores posibles; para que estos materiales sufran menor esfuerzo

térmico e inclusive fundir el aluminio de manera más segura sin fracturar el crisol por el mencionado esfuerzo térmico. Por su parte, mayores tiempos de calentamiento permitirán una mayor difusión de calor disminuyendo los gradientes de temperatura bajo la limitante de que estos tiempos no sean excesivos. Todas estas consideraciones plantean una fusión del aluminio exitosa, segura y en tiempos óptimos.

Es importante conocer la evolución de la temperatura de ciertos nodos importantes en la sección bidimensional, dado que esto permitirá:

- Asegurarse que ciertos nodos del crisol denominados como los de mayor temperatura no sobrepasen la temperatura de fusión de material, pues ello representa el riesgo de fundir el propio material del que se construye el crisol; invalidando al material como una posible opción de fabricación del crisol, dado que su fusión provocaría en derramamiento del aluminio fundido.
- Determinar el tiempo en que los nodos de aluminio central y extremo de acuerdo a la geometría alcanzan la temperatura de fusión. Esto permitirá conocer donde se encuentran tanto el nodo más caliente de aluminio como el más frío; y con ello determinar el tiempo en que ambos nodos han alcanzado la temperatura de fusión.
- Conocer la temperatura de ciertos nodos alejados dentro de los nodos del crisol, ya que con esto se conocerán los gradientes térmicos a los que se expone el material. Se elijen para esto nodos del material que se encuentran en los extremos geométricos de la malla, en tanto que éstos se exponen a condiciones de conducción pura, mayor y menor influencia de la radiación, así como condiciones de convección natural y convección determinada por las correlaciones de Hinojosa et al. para cavidades en un análisis bidimensional.
- Evolución de la temperatura y temperatura máxima alcanzadas por el material refractario (aislante). La finalidad de conocer estas condiciones permite evaluar el grosor óptimo de aislante, las temperaturas alcanzadas y los gradientes térmicos que se desarrollan en ésta parte del receptor en particular.

Ante estas consideraciones, los nodos seleccionados en el análisis de resultados son (ver figura 5.1):

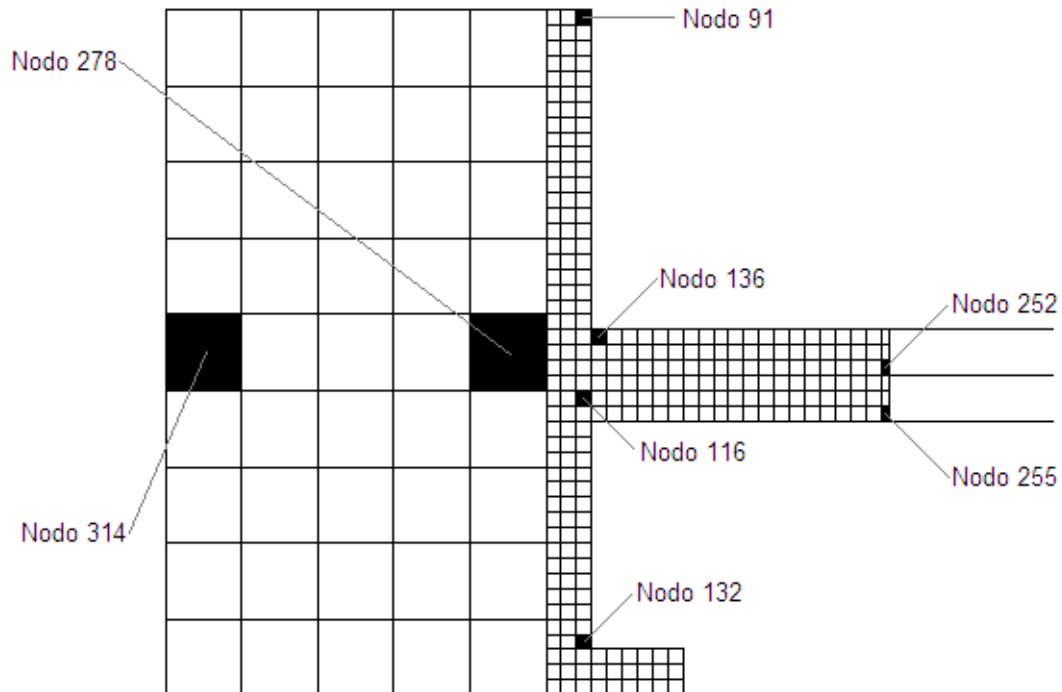


Figura 5.1. Selección de los nodos en la malla

Nodo 91:

El nodo 91 está ubicado en la parte interior del extremo superior del crisol. Se eligió este nodo debido a que es el nodo más frío de la parte superior del crisol, pues está expuesto a dos condiciones de convección (superior y lateral); además de ubicarse en una posición de mayor alejamiento del suministro de potencia. Un nodo alejado como este es ilustrativo en cuanto a gradiente de temperatura.

Nodo 116:

El nodo 116 está ubicado en la parte extrema media del crisol. Es un nodo que puede ser considerado como uno de los que se expone a mayor incremento de temperatura, siendo también próximo en ubicación al material refractario de aislamiento.

Nodo 132:

El nodo 132 está ubicado en la parte interior del extremo inferior del crisol. Se

eligió este nodo debido a que es uno de los nodos más fríos de la parte inferior del crisol y dentro de la cavidad, sin embargo tan solo está expuesto a una condición de convección (lateral); además de ubicarse en una posición alejada del suministro de potencia. Al igual que el nodo 91, un nodo alejado como este es ilustrativo en cuanto a gradiente de temperatura.

Nodo 136:

Es un nodo que ha demostrado someterse a las temperaturas más bajas de los nodos de aluminio, junto al factor de ser un nodo superior (se aleja del suministro de potencia) sometido a una condición de convección y encontrarse también lateral al material del crisol. Si bien es cierto que a medida de que la superficie del receptor solar se aleja de la distancia focal, la concentración solar se torna menos uniforme, dejando ver que a los nodos centrales no se les suministra la mayor potencia por unidad de área; la mayoría de los materiales requiere un acercamiento a la distancia focal considerable, suministrando a los nodos centrales las potencias más altas por unidad de área, presuponiendo que el nodo 136 será de los más fríos.

Nodo 252:

La expectativa ante este nodo que representa al aluminio, es que resulte ser aquel que alcance en menor tiempo la temperatura de fusión del aluminio, en tanto que al ser un nodo central será objeto de encontrarse más cerca de las mayores concentraciones solares; esto partiendo del hecho de que al estar cerca la superficie del receptor solar de la distancia focal, el trazado de rayos indique mayor concentración en esta parte central.

Nodo 255:

Es el nodo central del material del crisol. La expectativa es que sea el nodo que alcance nos solo las mayores temperaturas en la mayoría de los casos, sino que las consiga en antes que ningún otro nodo. Claro está que este nodo será por consiguiente un nodo ilustrativo de los gradientes de temperatura.

Nodo 278:

Es el nodo que pertenece al material refractario en el que se esperan mayores temperaturas de todos los nodos de aislante refractario en tanto que es el más cercano al suministro de potencia. Con base en este nodo, se podrá plantear otra selección de material aislante si fuera el caso.

Nodo 314: Es el nodo más alejado de los nodos de aislante refractario. Este nodo será representativo de las temperaturas superficiales del material aislante y proporcionará información esencial en el diseño del portador del receptor solar en el sistema. Con base en las temperaturas que alcance este nodo, podrá justificarse que el material aislante es suficiente para el receptor solar.

5.1. Metodología para la selección de la ubicación del crisol sobre el eje focal

La metodología para obtener esta distancia fue obtenida bajo el siguiente criterio: se debe localizar el crisol a la mayor distancia posible del punto focal, permitiendo que los nodos que representan a la masa de aluminio obtengan su temperatura de fusión. La forma de conocer esta distancia es de manera iterativa y se obtiene con la simulación del calentamiento de crisol con el programa de simulación realizado en Matlab (M.R.).

En la figura 5.2 se observa la distancia sobre el eje focal que adopta el crisol en la simulación. El crisol se desplaza sobre el eje focal del concentrador y la distancia que el programa de Matlab considera es en centímetros, partiendo del punto focal.

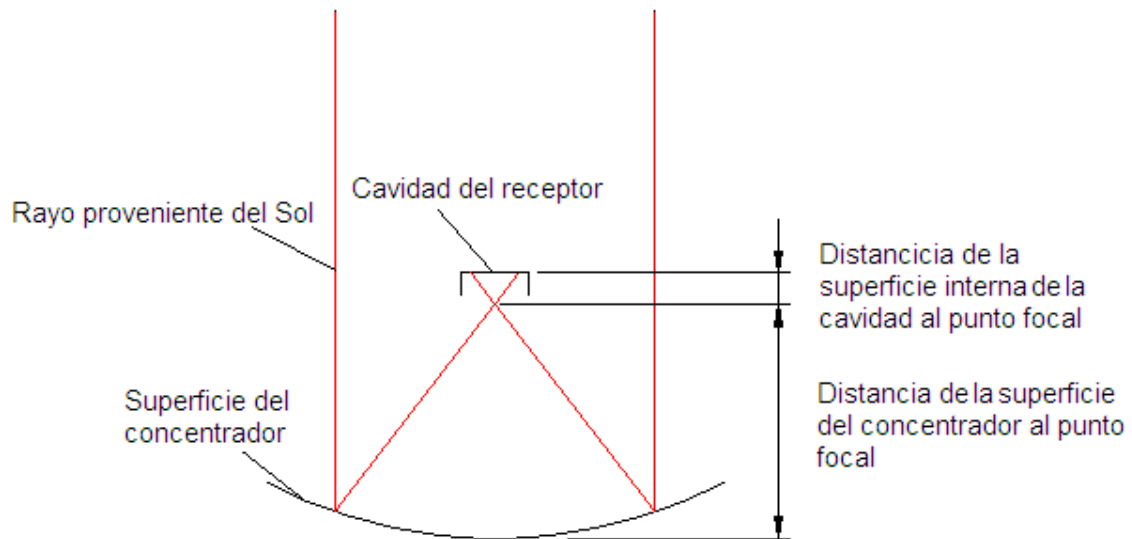


Figura 5.2. Distancia de la cavidad interna del receptor a partir del foco, sobre el eje focal.

Cuando los nodos de aluminio se calientan hasta la temperatura de fusión mediante la colocación del crisol en la simulación, se establece que la masa de aluminio ha logrado un calentamiento efectivo.

En el capítulo 3, se explicó que a mayor distancia del punto focal, se obtiene una distribución de flujo de menor concentración. Esta característica hace versátil al sistema de la siguiente forma: para permitir que el crisol y el aluminio contenido en éste se caliente de más rápidamente se debe colocar el crisol a una distancia más cercana al punto focal. Así se puede controlar la rapidez a la que se calienta el crisol.

Controlar la rapidez a la que se calienta el crisol, permite que el material del que se fabrica el crisol difunda calor y evita que se desarrollen gradientes térmicos de gran magnitud. Esto depende directamente de la difusividad térmica del material.

Es importante evitar grandes gradientes térmicos en el crisol, pues mientras menores sean éstos, el material del que está fabricado el crisol se somete a menores esfuerzos térmicos.

Sin embargo la distancia de la superficie interior a la cavidad del crisol no debe ser muy grande, debido a que esto evita que el aluminio logre su calentamiento efectivo antes del límite de tiempo establecido. Cuando una distancia muy lejana al punto focal no permite obtener un calentamiento efectivo del aluminio para un tiempo menor a 2400 s, entonces se realiza una nueva simulación, eligiendo en el programa de Matlab (M.R.) la distancia consecutiva más cercana.

La distancia óptima al punto focal es aquella que permite el calentamiento efectivo del aluminio, logrando los menores gradientes térmicos en los materiales de los que se fabrica el crisol.

5.2. Resultados numéricos de temperaturas en el receptor solar: Acero al carbono 1018

El primer material que se somete a la evaluación como componente del crisol dentro del receptor solar es el acero al carbono 1018. Como se ha expuesto en el capítulo 4, el acero al carbono 1018 tiene alta conductividad térmica y capacidad calorífica, mismas que aumentan con la temperatura. Estas propiedades termofísicas tienen otro importante incremento cuando este material se acerca a los 1000 K.

A continuación se exponen las curvas de calentamiento para los nodos elegidos como representativos del aluminio, el cuerpo del crisol, y del material refractario aislante del receptor solar; para la evaluación del acero al carbono 1018.

El calentamiento efectivo que tuvo lugar antes de los 2400 s se llevó a cabo a una posición de 0.025 m para todas las inclinaciones del receptor (0 grados, 30 grados y 45 grados respecto a la horizontal). En las figuras 5.3 a la 5.5 puede notarse que para las diferentes inclinaciones del receptor no existe una diferencia significativa en la evolución de la temperatura al comparar los diferentes nodos.

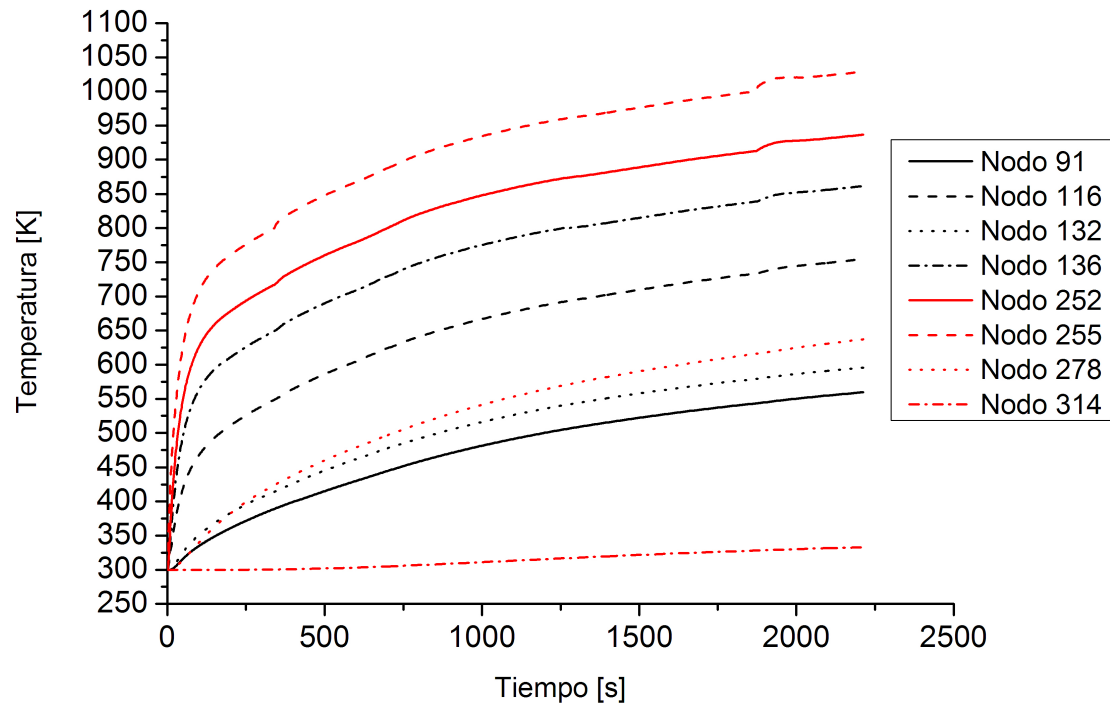


Figura 5.3. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de acero 1018. Inclinación de 0 grados.

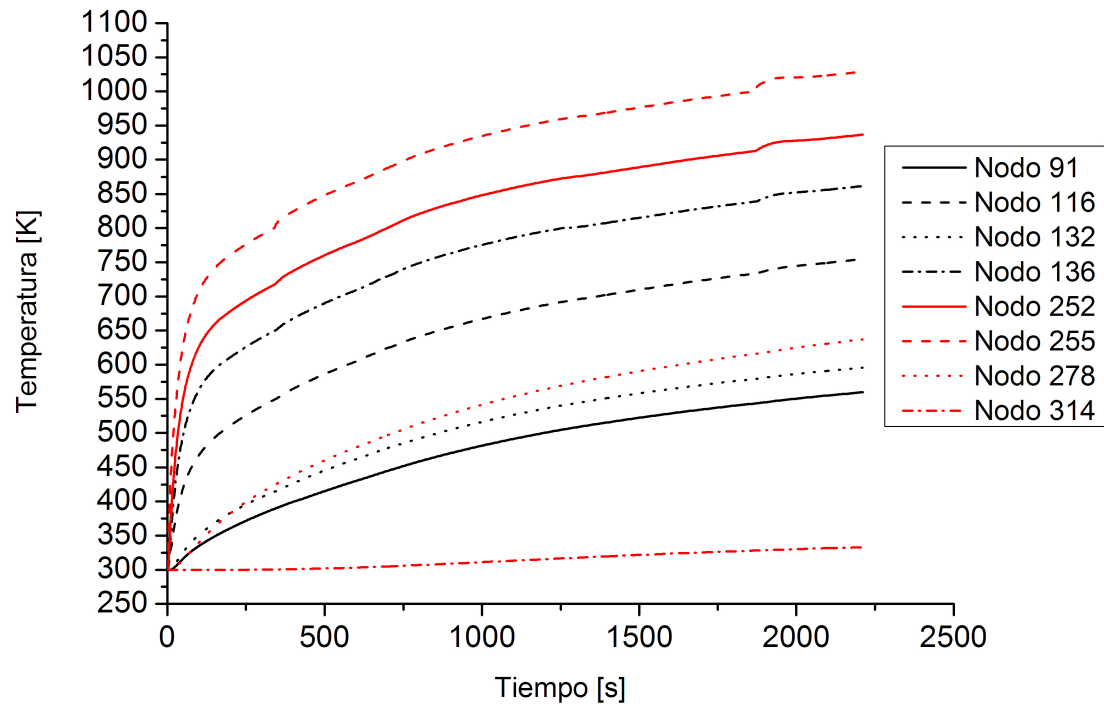


Figura 5.4. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de acero 1018. Inclinación de 30 grados.

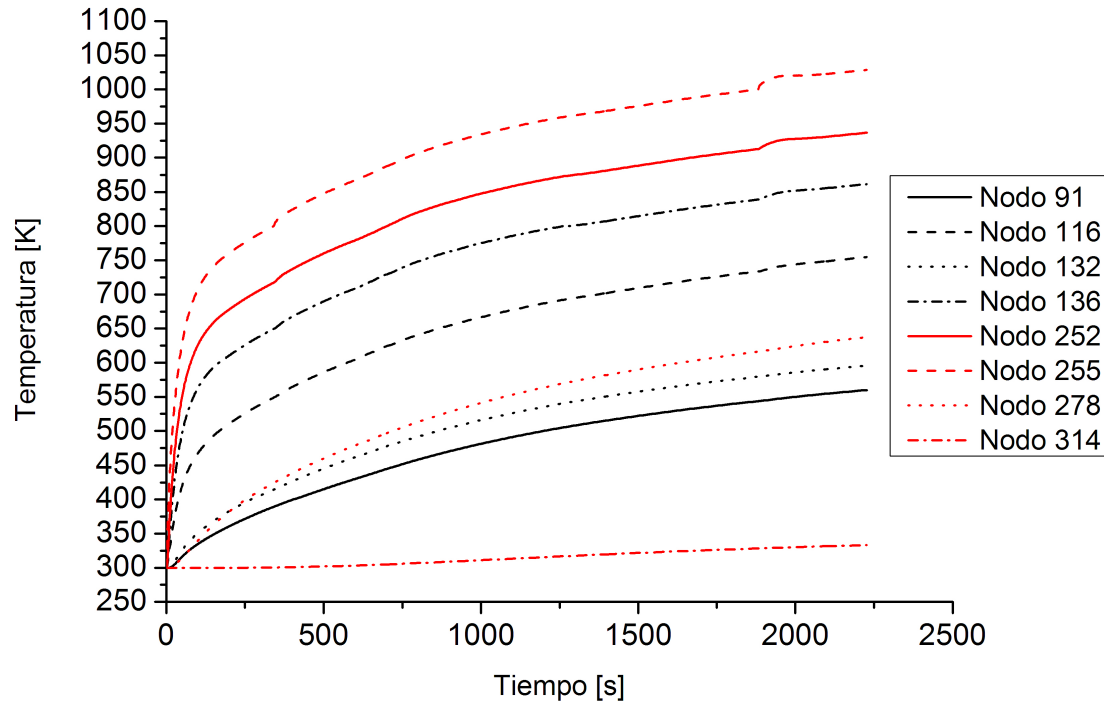


Figura 5.5. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de acero 1018. Inclinação de 45 grados.

En aproximadamente 1850 s, es posible notar que el aluminio llega a fundirse. En tanto que parte del calor absorbido por el receptor es absorbido por el aluminio en forma de calor latente, la evolución en la temperatura de los nodos de aluminio y acero cercanos al centro del receptor experimentan un ligero “estancamiento” en la evolución de sus temperaturas; este es el caso de los nodos 136, 252 y 255. Debido a la alta conductividad térmica del aluminio esta influencia es notoria en los nodos 136 y 252 aun cuando son nodos geoméricamente lejanos.

Al compararse la temperatura que obtiene el nodo 255 que es ligeramente superior a los 1000 K, con la temperatura del nodo 116 que de de aproximadamente 750 K, se conoce que el gradiente de temperatura entre estos nodos es bajo (aproximadamente de 250 K a 275 K), disminuyendo el esfuerzo térmico en el material. Este gradiente en el material se consigue en alrededor de 2220 s, cuando para este caso

se logró el calentamiento efectivo para los tres casos de inclinación del receptor.

Los nodos exteriores de refractario que tienen la tarea de aislar al crisol se mantienen muy cercanos a la temperatura ambiente evitando pérdidas convectivas, ello significa que el grosor del aislante es óptimo.

Finalmente el campo de temperaturas resultante se observa en la figura 5.6, 5.7 y 5.8 para las diferentes inclinaciones del receptor:

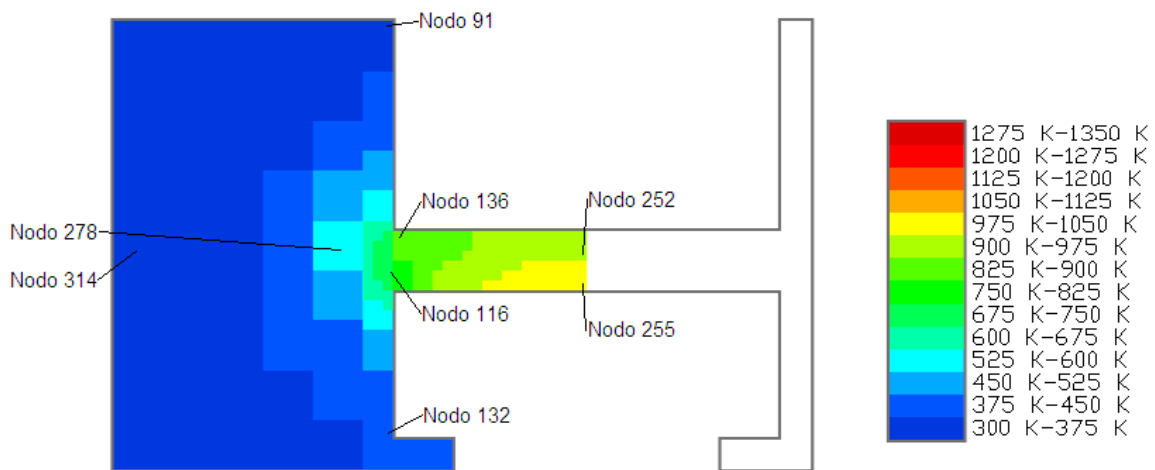


Figura 5.6. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero al carbono 1018, para una inclinación del receptor de 0 grados respecto a la horizontal.

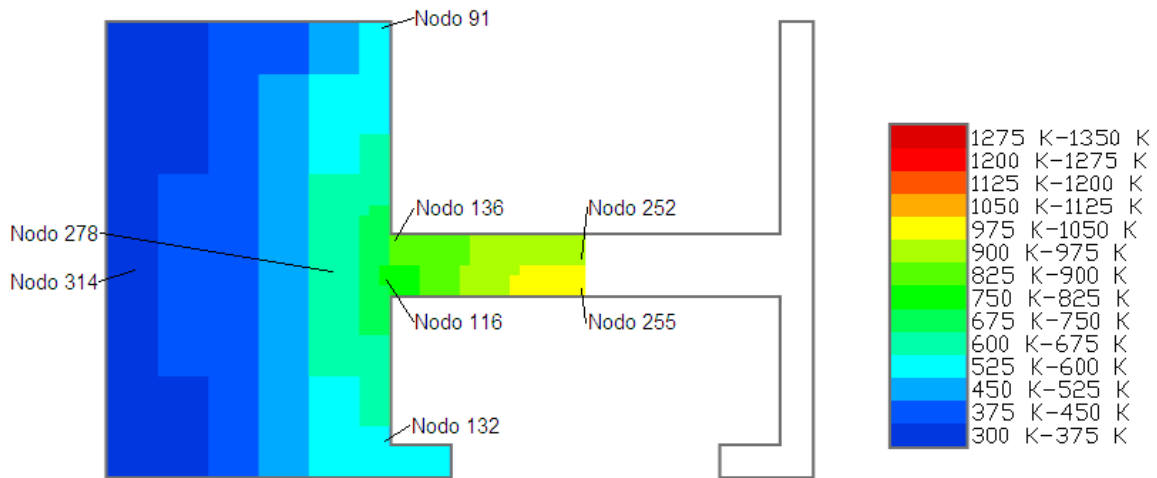


Figura 5.7. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero al carbono 1018, para una inclinación del receptor de 30 grados respecto a la horizontal.

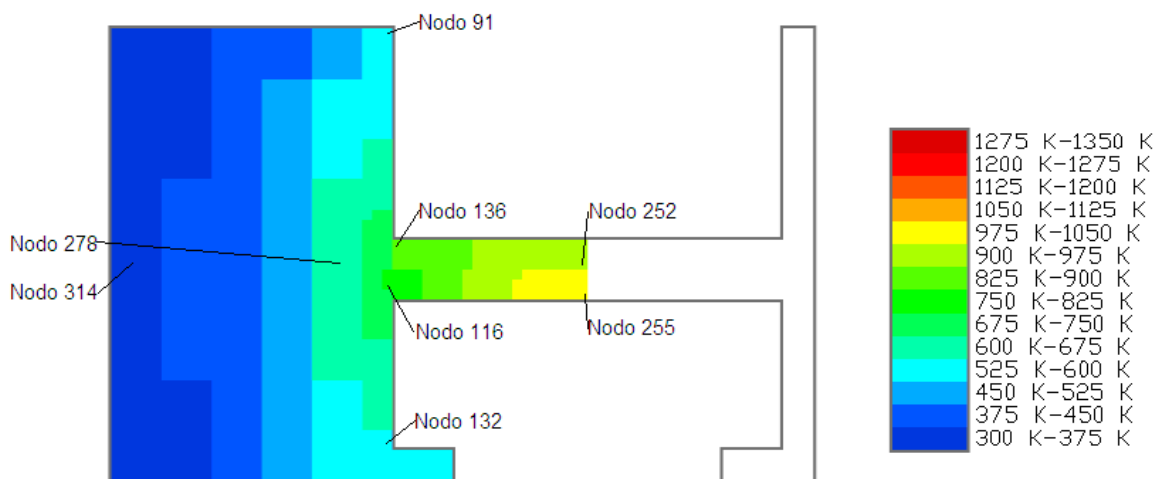


Figura 5.8. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero al carbono 1018, para una inclinación del receptor de 45 grados respecto a la horizontal.

Es posible notar, ante las diferentes figuras para los campos de temperaturas, que el acero al carbono 1018 resulta ser un material que proporciona un buen comportamiento como crisol para fundir aluminio. Además el acero al carbono presenta

una elevada capacidad calorífica que se ve principalmente acentuada a temperaturas mayores a 800 K lo que le permite moderar sus gradientes de temperatura en la última etapa del calentamiento. Esta propiedad resulta ciertamente benéfica, ya que junto a la elevada conductividad térmica que presenta el acero al carbono 1018, le permite a éste material disipar calor de manera efectiva mientras que se retarda el incremento de temperatura. Este efecto se aprecia muy bien en la región amarilla de tamaño eminentemente pequeño y una alta difusión de calor al material refractario. Junto a las consecuencias benéficas que recién se enuncian, debe señalarse también que se requieren tiempos muy elevados para que el aluminio alcance una temperatura efectiva de fusión debido a las altas pérdidas convectivas que obtiene el material por el calentamiento de todas sus paredes.

No debiera perderse de vista, sin embargo, que el acero al carbono es un material de aleación “pobre”, misma que no lo hace un material que pueda someterse a un número elevado de ensayos de fundición de aluminio. Este material puede comportarse adecuadamente en breves ensayos de fundición de aluminio, pero no existe garantía de que el material no se degrade rápidamente por corrosión, fatiga térmica o altos esfuerzos térmicos debido a los gradientes de temperatura.

Por su parte, el nodo 314 muestra una temperatura que se encuentra entre los 300 K y 375 K al finalizar el periodo de tiempo de 2200 s . Esto hace evidente que el grosor que posee el aislamiento es óptimo.

5.3. Resultados numéricos de temperaturas en el receptor solar: Acero inoxidable 316

El siguiente material que se somete a la evaluación como componente del crisol dentro del receptor solar es el acero inoxidable 316. Como se ha expuesto en el capítulo 4, el acero inoxidable 316 tiene una conductividad térmica más baja que el acero al carbono 1018 y una capacidad calorífica semejante, sin embargo es más estable considerando los incrementos de temperatura. Ambas propiedades aumentan a temperaturas mayores.

A continuación se exponen las curvas de calentamiento para los nodos elegidos como representativos del aluminio, el cuerpo del crisol, y del material refractario

aislante del receptor solar; para la evaluación del acero inoxidable 316 (figuras 5.9, 5.10 y 5.11).

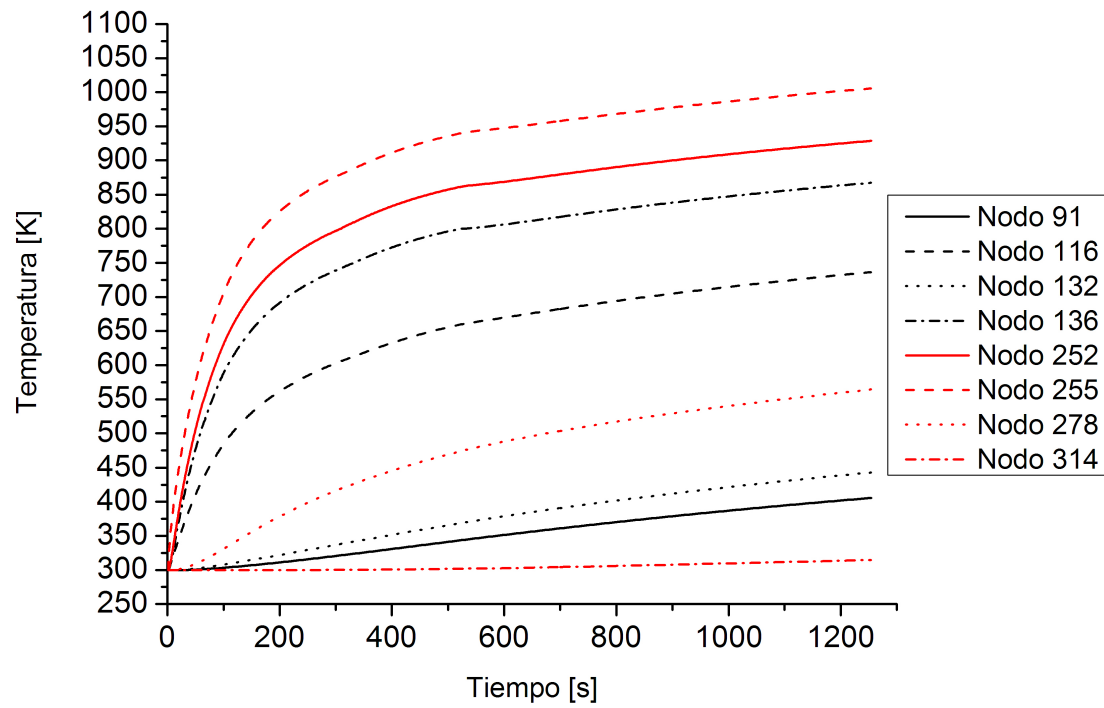


Figura 5.9. Curvas de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de acero inoxidable 316. Inclinação de 0 grados.

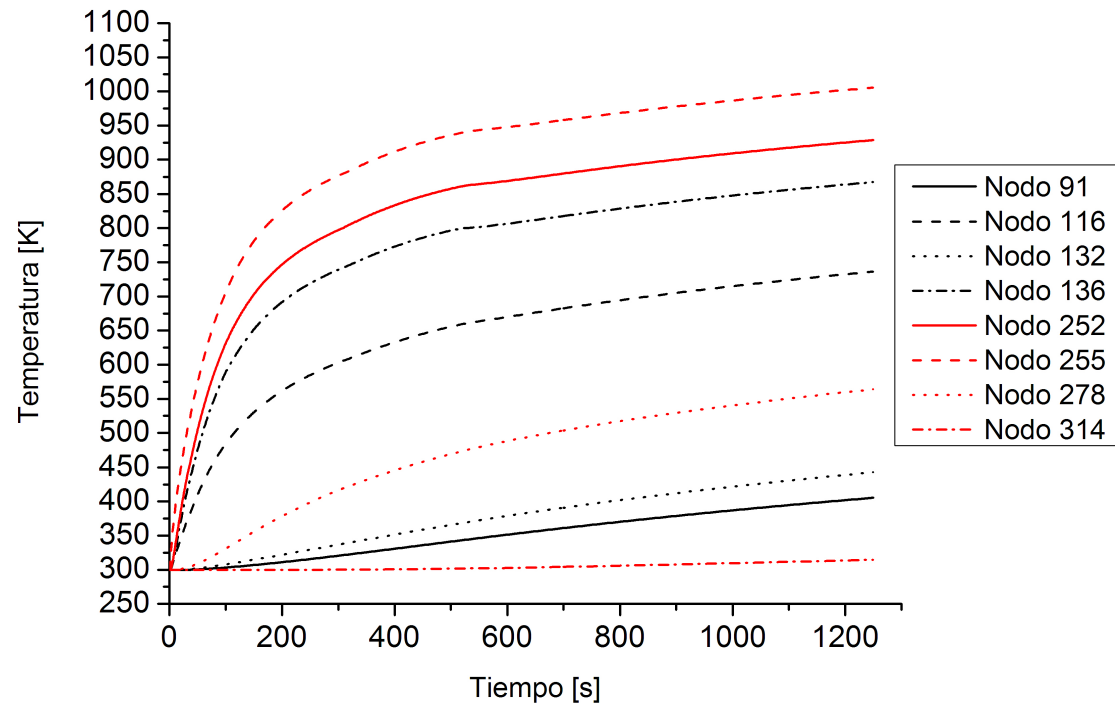


Figura 5.10. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de acero inoxidable 316. Inclinación de 30 grados.

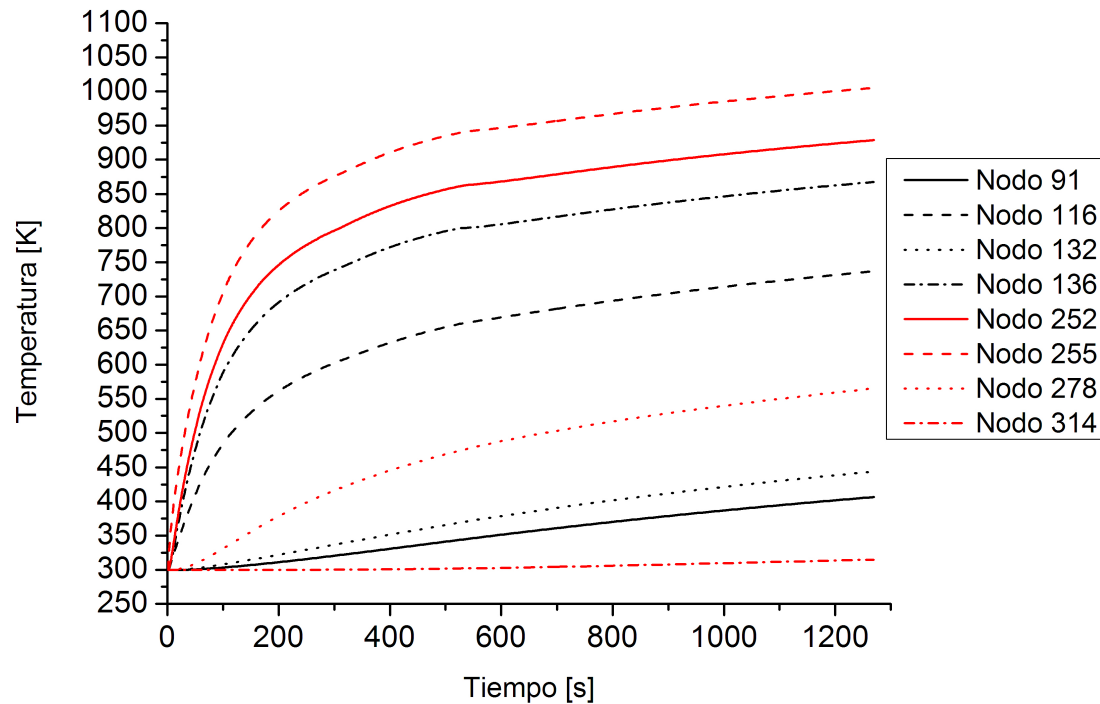


Figura 5.11. Curva de evolución de temperaturas de los nodos en el crisol de acero inoxidable 316. Inclinación de 45 grados.

Ante las diferentes inclinaciones que experimenta el receptor, cuando el crisol está hecho de acero inoxidable 316, la evolución de la temperatura para los diferentes nodos es básicamente la misma. El calentamiento efectivo tuvo lugar en un tiempo de alrededor de 1250 s; con una temperaturas alcanzadas por el nodo 116 de 740 K y temperaturas máximas en el nodo 255 en el material del crisol de 1000 K aproximadamente. No obstante, es inexistente una diferencia significativa para las diferentes inclinaciones del receptor, sin embargo cuando la inclinación es de 45 grados, (figura 5.11) existen mayores pérdidas convectivas que llevan a obtener mayores tiempos para lograr el calentamiento efectivo.

Las curvas de calentamiento son suaves debido a la estabilidad de las propiedades termofísicas del acero inoxidable 316 en función del aumento de su temperatura.

El gradiente de temperaturas que se aprecia entre el nodo 116 y el nodo 255 al final de sus curvas de evolución de temperatura de aproximadamente de 270 K , se debe principalmente a que el acero inoxidable posee una conductividad térmica alta, sin embargo considerablemente menor a la del acero al carbono 1018, lo que limita su capacidad para difundir calor. Debe tomarse en cuenta que este gradiente de temperatura produce esfuerzo térmico en el material, pero al no tratarse de un gradiente muy grande no se discrimina al acero inoxidable como una opción viable para la fabricación del crisol.

Los nodos exteriores de refractario que tienen la tarea de aislar al crisol se mantienen muy cercanos a la temperatura ambiente evitando pérdidas convectivas, ello significa que el grosor del aislante es óptimo.

Finalmente el campo de temperaturas resultante se observa en las figuras 5.12 a la 5.14.

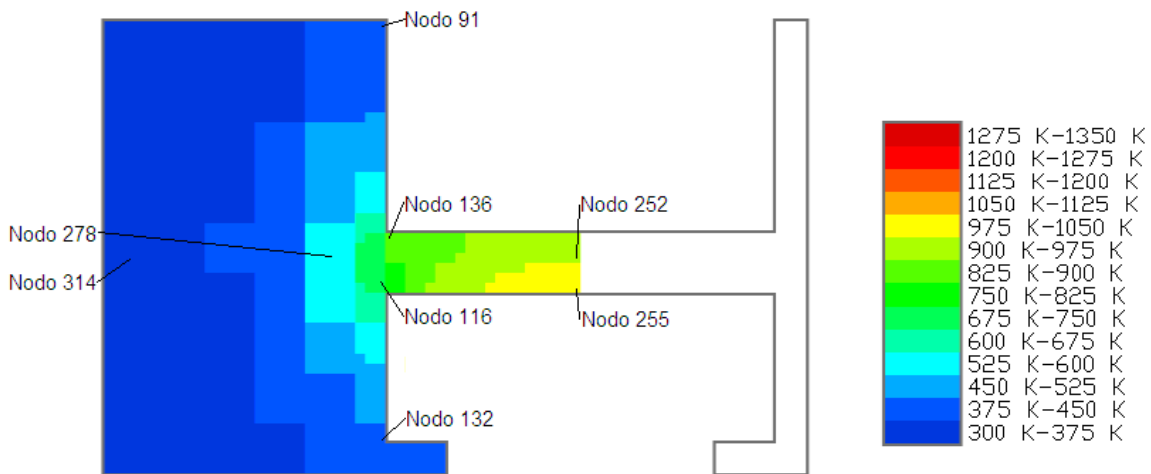


Figura 5.12. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero inoxidable 316, para una inclinación de 0 grados con respecto a la horizontal.

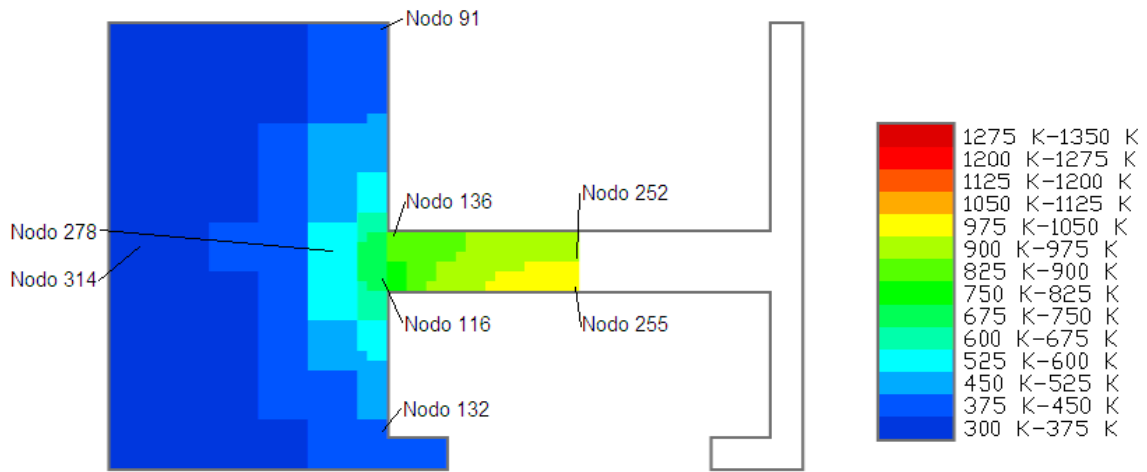


Figura 5.13. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero inoxidable 316, para una inclinación de 30 grados con respecto a la horizontal.

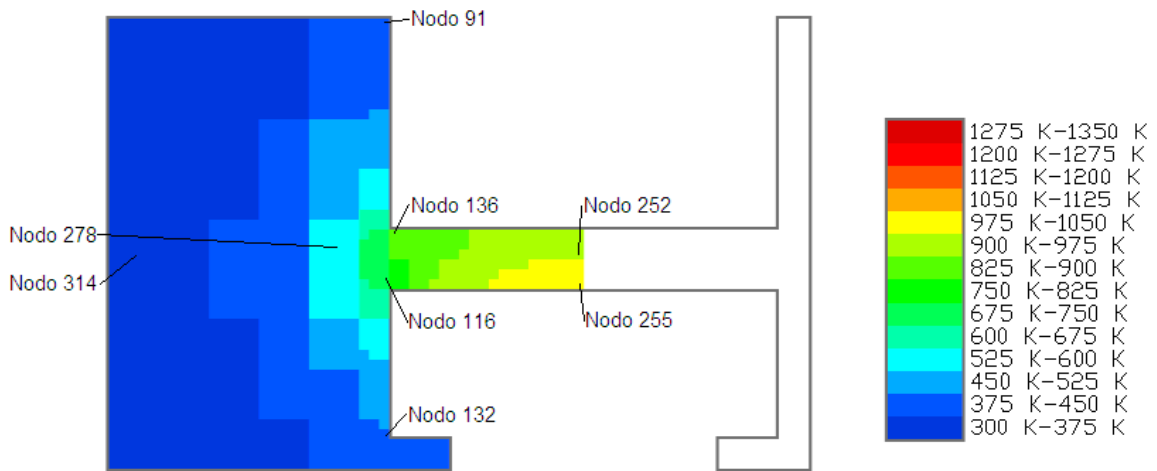


Figura 5.14. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el crisol hecho de acero inoxidable 316, para una inclinación de 45 grados con respecto a la horizontal.

En los campos de temperatura se observa que el acero inoxidable 316 tiene una elevada temperatura en su parte central, en el nodo 255 y los que se encuentran

cercanos a éste, mismos que pueden verse en la región amarilla ligeramente menor a la del acero al carbono 1018. La conductividad térmica del acero inoxidable le permite difundir calor y lograr gradientes de temperatura menores. Ya que el acero inoxidable está también indicado para ciertas aplicaciones de procesos térmicos de alta temperatura; su adecuado desempeño en esta simulación lo presenta como un material adecuado para la fabricación del crisol.

5.4. Resultados numéricos de temperaturas en el receptor solar: Inconel 625LCF

Actualmente, existen desarrollos de materiales metálicos con aleaciones ricas que les proveen de propiedades aptas para las aplicaciones de altas temperaturas. Tal es el caso del INCONEL 625LCF (M.R.).

Aunque sus propiedades termofísicas son muy semejantes a las del acero inoxidable 316, su capacidad calorífica y conductividad térmica son ligeramente menores. Como se ha descrito con anterioridad, este material se ha desarrollado con el objetivo de ser empleado en aplicaciones térmicas, es por eso que la expectativa ante este material es de un mejor desempeño.

Las curvas de evolución de temperatura para el proceso de se presentan por medio de las figuras 5.15, 5.16 y 5.17.

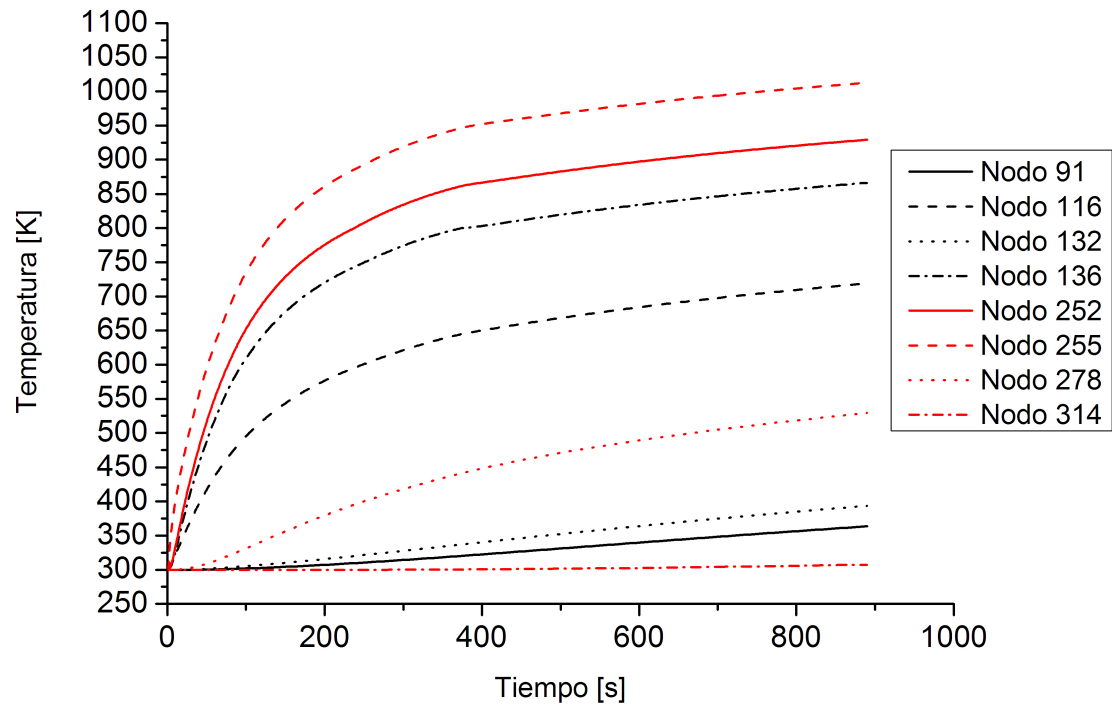


Figura 5.15. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de INCONEL 625LCF. Inclinación de 0 grados.

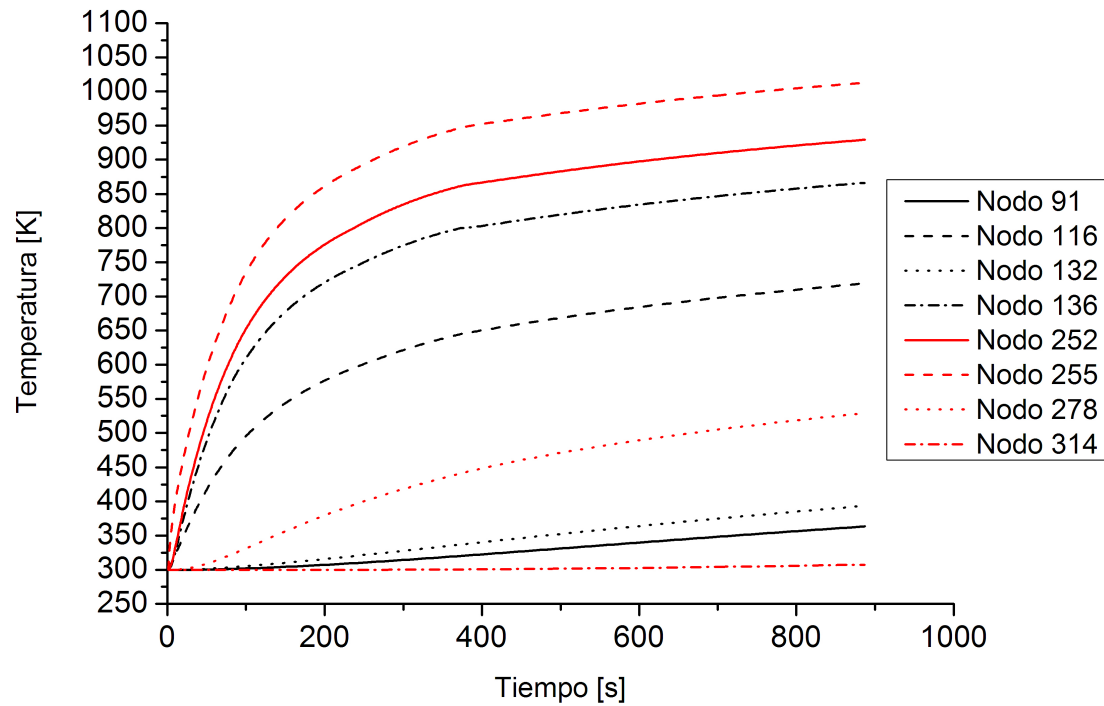


Figura 5.16. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de INCONEL 625LCF. Inclinación de 30 grados.

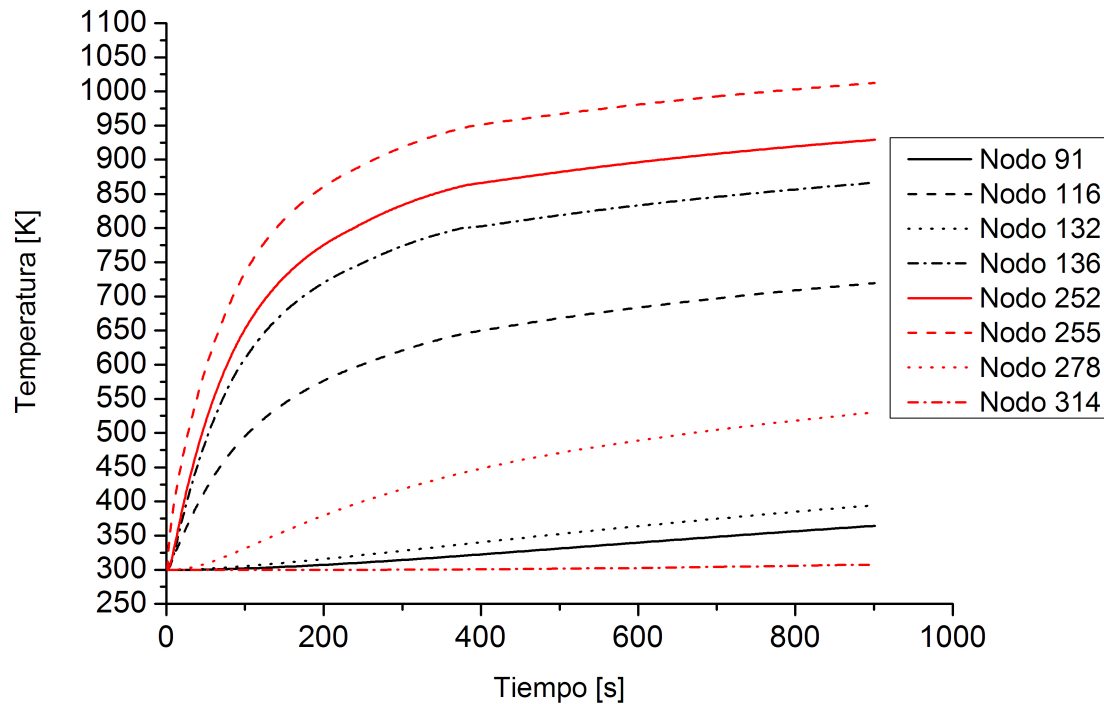


Figura 5.17. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de INCONEL 625LCF. Inclinação de 45 grados.

Los resultados que se observan para el INCONEL 625LCF en las curvas de evolución muestran tiempos requeridos muy similares para las distintas inclinaciones del receptor de 0 grados, 30 grados y 45 grados, (figuras 5.15, 5.16 y 5.17) en las que apenas existen diferencias por algunos segundos, siendo estos tiempos de alrededor de 889 s. Las temperaturas máximas alcanzadas para el crisol en este caso son de 1010 K aproximadamente para el nodo 255. Por su parte, el nodo 116 obtiene temperaturas de 720 K aproximadamente.

Los gradientes de temperatura del INCONEL 625LCF entre el nodo 116 y el nodo 255 se encuentran entre los 290 K. Es probable que la resistencia mecánica que posee este material a temperaturas elevadas le permita soportar los esfuerzos térmicos provocados por esta diferencia de temperaturas, en tanto que el fabricante

lo expresa de ésta manera.

Los nodos exteriores de refractario que tienen la tarea de aislar al crisol se mantienen muy cercanos a la temperatura ambiente evitando pérdidas convectivas, ello significa que el grosor del aislante es óptimo. Los campos de temperatura resultantes se presentan a continuación:

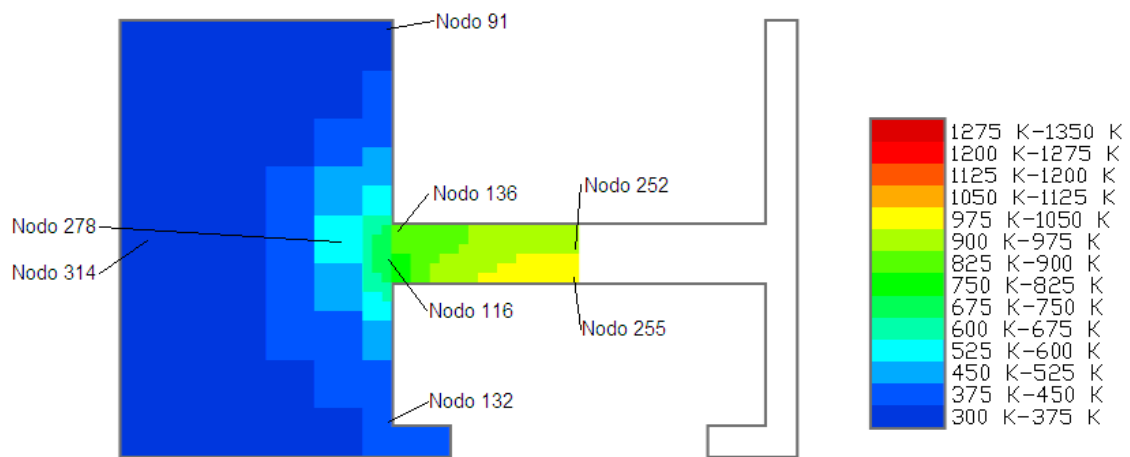


Figura 5.18. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el receptor solar con crisol de aleación INCONEL 625LCF, en segundos; para una inclinación de 0 grados con respecto a la horizontal.

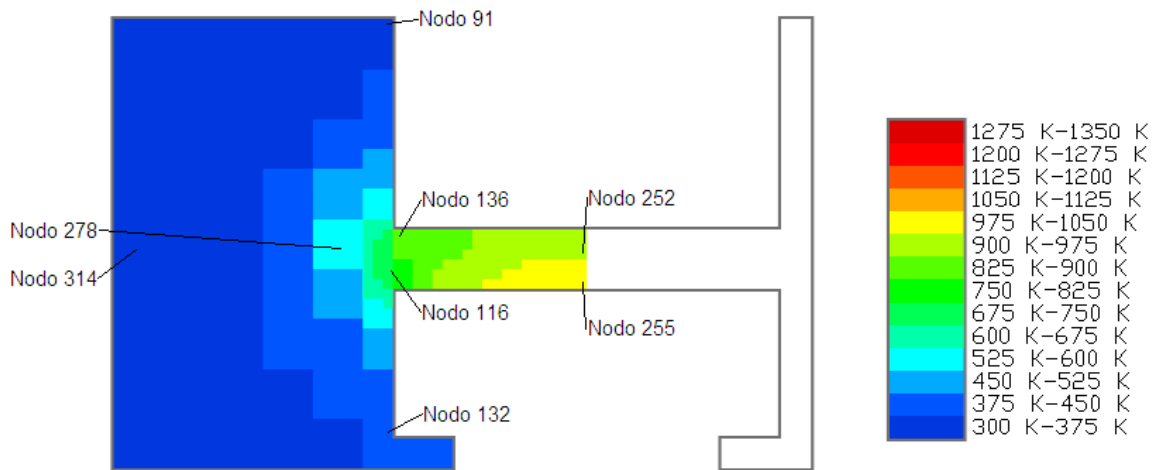


Figura 5.19. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el receptor solar con crisol de aleación INCONEL 625LCF, en segundos; para una inclinación de 30 grados con respecto a la horizontal.

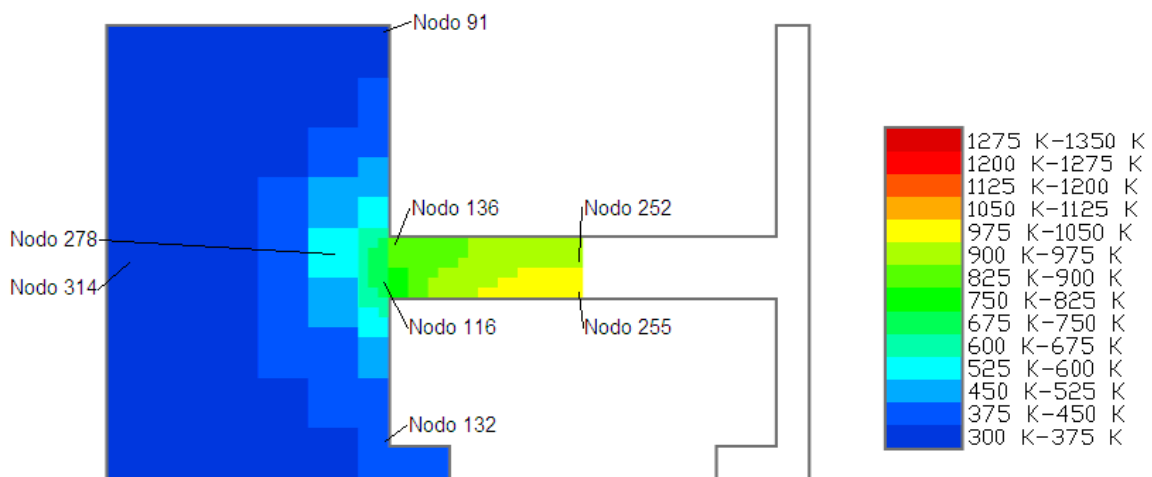


Figura 5.20. Campo de temperaturas resultante del calentamiento efectivo para el receptor solar con crisol de aleación INCONEL 625LCF, en segundos; para una inclinación de 45 grados con respecto a la horizontal.

Debido a la cercanía que se requiere de un receptor con un crisol fabricado de INCONEL 625LCF para que el aluminio tenga un calentamiento efectivo se observan temperaturas medias altas en color amarillo en la sección media del crisol en

una región aun mayor que la del acero 1018 y la del acero inoxidable 316.

Los campos de temperatura resultantes de la evaluación del INCONEL 625LCF muestran que el material metálico difunde calor de manera que se disminuyen los gradientes térmicos, aunque esta difusión de temperatura no permea hasta nodos lejanos del aislante. Si bien esta característica hace que las paredes del crisol tengan mayor cantidad de pérdidas convectivas, éstas no son tan altas como se observa en la gran cantidad de nodos azules oscuro en el aislante y le permite al material metálico ser objeto de menores esfuerzos térmicos.

5.5. Resultados numéricos de temperaturas en el receptor solar: Arcilla refractaria.

Por último, el material que se plantea para construir un crisol que para el receptor solar es la arcilla refractaria; es decir, si todo el receptor se construyera del mismo material de la capa de aislante. Como se ha tratado con anterioridad, la razón por la que se plantea un material cerámico para la totalidad de crisol es debido a la excelente tolerancia a las altas temperaturas por parte de este tipo de materiales. Sin embargo son materiales frágiles, lo que los hace susceptibles a las fracturas ante esfuerzos relativamente pequeños. Esto puede significar que si se desarrolla un importante gradiente térmico en el material, aunque los coeficientes de expansión de los cerámicos son pequeños, es posible crear un esfuerzo que fracture el material y ponga en riesgo al sistema.

Al someter a la evaluación al material cerámico se consiguen las siguientes curvas de evolución de temperatura (figuras 5.21, 5.22 y 5.23):

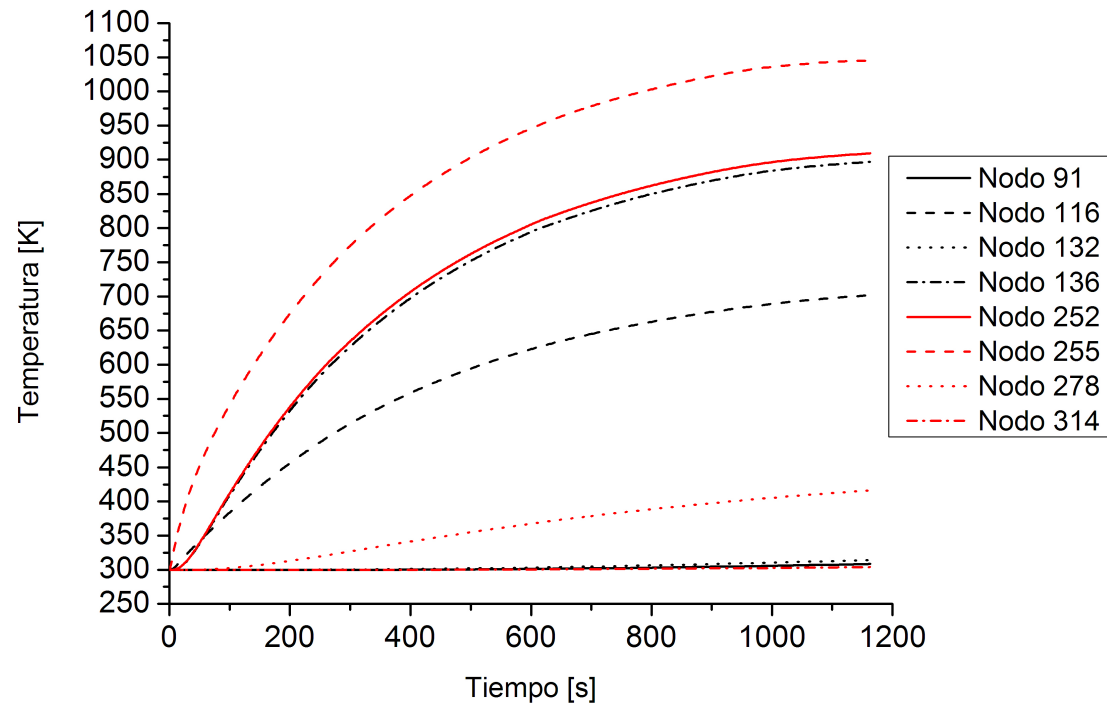


Figura 5.21. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de material refractario. Inclinación de 0 grados.

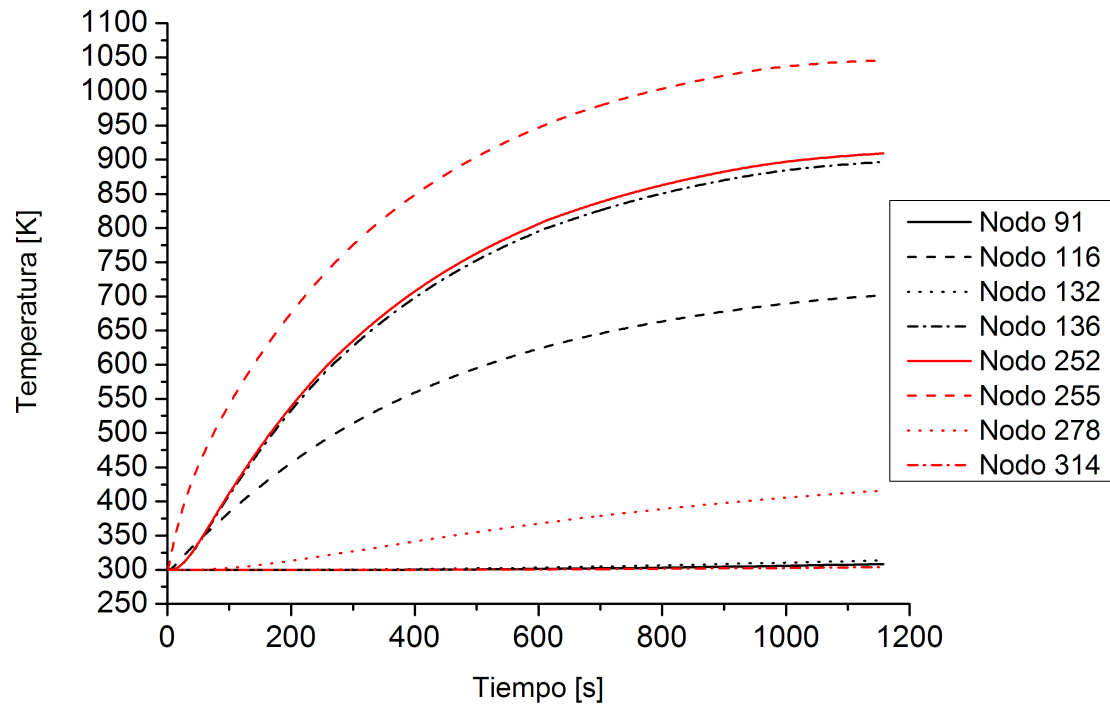


Figura 5.22. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de material refractario. Inclinación de 30 grados.

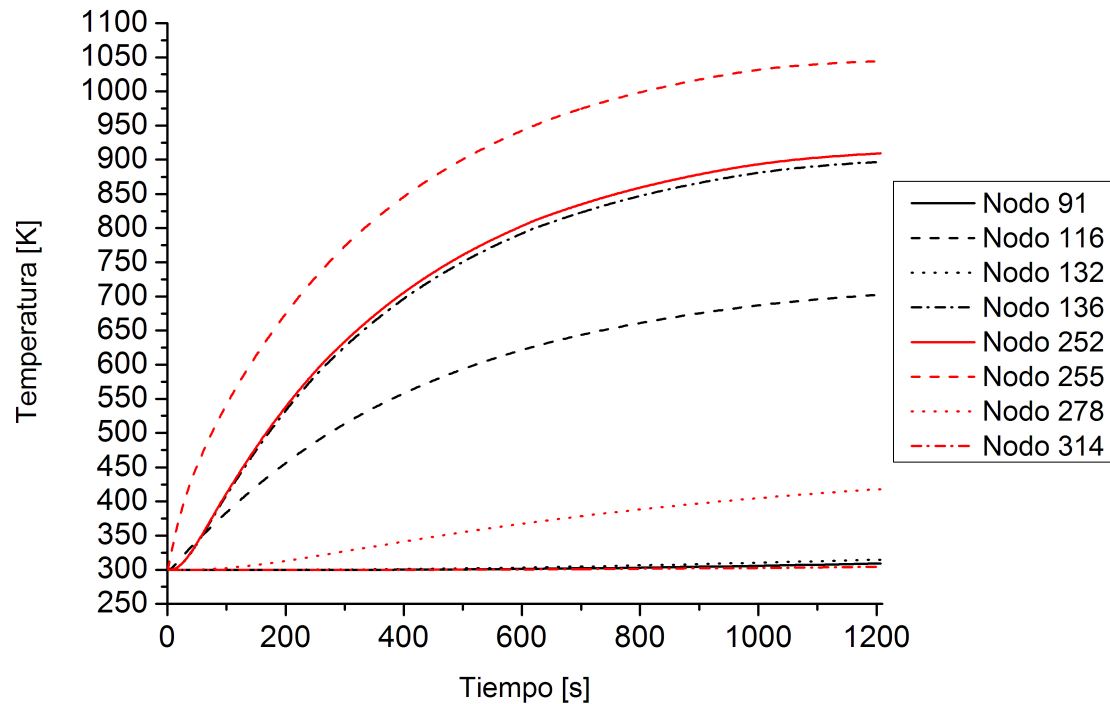


Figura 5.23. Curva de evolución de temperaturas de los nodos. Crisol de material refractario. Inclinción de 45 grados.

Al observar las gráficas de evolución de temperatura para los diferentes nodos es posible concluir que se obtiene la temperatura efectiva de fusión en el aluminio en alrededor de 1200 s para las inclinaciones de 0 grados y 30 grados del receptor, pero para la inclinación de 45 grados se requiere un tiempo ligeramente mayor. Las temperaturas obtenidas por los nodos 255 y 116 son de 1045 K y 700 K respectivamente, exponiendo el material a los mayores gradientes de temperatura al ser comparado con el resto de los materiales.

En este caso se llevan a cabo incrementos en la temperatura de los nodos centrales, tanto del aluminio como crisol sin cambios abruptos.

Debido a que el material refractario posee conductividad térmica baja, el crisol no difunde calor fácilmente y el aluminio obtiene su temperatura efectiva de fusión

relativamente rápido. También, debido a esta baja difusión térmica, el crisol pierde menos calor en tanto que el resto de las paredes se encuentran a baja temperatura, provocando que existan menores pérdidas convectivas en éstas.

Los gradientes de temperatura que se generan en el crisol de refractario acentúan su importancia dado que se trata de un material frágil; estos gradientes plantean ya un riesgo al encontrarse una diferencia considerable de temperaturas entre el nodo 116 y el nodo 255 de aproximadamente 345 K .

Los campos de temperatura resultantes se presentan a continuación:

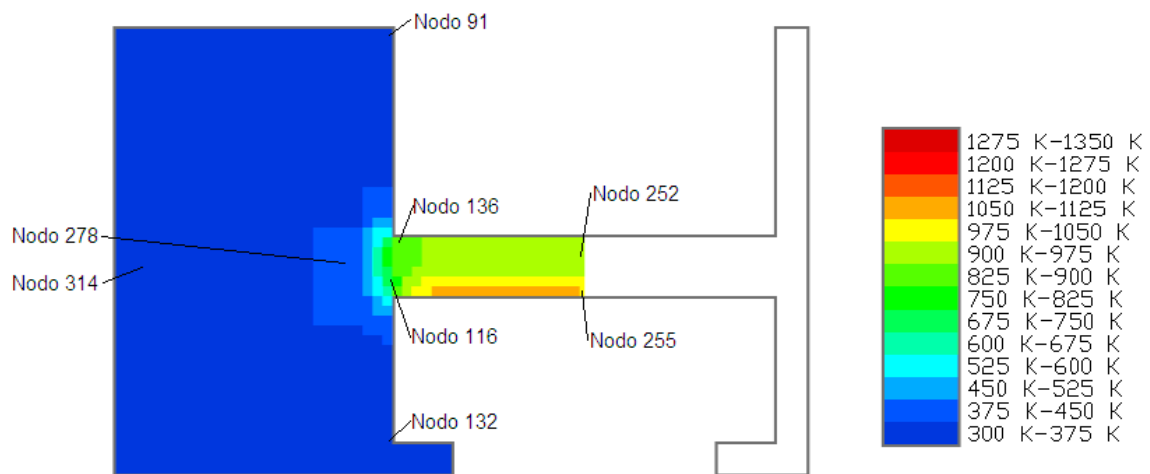


Figura 5.24. Campo de temperaturas resultante para el receptor solar hecho con material refractario en su totalidad, en segundos; para una inclinación del receptor de 0 grados con respecto a la horizontal

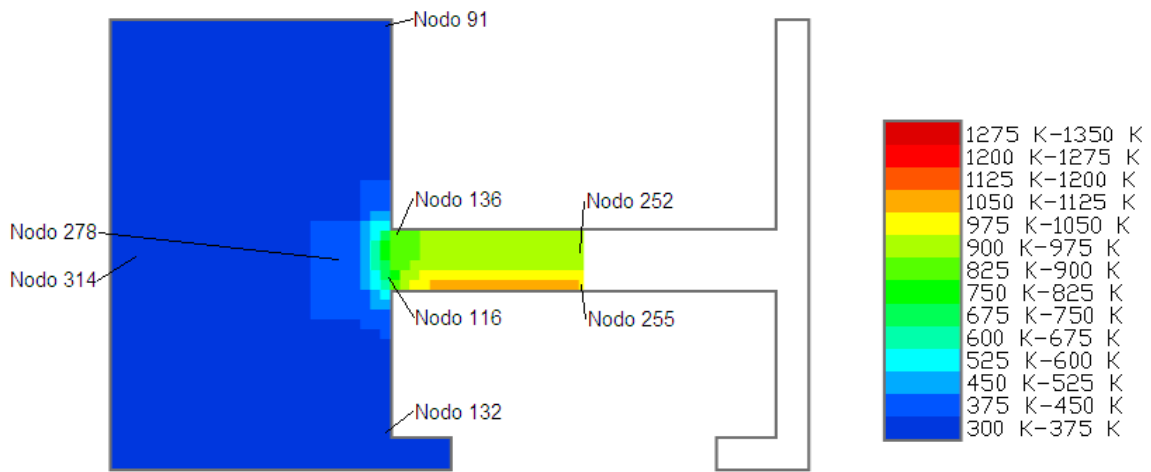


Figura 5.25. Campo de temperaturas resultante para el receptor solar hecho con material refractario en su totalidad, en segundos; para una inclinación del receptor de 30 grados con respecto a la horizontal

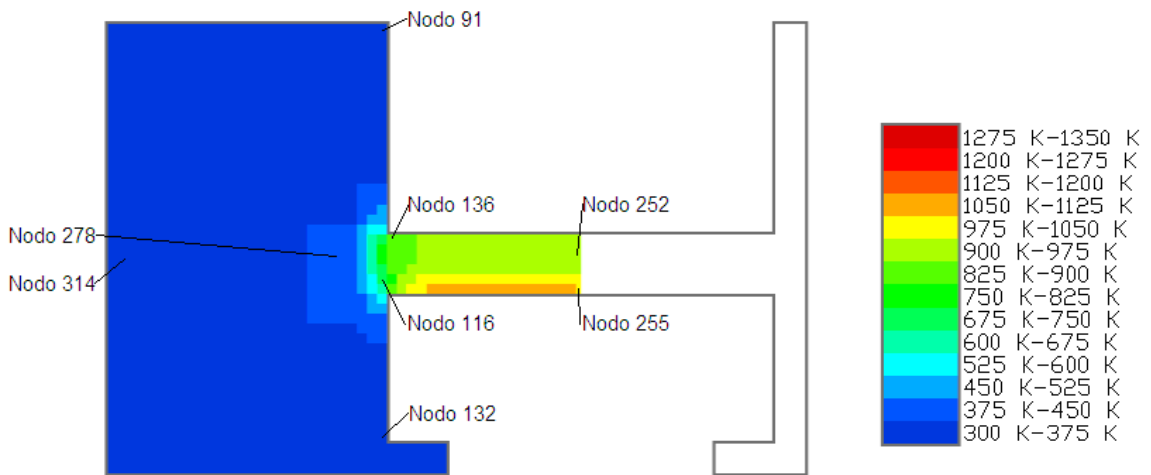


Figura 5.26. Campo de temperaturas resultante para el receptor solar hecho con material refractario en su totalidad, en segundos; para una inclinación del receptor de 45 grados con respecto a la horizontal

Al observar los campos de temperatura se hacen evidentes gradientes de temperatura más importantes en el refractario que en cualquier otro material para nodos

que se encuentran más cercanos entre sí; es muy notoria la poca difusión térmica que posee el crisol hecho de material refractario.

Aún, la baja conductividad térmica del refractario no permite que el aluminio obtenga calor fácilmente cuando se le compara con los materiales metálicos, ya que se registraron tiempos mayores que los que se requieren para un crisol hecho de este material metálico.

Un gradiente mayor de aproximadamente 680 K existe entre el nodo 278 y el nodo 255; lo que convierte al material refractario en una opción poco viable para una aplicación en estas circunstancias.

5.6. Comparación entre los materiales seleccionados.

La tabla 5.1 muestra los tiempos que toman los diferentes crisoles en obtener un calentamiento efectivo, así como la posición sobre el eje focal por encima del punto focal a la que debieron colocarse:

Tabla 5.1. Distancias del punto focal y tiempos para obtener temperatura de fusión del aluminio				
Material	Posición del receptor [m]	Tiempo [s] 0 grad.	Tiempo [s] 30 grad.	Tiempo [s] 45 grad.
Acero al carbono 1018	0.025	2212	2210	2226
Acero inoxidable 316	0.045	1253	1249	1269
INCONEL 625LCF	0.045	889	886	900
Arcilla refractaria	0.08	1162	1157	1206

La tabla 5.1 permite comparar las condiciones en las que cada material permite fundir aluminio con el criterio establecido del calentamiento efectivo.

Debido a la su alta conductividad térmica, el acero al carbono 1018 es el material que requiere acercarse más al punto focal del concentrador solar de tipo plato parabólico que es objeto del sistema. Esto se debe a que el calor se difunde rápidamente

en todo el material, permitiendo inclusive que el material refractario que rodea al crisol, resulte en un calentamiento más uniforme de todo el receptor, logrando menores gradientes de temperatura pero provocando mayores pérdidas convectivas y demandando mayores periodos de tiempo para llegar al calentamiento efectivo. Es entonces que el receptor solar con crisol de acero al carbono 1018 necesita una mayor concentración solar.

Debido a que el INCONEL 625LCF y el acero inoxidable 316 son aleaciones semejantes, presentan propiedades termofísicas muy parecidas que plantean campos de temperatura con distribuciones sumamente parecidas. Inclusive ambos casos de receptores que contengan un crisol de INCONEL 625LCF o de acero inoxidable 316 deben localizarse a la misma distancia del punto focal del concentrador solar. Por supuesto existen diferencias en sus propiedades termofísicas que finalmente discriminan un material de estos, dejando aparte aun la resistencia mecánica que presente cada uno de ellos. El INCONEL 625LCF posee conductividad térmica y capacidad calorífica apenas menores que las del acero inoxidable 316, diferencia que a juzgar por los resultados permite enunciar lo siguiente:

El receptor que contiene el crisol de INCONEL 625LCF logra calentamientos efectivos del aluminio en tiempos menores para una misma magnitud de concentración solar, justamente porque su menor difusividad térmica impide que el calor permee a las paredes del receptor y esto propicie pérdidas convectivas. Esta diferencia pequeña en sus propiedades termofísicas provee una diferencia de tiempo importante dando ventaja al INCONEL 625LCF.

El INCONEL 625LCF tiene también una capacidad calorífica apenas menor que la del acero inoxidable 316 que junto a la propiedad termofísica anterior, provoca gradientes de temperatura un poco mayores en el INCONEL 625LCF (325 K contra 300K del acero inoxidable 316). Esto le puede ocasionar mayor esfuerzo térmico al INCONEL 625LCF, sin embargo, al tratarse de una aleación especialmente diseñada para aplicaciones térmicas en las que el material mantiene su resistencia mecánica a elevadas temperaturas, hace esta ventaja del acero inoxidable prácticamente nula.

En aplicaciones similares donde sea necesario obtener ventaja en el tiempo, el INCONEL 625LCF resulta por supuesto tanto más recomendable.

Por su parte, cuando se plantea el material refractario (cerámico) como constituyente único del receptor, destacan características producto de las propiedades termofísicas del material. Los materiales cerámicos como la arcilla refractaria poseen bajas conductividades térmicas y capacidades caloríficas. Estas propiedades provocan que el material difunda poco calor dentro de sí y que se incurra en bajas pérdidas convectivas, además de que se requiera menor concentración solar para su calentamiento (0.08 m sobre la distancia focal), sin embargo, es esta misma conductividad térmica baja la que le impide proporcionar al aluminio la cantidad necesaria de calor para lograr el calentamiento efectivo siendo evidentemente aventajado por el INCONEL 625LCF. Por su parte, la baja capacidad calorífica permite pensar que en caso de presentarse un breve periodo de nubosidad, el material refractario resulte ser el menos aventajado al ser objeto de un menor almacenamiento de calor. El material refractario presenta los gradientes de temperatura más grandes, que al lado de su fragilidad representa un material no considerable para ésta aplicación.

Ante las diferentes inclinaciones que adopta el receptor, en todos los casos se obtiene menor tiempo necesario para obtener calentamiento efectivo del aluminio para un ángulo de 30 grados respecto a la horizontal, posteriormente a 0 grados y por último a 45 grados ya que este último plantea la mayor cantidad de pérdidas convectivas. Sin embargo en la tabla 5.2 se presentan los gradientes de temperatura entre los nodos 116 y 255 para los diferentes materiales a las diferentes inclinaciones.

Tabla 5.2. Dif. de temperatura entre el nodo 116 y 255 para cada material.
Incl. de 0, 30 y 45 grados.

Material	Incl. de 0 grados	Incl. de 30 grados	Incl. de 45 grados
Acero al carbono 1018	274.33 K	274.32 K	274.01 K
Acero inoxidable 316	269.21 K	269.3 K	268.58 K
INCONEL 625LCF	293.62 K	293.73 K	292.94 K
Arcilla refractaria	343.92 K	343.98 K	341.83 K

De los resultados presentados en la tabla 5.2 es posible enunciar que no existen gradientes significativos para estos casos, no obstante se puede observar que dado que los tiempos son mayores para las pérdidas convectivas a 45 grados se generan menores gradientes de temperatura debido que existe un tiempo que aunque residual permite mayor difusión térmica. Posteriormente, el ángulo más aventajado en

cuanto a menores gradientes, es el de 0 grados con sus tiempos intermedios de obtención. Y por último la inclinación de 30 grados, genera los mayores gradientes de temperatura planteando los calentamientos más veloces.

Dadas las anteriores características, presentadas por los diferentes materiales en su desempeño en este sistema, es posible observar lo siguiente:

- El INCONEL 625LCF resulta ser el mejor material, pues aunque sus gradientes de temperatura son ligeramente mayores que los del acero 316 y mayores que las del acero al carbono 1018 las propiedades mecánicas consistentes a altas temperaturas (dadas por el fabricante) terminan por definirlo como el mejor material para esta aplicación, además de que obtiene el calentamiento efectivo del aluminio a mayor velocidad, superando incluso a la arcilla refractaria que plantea las menores pérdidas convectivas, debido a que el INCONEL 625LCF posee una conductividad térmica mucho mayor.
- Posteriormente, al obtener los menores gradientes de temperatura, así como obtener el siguiente tiempo más veloz para obtener la temperatura efectiva de calentamiento del aluminio, el acero inoxidable 316 se propone como la siguiente mejor opción para ésta aplicación. Esto no debe resultar una sorpresa, ya que se trata del material cuyas características son las más parecidas al INCONEL 625LCF. Cabe destacar por consiguiente que se trata de una aleación más rica que la del acero al carbono 1018, lo que brinda la posibilidad de tratarse de un material que permita un mayor número de ensayos de fusión de aluminio.
- Posteriormente, aunque el acero al carbono obtiene los tiempos mayores para el calentamiento efectivo del aluminio, representa una opción superior en seguridad en tanto que los gradientes obtenidos por el material metálico son considerablemente menores. El acero al carbono 1018 representa un material con mejores propiedades mecánicas que la arcilla refractaria, y su respuesta ante los esfuerzos térmicos es de una resistencia mayor.

- El material refractario, prácticamente se invalida por sí solo para la aplicación en tanto que al ser un material frágil, desarrolla los gradientes térmicos mayores pudiera presentarse una fractura inminente en el material.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Las limitaciones que tiene el modelo en el análisis que se presenta, hacen a los resultados limitados en su precisión, particularmente en los campos de temperatura; esto es debido a que la discretización de la ecuación de difusión de calor se ha llevado a cabo en coordenadas rectangulares y describen una geometría sin curvatura por consiguiente.

Sin embargo, los campos de temperatura obtenidos han sido de completa utilidad para la selección de materiales que aquí se presenta, puesto que el modelo generó simulaciones consistentes en sus diferentes resultados según las propiedades de transporte de cada uno de los materiales. Haciendo referencia a esto, es la difusividad térmica la propiedad que determina los campos de temperatura del receptor, la concentración solar requerida (según colocación del receptor) y los tiempos en los que se obtiene un calentamiento efectivo del aluminio.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo 5, se ha podido evaluar el desempeño térmico en el receptor solar. Se ha realizado la selección de los materiales más adecuados, los cuales se proponen como opciones para fundir aluminio mediante alta concentración solar.

De esta forma, habiendo llevado a cabo la simulación del proceso de transferencia de calor, el cual involucra los mecanismos de radiación, conducción y convección para el receptor solar en el crisol (donde se obtiene aluminio fundido) se enuncian

las siguientes conclusiones:

Un sistema de concentración solar de disco parabólico de 2 m de diámetro, proporciona la magnitud de concentración solar requerida por un receptor solar de cavidad para fundir, en este caso, una muestra de aluminio.

Se ha comprobado que mientras más cerca del punto focal se encuentre el receptor, más abrupto será el calentamiento del material del crisol, dando lugar a mayores gradientes de temperatura, poniendo en riesgo el adecuado funcionamiento del sistema de concentración solar al dañar el material del receptor, ya que estos gradientes de temperatura someten a los materiales a esfuerzos térmicos.

Ante las diferentes inclinaciones propuestas para el receptor de cavidad inferior con respecto a la horizontal, se demuestra que la inclinación de 45 grados, proporciona mayores pérdidas convectivas, posteriormente una inclinación de 0 grados plantea pérdidas convectivas medianas y finalmente la inclinación de 30 grados restringe en mayor medida las pérdidas de calor.

Las diferentes inclinaciones no proporcionan ventajas significativas para un mismo material, sin embargo, se debe notar que a una inclinación que propicie mayores pérdidas convectivas, retrasa los tiempos en que se obtiene la temperatura efectiva de fusión del aluminio. Pero por otra parte brinda al material la oportunidad de difundir calor, permitiendo menores gradientes de temperatura.

Es altamente probable que la concentración de energía solar, afecte al receptor fabricado completamente de material refractario (cerámico), ya que por sus propiedades termofísicas es objeto de mayores gradientes térmicos, aumentando significativamente la probabilidad de ser dañado en tanto que estos materiales son generalmente frágiles.

A pesar de que el crisol de acero al carbono necesita acercarse mucho al punto focal del concentrador (0.025 m), su alta conductividad térmica le permite disipar calor rápidamente mediante la conducción. Sin embargo, debido a su composición química, es posible que este material se degrade rápidamente por corrosión del acero debido a que al estar sometido a altas temperaturas la oxidación será muy importante.

Entre los materiales metálicos, mientras mayor sea su conductividad térmica se logra una mejor difusión y con ello un calentamiento más uniforme disminuyendo los gradientes térmicos. No obstante esto incide en requerir mayores tiempos para obtener las temperaturas deseadas. Un material como el INCONEL 625LCF proporciona un equilibrio de las propiedades termofísicas requeridas, las cuales le permiten difundir mejor el calor, disminuyendo por consiguiente los gradientes térmicos.

Los materiales cerámicos comunes como la arcilla refractaria, que son altamente empleados a nivel industrial para la fundición de metales, resultan ser los menos adecuados cuando se requiere de un dispositivo de menor dimensión, debido a la esta restricción de las dimensiones adecuadas que le permiten ser empleado en un sistema de concentración solar de foco puntual, donde reside la susceptibilidad de encontrarse sometido a esfuerzos que puedan fracturarlo.

Por lo tanto, bajo estos criterios, los materiales quedan ordenados de la siguiente manera comenzando con el mejor material para la construcción del crisol:

1. INCONEL 625LCF
2. Acero inoxidable 316
3. Acero al carbono 1018
4. Arcilla refractaria

Recomendaciones para trabajos posteriores

Es importante llevar a cabo posteriormente, un análisis de los esfuerzos térmicos que experimentan los materiales al momento del suministro de la radiación solar concentrada, y que de esta forma se puedan obtener resultados estructurales en los materiales.

Otros materiales pudieran ser considerados, para la evaluación de aplicaciones como la fundición de metales, con el fin de proporcionar mejores opciones que incluyan materiales de nueva generación.

Apéndice A

Programa de Matlab (M.R.) para cálculo de los campos de temperatura en la sección del crisol en estado transitorio.

```
fprintf('\nPrograma para el cálculo del campo bidimensional de temperaturas en un
receptor solar de cavidad inferior ');
fprintf('\nen calentamiento efectivo de Al, con el método de diferencias finitas.\n\n');
clear T; %Se pone toda la matriz de temperaturas en cero.
clear primas; %Limpia las temperaturas del vector "Primas".

%Ingreso de los parámetros de la simulación.
%Ingreso de la distancia del receptor al punto focal del concentrador,
%sobre el eje focal.
while(1)
    cms=input('Ingrese por favor la distancia del foco [sólo: 2 2.5 3 3.5 4 4.5
5 5.5 6 7 8 10] (cm): '); %Ingreso de la distancia del foco.
    if ((cms==2)||(cms==2.5)||(cms==3)||(cms==3.5)||(cms==4)||(cms==4.5)||(cms==5)||
(cms==5.5)||(cms==6)||(cms==7)||(cms==8)||(cms==10))
        break
    else
        fprintf('\n¡Error! Sólo se puede calcular para distancias ');
        fprintf('\ndel punto focal de 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 10
cm.\n\n');
    end
end
%Ingreso del intervalo de tiempo en segundos.
while(1)
    dt=input('Ingrese por favor el diferencial de tiempo (seg): ');
    if dt>0
        break
    else
        fprintf('\n¡Error! No se puede calcular con ese diferencial de tiempo.\n\n');
    end
end
%Ingreso del tiempo máximo para la fusión en minutos.
while(1)
```

```

tmax=input('Ingrese por favor el tiempo máximo para la fusión (min): ');
if tmax>0
    break
else
    fprintf('\n¡ERROR! No se puede tener ese tiempo máximo para la fusión.\n\n');
end
end
%Ingreso del material del crisol en el receptor.
while(1)
    mat=input('Elija por favor el material interno del receptor [1:Inconel 2:Refractario
3:Ac. al carbón 4:Inox]: ');
    if ((mat==1)||(mat==2)||(mat==3)||(mat==4))
        break
    else
        fprintf('\n¡ERROR! Los materiales para el crisol interno en el receptor van
de 1 a 4.\n\n');
    end
end
%Ingreso del intervalo de confianza.
while(1)
    Tol=input('Ingrese por favor el intervalo de confianza (%): ');
    if ((Tol>=100)||(Tol<=0))
        fprintf('\n¡ERROR! No se puede alcanzar ese intervalo de confianza.\n');
    else
        break
    end
end
if (Tol<95)
    fprintf('\n¡WARNING! Intervalo de confianza bajo.\nEs posible que no se logre la
fusión satisfactoriamente.\n')
end
%Ingreso del ángulo de inclinación del receptor.
while(1)
    ang=input('Elija el ángulo de inclinación del receptor [1:0° 2:15° 3:30° 4:45° 5:60°]: ');
    if ((ang==1)||(ang==2)||(ang==3)||(ang==4)||(ang==5))
        break
    else
        fprintf('\n¡ERROR! Por favor limite su selección a las que se presentan.\n\n');
    end
end
end

IT=1; %Número de iteraciones del cálculo de las temperaturas.
NP=0; %Bandera que indica que el vector de de Temperaturas Primas entra en acción.
ii=1; %Juego de contadores.
Tp0=300*ones(318,1); %Temperaturas ambientales (iniciales).
primas0=zeros(3*20,1); %Temperaturas "primas" iniciales.
check=zeros(3*20,1); %Vector Check.
T=Tp0; %Se asigna como primera columna las temperaturas ambiente.

primas=primas0; %Se asigna como primera columna las temperaturas "primas".
primasp=primas0;%Se asigna como primera columna las temperaturas "primasp".

dx=0.001667; %Dimensión del área discreta.
lambda=388; %Calor latente de fusión del aluminio por unidad de masa kJ/kg.
nn=5; %Cinco nodos de aislante.

```

```

%% Propiedades termofísicas de los materiales.
%
%
%Proceso selectivo de las densidades de los materiales.
ROA=2702;%Densidad del aluminio puro [kg/m3].
if (mat==1)
    ROI=8440;%Densidad del Inconel.
end
if (mat==2)
    ROI=2050;%Todo el crisol está hecho de cerámico.
end
if (mat==3)
    ROI=7854;%Densidad del acero al carbón [kg/m3].
end
if (mat==4)
    ROI=8238;%Densidad del acero inoxidable [kg/m3].
end

ROR=2050;%Densidad del material refractario [kg/m3].
%
RTC=2.75E-4;%Resistencia térmica de contacto con aire como fluido de contacto.

%Ingreso de los flujos de calor [W/m2]. Revisados, las concentraciones son correctas
de acuerdo a las gráficas.
%
%Flujos de calor a 2 centímetros del foco, considerando el concentrador de
%70° de apertura. Potencias promediadas.
if cms==2
    q141 = 278.2E3;
    q147 = 278.2E3;
    q153 = 339.6E3;
    q159 = 339.6E3;
    q165 = 415.85E3;
    q171 = 415.85E3;
    q177 = 509.2E3;
    q183 = 509.2E3;
    q189 = 658.4E3;
    q195 = 658.4E3;
    q201 = 801.6E3;
    q207 = 801.6E3;
    q213 = 1013.2E3;
    q219 = 1013.2E3;
    q225 = 1153E3;
    q231 = 1153E3;
    q237 = 1358.4E3;
    q243 = 1358.4E3;
    q249 = 1438E3;
    q255 = 1438E3;
end

%Flujos de calor a 2.5 centímetros del foco, considerando el plato a 70°.
if cms==2.5
    q141=281.59E3;
    q147=281.59E3;
    q153=324.80E3;
    q159=324.80E3;

```

```
q165=398.93E3;
q171=398.93E3;
q177=449.96E3;
q183=449.96E3;
q189=538.61E3;
q195=538.61E3;
q201=595.23E3;
q207=595.23E3;
q213=698.40E3;
q219=698.40E3;
q225=767.31E3;
q231=767.31E3;
q237=828.03E3;
q243=828.03E3;
q249=856.71E3;
q255=856.71E3;
end

%Flujos de calor a 3 centímetros del foco.
if cms==3
    q141 = 262E3;
    q147 = 262E3;
    q153 = 288.58E3;
    q159 = 288.58E3;
    q165 = 319.24E3;
    q171 = 319.24E3;
    q177 = 373.07E3;
    q183 = 373.07E3;
    q189 = 428.39E3;
    q195 = 428.39E3;
    q201 = 450.08E3;
    q207 = 450.08E3;
    q213 = 478.86E3;
    q219 = 478.86E3;
    q225 = 536.43E3;
    q231 = 536.43E3;
    q237 = 547.27E3;
    q243 = 547.27E3;
    q249 = 553.25E3;
    q255 = 553.25E3;
end

%Flujos de calor a 3.5 centímetros del foco.
if cms==3.5
    q141 = 235E3;
    q147 = 235E3;
    q153 = 240.59E3;
    q159 = 240.59E3;
    q165 = 261.86E3;
    q171 = 261.86E3;
    q177 = 296.55E3;
    q183 = 296.55E3;
    q189 = 330.86E3;
    q195 = 330.86E3;
    q201 = 345.79E3;
    q207 = 345.79E3;
```

```
q213 = 365.93E3;
q219 = 365.93E3;
q225 = 377.12E3;
q231 = 377.12E3;
q237 = 399.50E3;
q243 = 399.50E3;
q249 = 420.76E3;
q255 = 420.76E3;
end

%Flujos de calor a 4 centímetros del foco.
if cms==4
    q141=196.75E3;
    q147=196.75E3;
    q153=193.77E3;
    q159=193.77E3;
    q165=215.76E3;
    q171=215.76E3;
    q177=257.12E3;
    q183=257.12E3;
    q189=270.54E3;
    q195=270.54E3;
    q201=263.46E3;
    q207=263.46E3;
    q213=289.9E3;
    q219=289.9E3;
    q225=292.9E3;
    q231=292.9E3;
    q237=301.84E3;
    q243=301.84E3;
    q249=301.84E3;
    q255=301.84E3;
end

%Flujos de calor a 4.5 centímetros del foco.
if cms==4.5
    q141=148.93E3;
    q147=148.93E3;
    q153=169.78E3;
    q159=169.78E3;
    q165=192.87E3;
    q171=192.87E3;
    q177=199.57E3;
    q183=199.57E3;
    q189=214.09E3;
    q195=214.09E3;
    q201=226.75E3;
    q207=226.75E3;
    q213=212.60E3;
    q219=212.60E3;
    q225=233.45E3;
    q231=233.45E3;
    q237=229.73E3;
    q243=229.73E3;
    q249=244.25E3;
    q255=244.25E3;
```

end

%Flujos de calor a 5 centímetros del foco.

if cms==5

```
q141=134.91E3;
q147=134.91E3;
q153=151.31E3;
q159=151.31E3;
q165=156.90E3;
q171=156.90E3;
q177=162.86E3;
q183=162.86E3;
q189=175.91E3;
q195=175.91E3;
q201=186.34E3;
q207=186.34E3;
q213=172.55E3;
q219=172.55E3;
q225=184.11E3;
q231=184.11E3;
q237=183.36E3;
q243=183.36E3;
q249=192.31E3;
q255=192.31E3;
```

end

%Flujos de calor a 5.5 centímetros del foco.

if cms==5.5

```
q141=124.26E3;
q147=124.26E3;
q153=141.05E3;
q159=141.05E3;
q165=133.22E3;
q171=133.22E3;
q177=151.88E3;
q183=151.88E3;
q189=139.93E3;
q195=139.93E3;
q201=142.17E3;
q207=142.17E3;
q213=141.80E3;
q219=141.80E3;
q225=151.50E3;
q231=151.50E3;
q237=152.25E3;
q243=152.25E3;
q249=147.02E3;
q255=147.02E3;
```

end

%Flujos de calor a 6 centímetros del foco.

if cms==6

```
q141=114.98E3;
q147=114.98E3;
q153=99.30E3;
```

```
q159=99.30E3;
q165=129.17E3;
q171=129.17E3;
q177=120.58E3;
q183=120.58E3;
q189=122.45E3;
q195=122.45E3;
q201=115.36E3;
q207=115.36E3;
q213=121.70E3;
q219=121.70E3;
q225=124.69E3;
q231=124.69E3;
q237=125.44E3;
q243=125.44E3;
q249=121.70E3;
q255=121.70E3;
end

%Flujos de calor a 7 centímetros del foco.
if cms==7
    q141=77.40E3;
    q147=77.40E3;
    q153=92.35E3;
    q159=92.35E3;
    q165=96.84E3;
    q171=96.84E3;
    q177=84.13E3;
    q183=84.13E3;
    q189=84.50E3;
    q195=84.50E3;
    q201=91.23E3;
    q207=91.23E3;
    q213=94.97E3;
    q219=94.97E3;
    q225=86.75E3;
    q231=86.75E3;
    q237=91.61E3;
    q243=91.61E3;
    q249=83.01E3;
    q255=83.01E3;
end

%Flujos de calor a 8 centímetros del foco.
if cms==8
    q141=71.95E3;
    q147=71.95E3;
    q153=65.24E3;
    q159=65.24E3;
    q165=70.08E3;
    q171=70.08E3;
    q177=67.85E3;
    q183=67.85E3;
    q189=66.35E3;
    q195=66.35E3;
    q201=61.51E3;
```

```
q207=61.51E3;
q213=71.95E3;
q219=71.95E3;
q225=67.85E3;
q231=67.85E3;
q237=67.85E3;
q243=67.85E3;
q249=58.90E3;
q255=58.90E3;
end

%Flujos de calor a 10 centímetros del foco.
if cms==10
    q141=47.40E3;
    q147=47.40E3;
    q153=48.52E3;
    q159=48.52E3;
    q165=40.68E3;
    q171=40.68E3;
    q177=44.79E3;
    q183=44.79E3;
    q189=46.65E3;
    q195=46.65E3;
    q201=40.68E3;
    q207=40.68E3;
    q213=48.89E3;
    q219=48.89E3;
    q225=40.68E3;
    q231=40.68E3;
    q237=39.19E3;
    q243=39.19E3;
    q249=32.84E3;
    q255=32.84E3;
end

%Ciclo de cálculo para el campo de temperatura.
while(1)
    CPT=ones(318,1);%Genera el vector de capacidades caloríficas.
    KT=ones(318,1);%Genera el vector de conductividades térmicas.

    %Asigna el valor que le corresponde a las propiedades termofísicas como
    %función de la temperatura.
    %Material:INCONEL 625LCF
    if (mat==1)
        for ii=1:1:135
            CPT(ii)=0.2471*T(ii,end)+337.05;
            KT(ii)=0.0148*T(ii,end)+5.3972;
        end
        %Sección con contenido de aluminio.
        for ii=136:6:250
            if(T(ii,end)<400)
                CPT(ii)=903;
                KT(ii)=237;
            end
            if((T(ii,end)>=400)&&(T(ii,end)<600))
```

```

        CPT(ii)=949;
        KT(ii)=240;
    end
    if((T(ii,end)>=600)&&(T(ii,end)<800))
        CPT(ii)=1033;
        KT(ii)=231;
    end
    if(T(ii,end)>=800)
        CPT(ii)=1146;
        KT(ii)=218;
    end
    if(T(ii+1,end)<400)
        CPT(ii+1)=903;
        KT(ii+1)=237;
    end
    if((T(ii+1,end)>=400)&&(T(ii+1,end)<600))
        CPT(ii+1)=949;
        KT(ii+1)=240;
    end
    if((T(ii+1,end)>=600)&&(T(ii+1,end)<800))
        CPT(ii+1)=1033;
        KT(ii+1)=231;
    end
    if(T(ii+1,end)>=800)
        CPT(ii+1)=1146;
        KT(ii+1)=218;
    end
    if(T(ii+2,end)<400)
        CPT(ii+2)=903;
        KT(ii+2)=237;
    end
    if((T(ii+2,end)>=400)&&(T(ii+2,end)<600))
        CPT(ii+2)=949;
        KT(ii+2)=240;
    end
    if((T(ii+2,end)>=600)&&(T(ii+2,end)<800))
        CPT(ii+2)=1033;
        KT(ii+2)=231;
    end
    if(T(ii+2,end)>=800)
        CPT(ii+2)=1146;
        KT(ii+2)=218;
    end
    CPT(ii+3)=0.2471*T(ii+3,end)+337.05;
    KT(ii+3)=0.0148*T(ii+3,end)+5.3972;
    CPT(ii+4)=0.2471*T(ii+4,end)+337.05;
    KT(ii+4)=0.0148*T(ii+4,end)+5.3972;
    CPT(ii+5)=0.2471*T(ii+5,end)+337.05;
    KT(ii+5)=0.0148*T(ii+5,end)+5.3972;
end
for ii=256:1:274
    %Nodos de INCONEL de la parte inferior de la cavidad.
    CPT(ii)=0.2471*T(ii,end)+337.05;
    KT(ii)=0.0148*T(ii,end)+5.3972;
end
%Propiedades termofisicas para el refractario.

```

```

for ii=274:1:318
    CPT(ii)=2050;
    if(T(ii ,end)<1072)
        KT(ii)=1;
    else
        KT(ii)=1.1;
    end
end
end
%Termina asignación if (mat==1)

%Asigna el valor que le corresponde a las propiedades termofísicas como
%función de la temperatura.
%Material: Arcilla refractaria.
if(mat==2)
    for ii=1:1:135
        CPT(ii)=2050;
        if(T(ii ,end)<1072)
            KT(ii)=1;
        else
            KT(ii)=1.1;
        end
    end
    %Sección con contenido de aluminio.
    for ii=136:6:250
        if(T(ii ,end)<400)
            CPT(ii)=903;
            KT(ii)=237;
        end
        if((T(ii ,end)>=400)&&(T(ii ,end)<600))
            CPT(ii)=949;
            KT(ii)=240;
        end
        if((T(ii ,end)>=600)&&(T(ii ,end)<800))
            CPT(ii)=1033;
            KT(ii)=231;
        end
        if(T(ii ,end)>=800)
            CPT(ii)=1146;
            KT(ii)=218;
        end
        if(T(ii+1,end)<400)
            CPT(ii+1)=903;
            KT(ii+1)=237;
        end
        if((T(ii+1,end)>=400)&&(T(ii+1,end)<600))
            CPT(ii+1)=949;
            KT(ii+1)=240;
        end
        if((T(ii+1,end)>=600)&&(T(ii+1,end)<800))
            CPT(ii+1)=1033;
            KT(ii+1)=231;
        end
        if(T(ii+1,end)>=800)
            CPT(ii+1)=1146;
        end
    end
end

```

```

        KT(ii+1)=218;
    end
    if(T(ii+2,end)<400)
        CPT(ii+2)=903;
        KT(ii+2)=237;
    end
    if((T(ii+2,end)>=400)&&(T(ii+2,end)<600))
        CPT(ii+2)=949;
        KT(ii+2)=240;
    end
    if((T(ii+2,end)>=600)&&(T(ii+2,end)<800))
        CPT(ii+2)=1033;
        KT(ii+2)=231;
    end
    if(T(ii+2,end)>=800)
        CPT(ii+2)=1146;
        KT(ii+2)=218;
    end
    CPT(ii+3)=2050;
    if(T(ii+3,end)<1072)
        KT(ii+3)=1;
    else
        KT(ii+3)=1.1;
    end
    CPT(ii+4)=2050;
    if(T(ii+4,end)<1072)
        KT(ii+4)=1;
    else
        KT(ii+4)=1.1;
    end
    CPT(ii+5)=2050;
    if(T(ii+5,end)<1072)
        KT(ii+5)=1;
    else
        KT(ii+5)=1.1;
    end
end
for ii=256:1:318
    CPT(ii)=2050;
    if(T(ii,end)<1072)
        KT(ii)=1;
    else
        KT(ii)=1.1;
    end
end
end
%Termina asignación de propiedades termofísicas para los el receptor de
%refracio.

%Asigna el valor que le corresponde a las propiedades termofísicas como
%función de la temperatura.
%Material: Acero al carbón 1018.
if(mat==3)
    for ii=1:1:135
        %Asigna las capacidades caloríficas según la temperatura.
        if(T(ii,end)<400)

```

```
        CPT(ii)=447;
        KT(ii)=60.5;
    end
    if((T(ii,end)>=400)&&(T(ii,end)<600))
        CPT(ii)=487;
        KT(ii)=56.7;
    end
    if((T(ii,end)>=600)&&(T(ii,end)<800))
        CPT(ii)=559;
        KT(ii)=48;
    end
    if((T(ii,end)>=800)&&(T(ii,end)<1000))
        CPT(ii)=685;
        KT(ii)=39.2;
    end
    if(T(ii,end)>=1000)
        CPT(ii)=1169;
        KT(ii)=30;
    end
end
%Sección con contenido de aluminio.
for ii=136:1:250
    if(T(ii,end)<400)
        CPT(ii)=903;
        KT(ii)=237;
    end
    if((T(ii,end)>=400)&&(T(ii,end)<600))
        CPT(ii)=949;
        KT(ii)=240;
    end
    if((T(ii,end)>=600)&&(T(ii,end)<800))
        CPT(ii)=1033;
        KT(ii)=231;
    end
    if(T(ii,end)>=800)
        CPT(ii)=1146;
        KT(ii)=218;
    end
    if(T(ii+1,end)<400)
        CPT(ii+1)=903;
        KT(ii+1)=237;
    end
    if((T(ii+1,end)>=400)&&(T(ii+1,end)<600))
        CPT(ii+1)=949;
        KT(ii+1)=240;
    end
    if((T(ii+1,end)>=600)&&(T(ii+1,end)<800))
        CPT(ii+1)=1033;
        KT(ii+1)=231;
    end
    if(T(ii+1,end)>=800)
        CPT(ii+1)=1146;
        KT(ii+1)=218;
    end
    if(T(ii+2,end)<400)
        CPT(ii+2)=903;
```

```
        KT(ii+2)=237;
    end
    if ((T(ii+2,end)>=400)&&(T(ii+2,end)<600))
        CPT(ii+2)=949;
        KT(ii+2)=240;
    end
    if ((T(ii+2,end)>=600)&&(T(ii+2,end)<800))
        CPT(ii+2)=1033;
        KT(ii+2)=231;
    end
    if (T(ii+2,end)>=800)
        CPT(ii+2)=1146;
        KT(ii+2)=218;
    end
    end
    %Los siguientes nodos pertenecen al acero al carbón.
    if (T(ii+3,end)<400)
        CPT(ii+3)=447;
        KT(ii+3)=60.5;
    end
    if ((T(ii+3,end)>=400)&&(T(ii+3,end)<600))
        CPT(ii+3)=487;
        KT(ii+3)=56.7;
    end
    if ((T(ii+3,end)>=600)&&(T(ii+3,end)<800))
        CPT(ii+3)=559;
        KT(ii+3)=48;
    end
    if ((T(ii+3,end)>=800)&&(T(ii+3,end)<1000))
        CPT(ii+3)=685;
        KT(ii+3)=39.2;
    end
    if (T(ii+3,end)>=1000)
        CPT(ii+3)=1169;
        KT(ii+3)=30;
    end
    end
    if (T(ii+4,end)<400)
        CPT(ii+4)=447;
        KT(ii+4)=60.5;
    end
    if ((T(ii+4,end)>=400)&&(T(ii+4,end)<600))
        CPT(ii+4)=487;
        KT(ii+4)=56.7;
    end
    if ((T(ii+4,end)>=600)&&(T(ii+4,end)<800))
        CPT(ii+4)=559;
        KT(ii+4)=48;
    end
    if ((T(ii+4,end)>=800)&&(T(ii+4,end)<1000))
        CPT(ii+4)=685;
        KT(ii+4)=39.2;
    end
    if (T(ii+4,end)>=1000)
        CPT(ii+4)=1169;
        KT(ii+4)=30;
    end
    end
    if (T(ii+5,end)<400)
```

```

        CPT(ii+5)=447;
        KT(ii+5)=60.5;
    end
    if((T(ii+5,end)>=400)&&(T(ii+5,end)<600))
        CPT(ii+5)=487;
        KT(ii+5)=56.7;
    end
    if((T(ii+5,end)>=600)&&(T(ii+5,end)<800))
        CPT(ii+5)=559;
        KT(ii+5)=48;
    end
    if((T(ii+5,end)>=800)&&(T(ii+5,end)<1000))
        CPT(ii+5)=685;
        KT(ii+5)=39.2;
    end
    if(T(ii+5,end)>=1000)
        CPT(ii+5)=1169;
        KT(ii+5)=30;
    end
end
for ii=256:1:273
    if(T(ii ,end)<400)
        CPT(ii)=447;
        KT(ii)=60.5;
    end
    if((T(ii ,end)>=400)&&(T(ii ,end)<600))
        CPT(ii)=487;
        KT(ii)=56.7;
    end
    if((T(ii ,end)>=600)&&(T(ii ,end)<800))
        CPT(ii)=559;
        KT(ii)=48;
    end
    if((T(ii ,end)>=800)&&(T(ii ,end)<1000))
        CPT(ii)=685;
        KT(ii)=39.2;
    end
    if((T(ii ,end)>=1000))
        CPT(ii)=1169;
        KT(ii)=30;
    end
end
for ii=274:1:318
    CPT(ii)=2050;
    if(T(ii ,end)<1072)
        KT(ii)=1;
    else
        KT(ii)=1.1;
    end
end
end
%Termina asignación de capacidades caloríficas para el receptor
%en cuyo interior el crisol es de acero al carbón.

%Asigna el valor que le corresponde a las propiedades termofísicas como
%función de la temperatura.

```

```
%Material: Acero inoxidable 316.
if (mat==4)
    for ii=1:1:135
        CPT(ii) = -0.0002*(T(ii ,end))^2 + 0.416*T(ii ,end) + 362.36;
        KT(ii) = 0.0153*T(ii ,end) + 8.9683;
    end
    %Sección con contenido de aluminio.
    for ii=136:6:250
        if (T(ii ,end)<400)
            CPT(ii)=903;
            KT(ii)=237;
        end
        if ((T(ii ,end)>=400)&&(T(ii ,end)<600))
            CPT(ii)=949;
            KT(ii)=240;
        end
        if ((T(ii ,end)>=600)&&(T(ii ,end)<800))
            CPT(ii)=1033;
            KT(ii)=231;
        end
        if (T(ii ,end)>=800)
            CPT(ii)=1146;
            KT(ii)=218;
        end
        if (T(ii+1,end)<400)
            CPT(ii+1)=903;
            KT(ii+1)=237;
        end
        if ((T(ii+1,end)>=400)&&(T(ii+1,end)<600))
            CPT(ii+1)=949;
            KT(ii+1)=240;
        end
        if ((T(ii+1,end)>=600)&&(T(ii+1,end)<800))
            CPT(ii+1)=1033;
            KT(ii+1)=231;
        end
        if (T(ii+1,end)>=800)
            CPT(ii+1)=1146;
            KT(ii+1)=218;
        end
        if (T(ii+2,end)<400)
            CPT(ii+2)=903;
            KT(ii+2)=237;
        end
        if ((T(ii+2,end)>=400)&&(T(ii+2,end)<600))
            CPT(ii+2)=949;
            KT(ii+2)=240;
        end
        if ((T(ii+2,end)>=600)&&(T(ii+2,end)<800))
            CPT(ii+2)=1033;
            KT(ii+2)=231;
        end
        if (T(ii+2,end)>=800)
            CPT(ii+2)=1146;
            KT(ii+2)=218;
        end
    end
end
```

```

CPT(ii+3) = -0.0002*(T(ii+3,end))^2 + 0.416*T(ii+3,end) + 362.36;
KT(ii+3) = 0.0153*T(ii+3,end) + 8.9683;
CPT(ii+4) = -0.0002*(T(ii+4,end))^2 + 0.416*T(ii+4,end) + 362.36;
KT(ii+4) = 0.0153*T(ii+4,end) + 8.9683;
CPT(ii+5) = -0.0002*(T(ii+5,end))^2 + 0.416*T(ii+5,end) + 362.36;
KT(ii+5) = 0.0153*T(ii+5,end) + 8.9683;
end
for ii=256:1:274
    %modos de Inox de la parte inferior de la cavidad.
    CPT(ii) = -0.0002*(T(ii,end))^2 + 0.416*T(ii,end) + 362.36;
    KT(ii) = 0.0153*T(ii,end) + 8.9683;
end
for ii=274:1:318
    CPT(ii)=2050;
    if(T(ii,end)<1072)
        KT(ii)=1;
    else
        KT(ii)=1.1;
    end
end
end
%conductividades térmicas para el refractario.
end
%Termina asignación de propiedades termofísicas para el receptor con
%crisol de acero inoxidable 316.

%-----
%Generación de los coeficientes de la matriz M de transferencia de calor.
GI_1=KT(1)*dt/(ROI*CPT(1)*dx^2);
GI_2=KT(2)*dt/(ROI*CPT(2)*dx^2);
GI_3=KT(3)*dt/(ROI*CPT(3)*dx^2);
GI_4=KT(4)*dt/(ROI*CPT(4)*dx^2);
GI_5=KT(5)*dt/(ROI*CPT(5)*dx^2);
GI_6=KT(6)*dt/(ROI*CPT(6)*dx^2);
GI_7=KT(7)*dt/(ROI*CPT(7)*dx^2);
GI_8=KT(8)*dt/(ROI*CPT(8)*dx^2);
GI_9=KT(9)*dt/(ROI*CPT(9)*dx^2);
GI_10=KT(10)*dt/(ROI*CPT(10)*dx^2);
GI_11=KT(11)*dt/(ROI*CPT(11)*dx^2);
GI_12=KT(12)*dt/(ROI*CPT(12)*dx^2);
GI_13=KT(13)*dt/(ROI*CPT(13)*dx^2);
GI_14=KT(14)*dt/(ROI*CPT(14)*dx^2);
GI_15=KT(15)*dt/(ROI*CPT(15)*dx^2);
GI_16=KT(16)*dt/(ROI*CPT(16)*dx^2);
GI_17=KT(17)*dt/(ROI*CPT(17)*dx^2);
GI_18=KT(18)*dt/(ROI*CPT(18)*dx^2);
GI_19=KT(19)*dt/(ROI*CPT(19)*dx^2);
GI_20=KT(20)*dt/(ROI*CPT(20)*dx^2);
GI_21=KT(21)*dt/(ROI*CPT(21)*dx^2);
GI_22=KT(22)*dt/(ROI*CPT(22)*dx^2);
GI_23=KT(23)*dt/(ROI*CPT(23)*dx^2);
GI_24=KT(24)*dt/(ROI*CPT(24)*dx^2);
GI_25=KT(25)*dt/(ROI*CPT(25)*dx^2);
GI_26=KT(26)*dt/(ROI*CPT(26)*dx^2);
GI_27=KT(27)*dt/(ROI*CPT(27)*dx^2);
GI_28=KT(28)*dt/(ROI*CPT(28)*dx^2);
GI_29=KT(29)*dt/(ROI*CPT(29)*dx^2);

```

GI_30=KT(30)*dt/(ROI*CPT(30)*dx^2);
GI_31=KT(31)*dt/(ROI*CPT(31)*dx^2);
GI_32=KT(32)*dt/(ROI*CPT(32)*dx^2);
GI_33=KT(33)*dt/(ROI*CPT(33)*dx^2);
GI_34=KT(34)*dt/(ROI*CPT(34)*dx^2);
GI_35=KT(35)*dt/(ROI*CPT(35)*dx^2);
GI_36=KT(36)*dt/(ROI*CPT(36)*dx^2);
GI_37=KT(37)*dt/(ROI*CPT(37)*dx^2);
GI_38=KT(38)*dt/(ROI*CPT(38)*dx^2);
GI_39=KT(39)*dt/(ROI*CPT(39)*dx^2);
GI_40=KT(40)*dt/(ROI*CPT(40)*dx^2);
GI_41=KT(41)*dt/(ROI*CPT(41)*dx^2);
GI_42=KT(42)*dt/(ROI*CPT(42)*dx^2);
GI_43=KT(43)*dt/(ROI*CPT(43)*dx^2);
GI_44=KT(44)*dt/(ROI*CPT(44)*dx^2);
GI_45=KT(45)*dt/(ROI*CPT(45)*dx^2);
GI_46=KT(46)*dt/(ROI*CPT(46)*dx^2);
GI_47=KT(47)*dt/(ROI*CPT(47)*dx^2);
GI_48=KT(48)*dt/(ROI*CPT(48)*dx^2);
GI_49=KT(49)*dt/(ROI*CPT(49)*dx^2);
GI_50=KT(50)*dt/(ROI*CPT(50)*dx^2);
GI_51=KT(51)*dt/(ROI*CPT(51)*dx^2);
GI_52=KT(52)*dt/(ROI*CPT(52)*dx^2);
GI_53=KT(53)*dt/(ROI*CPT(53)*dx^2);
GI_54=KT(54)*dt/(ROI*CPT(54)*dx^2);
GI_55=KT(55)*dt/(ROI*CPT(55)*dx^2);
GI_56=KT(56)*dt/(ROI*CPT(56)*dx^2);
GI_57=KT(57)*dt/(ROI*CPT(57)*dx^2);
GI_58=KT(58)*dt/(ROI*CPT(58)*dx^2);
GI_59=KT(59)*dt/(ROI*CPT(59)*dx^2);
GI_60=KT(60)*dt/(ROI*CPT(60)*dx^2);
GI_61=KT(61)*dt/(ROI*CPT(61)*dx^2);
GI_62=KT(62)*dt/(ROI*CPT(62)*dx^2);
GI_63=KT(63)*dt/(ROI*CPT(63)*dx^2);
GI_64=KT(64)*dt/(ROI*CPT(64)*dx^2);
GI_65=KT(65)*dt/(ROI*CPT(65)*dx^2);
GI_66=KT(66)*dt/(ROI*CPT(66)*dx^2);
GI_67=KT(67)*dt/(ROI*CPT(67)*dx^2);
GI_68=KT(68)*dt/(ROI*CPT(68)*dx^2);
GI_69=KT(69)*dt/(ROI*CPT(69)*dx^2);
GI_70=KT(70)*dt/(ROI*CPT(70)*dx^2);
GI_71=KT(71)*dt/(ROI*CPT(71)*dx^2);
GI_72=KT(72)*dt/(ROI*CPT(72)*dx^2);
GI_73=KT(73)*dt/(ROI*CPT(73)*dx^2);
GI_74=KT(74)*dt/(ROI*CPT(74)*dx^2);
GI_75=KT(75)*dt/(ROI*CPT(75)*dx^2);
GI_76=KT(76)*dt/(ROI*CPT(76)*dx^2);
GI_77=KT(77)*dt/(ROI*CPT(77)*dx^2);
GI_78=KT(78)*dt/(ROI*CPT(78)*dx^2);
GI_79=KT(79)*dt/(ROI*CPT(79)*dx^2);
GI_80=KT(80)*dt/(ROI*CPT(80)*dx^2);
GI_81=KT(81)*dt/(ROI*CPT(81)*dx^2);
GI_82=KT(82)*dt/(ROI*CPT(82)*dx^2);
GI_83=KT(83)*dt/(ROI*CPT(83)*dx^2);
GI_84=KT(84)*dt/(ROI*CPT(84)*dx^2);
GI_85=KT(85)*dt/(ROI*CPT(85)*dx^2);

```
GI_86=KT(86)*dt/(ROI*CPT(86)*dx^2);
GI_87=KT(87)*dt/(ROI*CPT(87)*dx^2);
GI_88=KT(88)*dt/(ROI*CPT(88)*dx^2);
GI_89=KT(89)*dt/(ROI*CPT(89)*dx^2);
GI_90=KT(90)*dt/(ROI*CPT(90)*dx^2);
GI_91=KT(91)*dt/(ROI*CPT(91)*dx^2);
GI_92=KT(92)*dt/(ROI*CPT(92)*dx^2);
GI_93=KT(93)*dt/(ROI*CPT(93)*dx^2);
GI_94=KT(94)*dt/(ROI*CPT(94)*dx^2);
GI_95=KT(95)*dt/(ROI*CPT(95)*dx^2);
GI_96=KT(96)*dt/(ROI*CPT(96)*dx^2);
GI_97=KT(97)*dt/(ROI*CPT(97)*dx^2);
GI_98=KT(98)*dt/(ROI*CPT(98)*dx^2);
GI_99=KT(99)*dt/(ROI*CPT(99)*dx^2);
GI_100=KT(100)*dt/(ROI*CPT(100)*dx^2);
GI_101=KT(101)*dt/(ROI*CPT(101)*dx^2);
GI_102=KT(102)*dt/(ROI*CPT(102)*dx^2);
GI_103=KT(103)*dt/(ROI*CPT(103)*dx^2);
GI_104=KT(104)*dt/(ROI*CPT(104)*dx^2);
GI_105=KT(105)*dt/(ROI*CPT(105)*dx^2);
GI_106=KT(106)*dt/(ROI*CPT(106)*dx^2);
GI_107=KT(107)*dt/(ROI*CPT(107)*dx^2);
GI_108=KT(108)*dt/(ROI*CPT(108)*dx^2);
GI_109=KT(109)*dt/(ROI*CPT(109)*dx^2);
GI_110=KT(110)*dt/(ROI*CPT(110)*dx^2);
GI_111=KT(111)*dt/(ROI*CPT(111)*dx^2);
GI_112=KT(112)*dt/(ROI*CPT(112)*dx^2);
GI_113=KT(113)*dt/(ROI*CPT(113)*dx^2);
GI_114=KT(114)*dt/(ROI*CPT(114)*dx^2);
GI_115=KT(115)*dt/(ROI*CPT(115)*dx^2);
GI_116=KT(116)*dt/(ROI*CPT(116)*dx^2);
GI_117=KT(117)*dt/(ROI*CPT(117)*dx^2);
GI_118=KT(118)*dt/(ROI*CPT(118)*dx^2);
GI_119=KT(119)*dt/(ROI*CPT(119)*dx^2);
GI_120=KT(120)*dt/(ROI*CPT(120)*dx^2);
GI_121=KT(121)*dt/(ROI*CPT(121)*dx^2);
GI_122=KT(122)*dt/(ROI*CPT(122)*dx^2);
GI_123=KT(123)*dt/(ROI*CPT(123)*dx^2);
GI_124=KT(124)*dt/(ROI*CPT(124)*dx^2);
GI_125=KT(125)*dt/(ROI*CPT(125)*dx^2);
GI_126=KT(126)*dt/(ROI*CPT(126)*dx^2);
GI_127=KT(127)*dt/(ROI*CPT(127)*dx^2);
GI_128=KT(128)*dt/(ROI*CPT(128)*dx^2);
GI_129=KT(129)*dt/(ROI*CPT(129)*dx^2);
GI_130=KT(130)*dt/(ROI*CPT(130)*dx^2);
GI_131=KT(131)*dt/(ROI*CPT(131)*dx^2);
GI_132=KT(132)*dt/(ROI*CPT(132)*dx^2);
GI_133=KT(133)*dt/(ROI*CPT(133)*dx^2);
GI_134=KT(134)*dt/(ROI*CPT(134)*dx^2);
GI_135=KT(135)*dt/(ROI*CPT(135)*dx^2);
GA_136=KT(136)*dt/(ROA*CPT(136)*dx^2);
GA_137=KT(137)*dt/(ROA*CPT(137)*dx^2);
GA_138=KT(138)*dt/(ROA*CPT(138)*dx^2);
GI_139=KT(139)*dt/(ROI*CPT(139)*dx^2);
GI_140=KT(140)*dt/(ROI*CPT(140)*dx^2);
GI_141=KT(141)*dt/(ROI*CPT(141)*dx^2);
```

GA_142=KT(142)*dt/(ROA*CPT(142)*dx^2);
GA_143=KT(143)*dt/(ROA*CPT(143)*dx^2);
GA_144=KT(144)*dt/(ROA*CPT(144)*dx^2);
GI_145=KT(145)*dt/(ROI*CPT(145)*dx^2);
GI_146=KT(146)*dt/(ROI*CPT(146)*dx^2);
GI_147=KT(147)*dt/(ROI*CPT(147)*dx^2);
GA_148=KT(148)*dt/(ROA*CPT(148)*dx^2);
GA_149=KT(149)*dt/(ROA*CPT(149)*dx^2);
GA_150=KT(150)*dt/(ROA*CPT(150)*dx^2);
GI_151=KT(151)*dt/(ROI*CPT(151)*dx^2);
GI_152=KT(152)*dt/(ROI*CPT(152)*dx^2);
GI_153=KT(153)*dt/(ROI*CPT(153)*dx^2);
GA_154=KT(154)*dt/(ROA*CPT(154)*dx^2);
GA_155=KT(155)*dt/(ROA*CPT(155)*dx^2);
GA_156=KT(156)*dt/(ROA*CPT(156)*dx^2);
GI_157=KT(157)*dt/(ROI*CPT(157)*dx^2);
GI_158=KT(158)*dt/(ROI*CPT(158)*dx^2);
GI_159=KT(159)*dt/(ROI*CPT(159)*dx^2);
GA_160=KT(160)*dt/(ROA*CPT(160)*dx^2);
GA_161=KT(161)*dt/(ROA*CPT(161)*dx^2);
GA_162=KT(162)*dt/(ROA*CPT(162)*dx^2);
GI_163=KT(163)*dt/(ROI*CPT(163)*dx^2);
GI_164=KT(164)*dt/(ROI*CPT(164)*dx^2);
GI_165=KT(165)*dt/(ROI*CPT(165)*dx^2);
GA_166=KT(166)*dt/(ROA*CPT(166)*dx^2);
GA_167=KT(167)*dt/(ROA*CPT(167)*dx^2);
GA_168=KT(168)*dt/(ROA*CPT(168)*dx^2);
GI_169=KT(169)*dt/(ROI*CPT(169)*dx^2);
GI_170=KT(170)*dt/(ROI*CPT(170)*dx^2);
GI_171=KT(171)*dt/(ROI*CPT(171)*dx^2);
GA_172=KT(172)*dt/(ROA*CPT(172)*dx^2);
GA_173=KT(173)*dt/(ROA*CPT(173)*dx^2);
GA_174=KT(174)*dt/(ROA*CPT(174)*dx^2);
GI_175=KT(175)*dt/(ROI*CPT(175)*dx^2);
GI_176=KT(176)*dt/(ROI*CPT(176)*dx^2);
GI_177=KT(177)*dt/(ROI*CPT(177)*dx^2);
GA_178=KT(178)*dt/(ROA*CPT(178)*dx^2);
GA_179=KT(179)*dt/(ROA*CPT(179)*dx^2);
GA_180=KT(180)*dt/(ROA*CPT(180)*dx^2);
GI_181=KT(181)*dt/(ROI*CPT(181)*dx^2);
GI_182=KT(182)*dt/(ROI*CPT(182)*dx^2);
GI_183=KT(183)*dt/(ROI*CPT(183)*dx^2);
GA_184=KT(184)*dt/(ROA*CPT(184)*dx^2);
GA_185=KT(185)*dt/(ROA*CPT(185)*dx^2);
GA_186=KT(186)*dt/(ROA*CPT(186)*dx^2);
GI_187=KT(187)*dt/(ROI*CPT(187)*dx^2);
GI_188=KT(188)*dt/(ROI*CPT(188)*dx^2);
GI_189=KT(189)*dt/(ROI*CPT(189)*dx^2);
GA_190=KT(190)*dt/(ROA*CPT(190)*dx^2);
GA_191=KT(191)*dt/(ROA*CPT(191)*dx^2);
GA_192=KT(192)*dt/(ROA*CPT(192)*dx^2);
GI_193=KT(193)*dt/(ROI*CPT(193)*dx^2);
GI_194=KT(194)*dt/(ROI*CPT(194)*dx^2);
GI_195=KT(195)*dt/(ROI*CPT(195)*dx^2);
GA_196=KT(196)*dt/(ROA*CPT(196)*dx^2);
GA_197=KT(197)*dt/(ROA*CPT(197)*dx^2);

GA_198=KT(198)*dt/(ROA*CPT(198)*dx^2);
GI_199=KT(199)*dt/(ROI*CPT(199)*dx^2);
GI_200=KT(200)*dt/(ROI*CPT(200)*dx^2);
GI_201=KT(201)*dt/(ROI*CPT(201)*dx^2);
GA_202=KT(202)*dt/(ROA*CPT(202)*dx^2);
GA_203=KT(203)*dt/(ROA*CPT(203)*dx^2);
GA_204=KT(204)*dt/(ROA*CPT(204)*dx^2);
GI_205=KT(205)*dt/(ROI*CPT(205)*dx^2);
GI_206=KT(206)*dt/(ROI*CPT(206)*dx^2);
GI_207=KT(207)*dt/(ROI*CPT(207)*dx^2);
GA_208=KT(208)*dt/(ROA*CPT(208)*dx^2);
GA_209=KT(209)*dt/(ROA*CPT(209)*dx^2);
GA_210=KT(210)*dt/(ROA*CPT(210)*dx^2);
GI_211=KT(211)*dt/(ROI*CPT(211)*dx^2);
GI_212=KT(212)*dt/(ROI*CPT(212)*dx^2);
GI_213=KT(213)*dt/(ROI*CPT(213)*dx^2);
GA_214=KT(214)*dt/(ROA*CPT(214)*dx^2);
GA_215=KT(215)*dt/(ROA*CPT(215)*dx^2);
GA_216=KT(216)*dt/(ROA*CPT(216)*dx^2);
GI_217=KT(217)*dt/(ROI*CPT(217)*dx^2);
GI_218=KT(218)*dt/(ROI*CPT(218)*dx^2);
GI_219=KT(219)*dt/(ROI*CPT(219)*dx^2);
GA_220=KT(220)*dt/(ROA*CPT(220)*dx^2);
GA_221=KT(221)*dt/(ROA*CPT(221)*dx^2);
GA_222=KT(222)*dt/(ROA*CPT(222)*dx^2);
GI_223=KT(223)*dt/(ROI*CPT(223)*dx^2);
GI_224=KT(224)*dt/(ROI*CPT(224)*dx^2);
GI_225=KT(225)*dt/(ROI*CPT(225)*dx^2);
GA_226=KT(226)*dt/(ROA*CPT(226)*dx^2);
GA_227=KT(227)*dt/(ROA*CPT(227)*dx^2);
GA_228=KT(228)*dt/(ROA*CPT(228)*dx^2);
GI_229=KT(229)*dt/(ROI*CPT(229)*dx^2);
GI_230=KT(230)*dt/(ROI*CPT(230)*dx^2);
GI_231=KT(231)*dt/(ROI*CPT(231)*dx^2);
GA_232=KT(232)*dt/(ROA*CPT(232)*dx^2);
GA_233=KT(233)*dt/(ROA*CPT(233)*dx^2);
GA_234=KT(234)*dt/(ROA*CPT(234)*dx^2);
GI_235=KT(235)*dt/(ROI*CPT(235)*dx^2);
GI_236=KT(236)*dt/(ROI*CPT(236)*dx^2);
GI_237=KT(237)*dt/(ROI*CPT(237)*dx^2);
GA_238=KT(238)*dt/(ROA*CPT(238)*dx^2);
GA_239=KT(239)*dt/(ROA*CPT(239)*dx^2);
GA_240=KT(240)*dt/(ROA*CPT(240)*dx^2);
GI_241=KT(241)*dt/(ROI*CPT(241)*dx^2);
GI_242=KT(242)*dt/(ROI*CPT(242)*dx^2);
GI_243=KT(243)*dt/(ROI*CPT(243)*dx^2);
GA_244=KT(244)*dt/(ROA*CPT(244)*dx^2);
GA_245=KT(245)*dt/(ROA*CPT(245)*dx^2);
GA_246=KT(246)*dt/(ROA*CPT(246)*dx^2);
GI_247=KT(247)*dt/(ROI*CPT(247)*dx^2);
GI_248=KT(248)*dt/(ROI*CPT(248)*dx^2);
GI_249=KT(249)*dt/(ROI*CPT(249)*dx^2);
GA_250=KT(250)*dt/(ROA*CPT(250)*dx^2);
GA_251=KT(251)*dt/(ROA*CPT(251)*dx^2);
GA_252=KT(252)*dt/(ROA*CPT(252)*dx^2);
GI_253=KT(253)*dt/(ROI*CPT(253)*dx^2);

GI_254=KT(254)*dt/(ROI*CPT(254)*dx^2);
GI_255=KT(255)*dt/(ROI*CPT(255)*dx^2);
GI_256=KT(256)*dt/(ROA*CPT(256)*dx^2);
GI_257=KT(257)*dt/(ROA*CPT(257)*dx^2);
GI_258=KT(258)*dt/(ROA*CPT(258)*dx^2);
GI_259=KT(259)*dt/(ROI*CPT(259)*dx^2);
GI_260=KT(260)*dt/(ROI*CPT(260)*dx^2);
GI_261=KT(261)*dt/(ROI*CPT(261)*dx^2);
GI_262=KT(262)*dt/(ROA*CPT(262)*dx^2);
GI_263=KT(263)*dt/(ROA*CPT(263)*dx^2);
GI_264=KT(264)*dt/(ROA*CPT(264)*dx^2);
GI_265=KT(265)*dt/(ROI*CPT(265)*dx^2);
GI_266=KT(266)*dt/(ROI*CPT(266)*dx^2);
GI_267=KT(267)*dt/(ROI*CPT(267)*dx^2);
GI_268=KT(268)*dt/(ROA*CPT(268)*dx^2);
GI_269=KT(269)*dt/(ROA*CPT(269)*dx^2);
GI_270=KT(270)*dt/(ROA*CPT(270)*dx^2);
GI_271=KT(271)*dt/(ROI*CPT(271)*dx^2);
GI_272=KT(272)*dt/(ROI*CPT(272)*dx^2);
GI_273=KT(273)*dt/(ROI*CPT(273)*dx^2);
FR_274=KT(274)*dt/(ROR*CPT(274)*dx^2);
FR_275=KT(275)*dt/(ROR*CPT(275)*dx^2);
FR_276=KT(276)*dt/(ROR*CPT(276)*dx^2);
FR_277=KT(277)*dt/(ROR*CPT(277)*dx^2);
FR_278=KT(278)*dt/(ROR*CPT(278)*dx^2);
FR_279=KT(279)*dt/(ROR*CPT(279)*dx^2);
FR_280=KT(280)*dt/(ROR*CPT(280)*dx^2);
FR_281=KT(281)*dt/(ROR*CPT(281)*dx^2);
FR_282=KT(282)*dt/(ROR*CPT(282)*dx^2);
FR_283=KT(283)*dt/(ROR*CPT(283)*dx^2);
FR_284=KT(284)*dt/(ROR*CPT(284)*dx^2);
FR_285=KT(285)*dt/(ROR*CPT(285)*dx^2);
FR_286=KT(286)*dt/(ROR*CPT(286)*dx^2);
FR_287=KT(287)*dt/(ROR*CPT(287)*dx^2);
FR_288=KT(288)*dt/(ROR*CPT(288)*dx^2);
FR_289=KT(289)*dt/(ROR*CPT(289)*dx^2);
FR_290=KT(290)*dt/(ROR*CPT(290)*dx^2);
FR_291=KT(291)*dt/(ROR*CPT(291)*dx^2);
FR_292=KT(292)*dt/(ROR*CPT(292)*dx^2);
FR_293=KT(293)*dt/(ROR*CPT(293)*dx^2);
FR_294=KT(294)*dt/(ROR*CPT(294)*dx^2);
FR_295=KT(295)*dt/(ROR*CPT(295)*dx^2);
FR_296=KT(296)*dt/(ROR*CPT(296)*dx^2);
FR_297=KT(297)*dt/(ROR*CPT(297)*dx^2);
FR_298=KT(298)*dt/(ROR*CPT(298)*dx^2);
FR_299=KT(299)*dt/(ROR*CPT(299)*dx^2);
FR_300=KT(300)*dt/(ROR*CPT(300)*dx^2);
FR_301=KT(301)*dt/(ROR*CPT(301)*dx^2);
FR_302=KT(302)*dt/(ROR*CPT(302)*dx^2);
FR_303=KT(303)*dt/(ROR*CPT(303)*dx^2);
FR_304=KT(304)*dt/(ROR*CPT(304)*dx^2);
FR_305=KT(305)*dt/(ROR*CPT(305)*dx^2);
FR_306=KT(306)*dt/(ROR*CPT(306)*dx^2);
FR_307=KT(307)*dt/(ROR*CPT(307)*dx^2);
FR_308=KT(308)*dt/(ROR*CPT(308)*dx^2);
FR_309=KT(309)*dt/(ROR*CPT(309)*dx^2);

```

FR_310=KT(310)*dt/(ROR*CPT(310)*dx^2);
FR_311=KT(311)*dt/(ROR*CPT(311)*dx^2);
FR_312=KT(312)*dt/(ROR*CPT(312)*dx^2);
FR_313=KT(313)*dt/(ROR*CPT(313)*dx^2);
FR_314=KT(314)*dt/(ROR*CPT(314)*dx^2);
FR_315=KT(315)*dt/(ROR*CPT(315)*dx^2);
FR_316=KT(316)*dt/(ROR*CPT(316)*dx^2);
FR_317=KT(317)*dt/(ROR*CPT(317)*dx^2);
FR_318=KT(318)*dt/(ROR*CPT(318)*dx^2);

RI_112=(1/KT(112))/((1/(2*KT(112)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(136))));
RI_113=(1/KT(113))/((1/(2*KT(113)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(137))));
RI_114=(1/KT(114))/((1/(2*KT(114)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(138))));
RI_139=(1/KT(139))/((1/(2*KT(139)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(138))));
RI_145=(1/KT(145))/((1/(2*KT(145)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(144))));
RI_151=(1/KT(151))/((1/(2*KT(151)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(150))));
RI_157=(1/KT(157))/((1/(2*KT(157)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(156))));
RI_163=(1/KT(163))/((1/(2*KT(163)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(162))));
RI_169=(1/KT(169))/((1/(2*KT(169)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(168))));
RI_175=(1/KT(175))/((1/(2*KT(175)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(174))));
RI_181=(1/KT(181))/((1/(2*KT(181)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(180))));
RI_187=(1/KT(187))/((1/(2*KT(187)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(186))));
RI_193=(1/KT(193))/((1/(2*KT(193)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(192))));
RI_199=(1/KT(199))/((1/(2*KT(199)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(198))));
RI_205=(1/KT(205))/((1/(2*KT(205)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(204))));
RI_211=(1/KT(211))/((1/(2*KT(211)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(210))));
RI_217=(1/KT(217))/((1/(2*KT(217)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(216))));
RI_223=(1/KT(223))/((1/(2*KT(223)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(222))));
RI_229=(1/KT(229))/((1/(2*KT(229)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(228))));
RI_235=(1/KT(235))/((1/(2*KT(235)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(234))));
RI_241=(1/KT(241))/((1/(2*KT(241)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(240))));
RI_247=(1/KT(247))/((1/(2*KT(247)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(246))));
RI_253=(1/KT(253))/((1/(2*KT(253)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(252))));

RA_136=(1/KT(136))/((1/(2*KT(112)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(136))));
RA_137=(1/KT(137))/((1/(2*KT(113)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(137))));
RA1_138=(1/KT(138))/((1/(2*KT(114)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(138))));
RA2_138=(1/KT(138))/((1/(2*KT(139)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(138))));
RA_144=(1/KT(144))/((1/(2*KT(145)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(144))));
RA_150=(1/KT(150))/((1/(2*KT(151)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(150))));
RA_156=(1/KT(156))/((1/(2*KT(157)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(156))));
RA_162=(1/KT(162))/((1/(2*KT(163)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(162))));
RA_168=(1/KT(168))/((1/(2*KT(169)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(168))));
RA_174=(1/KT(174))/((1/(2*KT(175)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(174))));
RA_180=(1/KT(180))/((1/(2*KT(181)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(180))));
RA_186=(1/KT(186))/((1/(2*KT(187)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(186))));
RA_192=(1/KT(192))/((1/(2*KT(193)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(192))));
RA_198=(1/KT(198))/((1/(2*KT(199)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(198))));
RA_204=(1/KT(204))/((1/(2*KT(205)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(204))));
RA_210=(1/KT(210))/((1/(2*KT(211)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(210))));
RA_216=(1/KT(216))/((1/(2*KT(217)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(216))));
RA_222=(1/KT(222))/((1/(2*KT(223)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(222))));
RA_228=(1/KT(228))/((1/(2*KT(229)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(228))));
RA_234=(1/KT(234))/((1/(2*KT(235)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(234))));
RA_240=(1/KT(240))/((1/(2*KT(241)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(240))));
RA_246=(1/KT(246))/((1/(2*KT(247)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(246))));

```

```

RA_252=(1/KT(252))/((1/(2*KT(253)))+(RTC/dx)+(1/(2*KT(252))));

RIR_1=(1/KT(1))/((1/(2*KT(1)))+(1/(2*KT(274))));
RIR_2=(1/KT(2))/((1/(2*KT(2)))+(1/(2*KT(274))));
RIR_3=(1/KT(3))/((1/(2*KT(3)))+(1/(2*KT(274))));
RIR_4=(1/KT(4))/((1/(2*KT(4)))+(1/(2*KT(274))));
RIR_5=(1/KT(5))/((1/(2*KT(5)))+(1/(2*KT(274))));
RIR_6=(1/KT(6))/((1/(2*KT(6)))+(1/(2*KT(275))));
RIR_7=(1/KT(7))/((1/(2*KT(7)))+(1/(2*KT(275))));
RIR_8=(1/KT(8))/((1/(2*KT(8)))+(1/(2*KT(275))));
RIR_9=(1/KT(9))/((1/(2*KT(9)))+(1/(2*KT(275))));
RIR_10=(1/KT(10))/((1/(2*KT(10)))+(1/(2*KT(275))));
RIR_11=(1/KT(11))/((1/(2*KT(11)))+(1/(2*KT(276))));
RIR_12=(1/KT(12))/((1/(2*KT(12)))+(1/(2*KT(276))));
RIR_13=(1/KT(13))/((1/(2*KT(13)))+(1/(2*KT(276))));
RIR_14=(1/KT(14))/((1/(2*KT(14)))+(1/(2*KT(276))));
RIR_15=(1/KT(15))/((1/(2*KT(15)))+(1/(2*KT(276))));
RIR_16=(1/KT(16))/((1/(2*KT(16)))+(1/(2*KT(277))));
RIR_17=(1/KT(17))/((1/(2*KT(17)))+(1/(2*KT(277))));
RIR_18=(1/KT(18))/((1/(2*KT(18)))+(1/(2*KT(277))));
RIR_19=(1/KT(19))/((1/(2*KT(19)))+(1/(2*KT(277))));
RIR_20=(1/KT(20))/((1/(2*KT(20)))+(1/(2*KT(277))));
RIR_21=(1/KT(21))/((1/(2*KT(21)))+(1/(2*KT(278))));
RIR_22=(1/KT(22))/((1/(2*KT(22)))+(1/(2*KT(278))));
RIR_23=(1/KT(23))/((1/(2*KT(23)))+(1/(2*KT(278))));
RIR_24=(1/KT(24))/((1/(2*KT(24)))+(1/(2*KT(278))));
RIR_25=(1/KT(25))/((1/(2*KT(25)))+(1/(2*KT(278))));
RIR_26=(1/KT(26))/((1/(2*KT(26)))+(1/(2*KT(279))));
RIR_27=(1/KT(27))/((1/(2*KT(27)))+(1/(2*KT(279))));
RIR_28=(1/KT(28))/((1/(2*KT(28)))+(1/(2*KT(279))));
RIR_29=(1/KT(29))/((1/(2*KT(29)))+(1/(2*KT(279))));
RIR_30=(1/KT(30))/((1/(2*KT(30)))+(1/(2*KT(279))));
RIR_31=(1/KT(31))/((1/(2*KT(31)))+(1/(2*KT(280))));
RIR_32=(1/KT(32))/((1/(2*KT(32)))+(1/(2*KT(280))));
RIR_33=(1/KT(33))/((1/(2*KT(33)))+(1/(2*KT(280))));
RIR_34=(1/KT(34))/((1/(2*KT(34)))+(1/(2*KT(280))));
RIR_35=(1/KT(35))/((1/(2*KT(35)))+(1/(2*KT(280))));
RIR_36=(1/KT(36))/((1/(2*KT(36)))+(1/(2*KT(281))));
RIR_37=(1/KT(37))/((1/(2*KT(37)))+(1/(2*KT(281))));
RIR_38=(1/KT(38))/((1/(2*KT(38)))+(1/(2*KT(281))));
RIR_39=(1/KT(39))/((1/(2*KT(39)))+(1/(2*KT(281))));
RIR_40=(1/KT(40))/((1/(2*KT(40)))+(1/(2*KT(281))));
RIR_41=(1/KT(41))/((1/(2*KT(41)))+(1/(2*KT(282))));
RIR_42=(1/KT(42))/((1/(2*KT(42)))+(1/(2*KT(282))));
RIR_43=(1/KT(43))/((1/(2*KT(43)))+(1/(2*KT(282))));
RIR_44=(1/KT(44))/((1/(2*KT(44)))+(1/(2*KT(282))));
RIR_45=(1/KT(45))/((1/(2*KT(45)))+(1/(2*KT(282))));

RR_274=(1/5*KT(274))/((1/(10*((KT(1)+KT(2)+KT(3)+KT(4)+KT(5))/5)))+(
1/(2*KT(274))));
RR_275=(1/5*KT(275))/((1/(10*((KT(6)+KT(7)+KT(8)+KT(9)+KT(10))/5)))+(
1/(2*KT(275))));
RR_276=(1/5*KT(276))/((1/(10*((KT(11)+KT(12)+KT(13)+KT(14)+KT(15))/5)))+(
1/(2*KT(276))));
RR_277=(1/5*KT(277))/((1/(10*((KT(16)+KT(17)+KT(18)+KT(19)+KT(20))/5)))+(
1/(2*KT(277))));

```

```

    RR_278=(1/5*KT(278))/((1/(10*((KT(21)+KT(22)+KT(23)+KT(24)+KT(25))/5)))+(1/(2*KT(278))));
    RR_279=(1/5*KT(279))/((1/(10*((KT(26)+KT(27)+KT(28)+KT(29)+KT(30))/5)))+(1/(2*KT(279))));
    RR_280=(1/5*KT(280))/((1/(10*((KT(31)+KT(32)+KT(33)+KT(34)+KT(35))/5)))+(1/(2*KT(280))));
    RR_281=(1/5*KT(281))/((1/(10*((KT(36)+KT(37)+KT(38)+KT(39)+KT(40))/5)))+(1/(2*KT(281))));
    RR_282=(1/5*KT(282))/((1/(10*((KT(41)+KT(42)+KT(43)+KT(44)+KT(45))/5)))+(1/(2*KT(282))));
    %
    %Termina la generación de los coeficientes de la matriz M de transferencia de calor.

    biotsfusul_ng_cav; %Cálculo de los números de Biot por zona e inclinación del receptor solar.
    reltemp_ng_cv; %Cálculo de la matriz M de transferencia de calor.
    const_ng_c; %Cálculo de las constantes del sistema con temperaturas previas.

    %Tp es el vector de temperaturas del instante siguiente en el tiempo.
    Tp=M\C; %Obtiene temperaturas del instante siguiente en el tiempo. Solución del sistema de ecuaciones.

    %Eliminación de temperaturas menores a 300K por error de impresión.
    for ii=1:1:318
        if(Tp(ii)<300)
            Tp(ii)=300;
        end
    end

    [T]=[T Tp]; %Se le concatena el Vector 'Tp' al final de la matriz 'T'
    IT=IT+1; %Contador de iteraciones.
    if(((sum(Tp(136:6:250))+sum(Tp(137:6:251))+sum(Tp(138:6:252)))>(3*20*933*Tol/100))||((IT*dt)>(tmax*60))),break,end
    %Criterio de temperatura efectiva alcanzada.
    %Si los nodos de aluminio alcanzaron 97% de la temperatura de fusión.

end

if((IT*dt)>=(tmax*60))
    fprintf('\n¡ERROR! Se sobrepasó el tiempo máximo para la fusión.\n');
    csvwrite('Temperaturas.csv',T);
else
    fprintf('\n¡Aluminio fundido!\n\n');
    fprintf('En %.2f minutos se conseguiría la fusión.\n',IT*dt/60);
    csvwrite('Temperaturas.csv',T);
    csvwrite('primas.csv',primas);
end
fprintf('Se realizaron %d iteraciones.\n',IT);

```

Apéndice B

Programa para coloreado del campo de temperaturas.

```
=====  
;;;|Programa para colorear el campo de temperaturas de la  
;;;sección bidimensional de crisol|  
=====  
(defun c:colt2400 (/ lst_temp lectura val)  
  (command "UCS" "W")  
  (setq currhpbound (getvar "HPBOUND"))  
  (setvar "HPBOUND" 0)  
  ;Lectura del archivo. Abre el archivo donde se encuentran la lista de temperaturas  
  ;de una sola columna. Lee la cadena de caracteres numérica como string y la convierte  
  ;a valor numérico.  
  (setq arch (open(getfiled "Archivo de malla bidimensional:" "" "txt" 8)"r"))  
  ;arch es la variable bajo la cual se manda llamar el archivo.  
  (setq lectura (read-line arch) val 1 lst_temp '())  
  ; Lee la línea en el archivo, inicializa variables.  
  (while (/= lectura nil);Se mantiene leyendo todo el archivo  
    (setq lst_temp (cons (atoi lectura) lst_temp))  
    (setq lectura (read-line arch))  
    (setq val (+ val 1))  
  );while, se mantiene leyendo hasta la ltima línea del archivo.  
  (close arch)  
  ;Termina lectura del archivo.  
  (setq lst_temp (reverse lst_temp))  
  (princ val)  
  ;Asignación de número de color según temperatura; la escala de colores va desde  
  ;el rojo más intenso hasta algún azul oscuro.  
  (setq lst_asign '())  
  (foreach elem lst_temp  
  
    (if (< elem 375) (setq lst_asign (cons (list elem 162) lst_asign))))
```



```

(if (and(>= elem 375)(< elem 450)) (setq lst_asign (cons (list elem 160) lst_asign)))
(if (and(>= elem 450)(< elem 525)) (setq lst_asign (cons (list elem 150) lst_asign)))
(if (and(>= elem 525)(< elem 600)) (setq lst_asign (cons (list elem 140) lst_asign)))
(if (and(>= elem 600)(< elem 675)) (setq lst_asign (cons (list elem 110) lst_asign)))

(if (and(>= elem 675)(< elem 750)) (setq lst_asign (cons (list elem 100) lst_asign)))
(if (and(>= elem 750)(< elem 825)) (setq lst_asign (cons (list elem 90) lst_asign)))
(if (and(>= elem 825)(< elem 900)) (setq lst_asign (cons (list elem 80) lst_asign)))
(if (and(>= elem 900)(< elem 975)) (setq lst_asign (cons (list elem 70) lst_asign)))
(if (and(>= elem 975)(< elem 1050)) (setq lst_asign (cons (list elem 40) lst_asign)))
(if (and(>= elem 1050)(< elem 1125)) (setq lst_asign (cons (list elem 30) lst_asign)))
(if (and(>= elem 1125)(< elem 1200)) (setq lst_asign (cons (list elem 20) lst_asign)))
(if (and(>= elem 1200)(< elem 1275)) (setq lst_asign (cons (list elem 10) lst_asign)))
(if (and(>= elem 1275)(<= elem 1350)) (setq lst_asign (cons (list elem 12) lst_asign)))
(if (> elem 1350) (setq lst_asign (cons (list elem 250) lst_asign)))

);foreach
(setq lst_asign (reverse lst_asign))
(setq lst_asign (cons (list 0 0) lst_asign))
;Hacer una lista de los puntos nodales.
(setq lst_pn (list
  (list 0 0 0) (list 0.0758 0.0742 0)
  (list 0.0758 0.072533 0) (list 0.0758 0.070866 0)
  (list 0.0758 0.069199 0) (list 0.0758 0.067532 0)
  (list 0.0758 0.065865 0) (list 0.0758 0.064198 0)
(list 0.0758 0.062531 0) (list 0.0758 0.060864 0)
  (list 0.0758 0.059197 0) (list 0.0758 0.05753 0)
(list 0.0758 0.055863 0) (list 0.0758 0.054196 0)
  (list 0.0758 0.052529 0) (list 0.0758 0.050862 0)
(list 0.0758 0.049195 0) (list 0.0758 0.047528 0)
  (list 0.0758 0.045861 0) (list 0.0758 0.044194 0)
(list 0.0758 0.042527 0) (list 0.0758 0.04086 0)
  (list 0.0758 0.039193 0) (list 0.0758 0.037526 0)
(list 0.0758 0.035859 0) (list 0.0758 0.034192 0)
  (list 0.0758 0.032525 0) (list 0.0758 0.030858 0)
(list 0.0758 0.029191 0) (list 0.0758 0.027524 0)
  (list 0.0758 0.025857 0) (list 0.0758 0.02419 0)
(list 0.0758 0.022523 0) (list 0.0758 0.020856 0)
  (list 0.0758 0.019189 0) (list 0.0758 0.017522 0)
(list 0.0758 0.015855 0) (list 0.0758 0.014188 0)
  (list 0.0758 0.012521 0) (list 0.0758 0.010854 0)
(list 0.0758 0.009187 0) (list 0.0758 0.00752 0)
  (list 0.0758 0.005853 0) (list 0.0758 0.004186 0)
(list 0.0758 0.002519 0) (list 0.0758 0.000852 0)
  (list 0.077467 0.0742 0) (list 0.077467 0.072533 0)
(list 0.077467 0.070866 0) (list 0.077467 0.069199 0)
  (list 0.077467 0.067532 0) (list 0.077467 0.065865 0)
(list 0.077467 0.064198 0) (list 0.077467 0.062531 0)
  (list 0.077467 0.060864 0) (list 0.077467 0.059197 0)
(list 0.077467 0.05753 0) (list 0.077467 0.055863 0)
  (list 0.077467 0.054196 0) (list 0.077467 0.052529 0)
(list 0.077467 0.050862 0) (list 0.077467 0.049195 0)
  (list 0.077467 0.047528 0) (list 0.077467 0.045861 0)

```

```
(list 0.077467 0.044194 0) (list 0.077467 0.042527 0)
  (list 0.077467 0.04086 0) (list 0.077467 0.039193 0)
(list 0.077467 0.037526 0) (list 0.077467 0.035859 0)
  (list 0.077467 0.034192 0) (list 0.077467 0.032525 0)
(list 0.077467 0.030858 0) (list 0.077467 0.029191 0)
  (list 0.077467 0.027524 0) (list 0.077467 0.025857 0)
(list 0.077467 0.02419 0) (list 0.077467 0.022523 0)
  (list 0.077467 0.020856 0) (list 0.077467 0.019189 0)
(list 0.077467 0.017522 0) (list 0.077467 0.015855 0)
  (list 0.077467 0.014188 0) (list 0.077467 0.012521 0)
(list 0.077467 0.010854 0) (list 0.077467 0.009187 0)
  (list 0.077467 0.00752 0) (list 0.077467 0.005853 0)
(list 0.077467 0.004186 0) (list 0.077467 0.002519 0)
  (list 0.077467 0.000852 0) (list 0.079134 0.0742 0)
(list 0.079134 0.072533 0) (list 0.079134 0.070866 0)
  (list 0.079134 0.069199 0) (list 0.079134 0.067532 0)
(list 0.079134 0.065865 0) (list 0.079134 0.064198 0)
  (list 0.079134 0.062531 0) (list 0.079134 0.060864 0)
(list 0.079134 0.059197 0) (list 0.079134 0.05753 0)
  (list 0.079134 0.055863 0) (list 0.079134 0.054196 0)
(list 0.079134 0.052529 0) (list 0.079134 0.050862 0)
  (list 0.079134 0.049195 0) (list 0.079134 0.047528 0)
(list 0.079134 0.045861 0) (list 0.079134 0.044194 0)
  (list 0.079134 0.042527 0) (list 0.079134 0.04086 0)
(list 0.079134 0.039193 0) (list 0.079134 0.037526 0)
  (list 0.079134 0.035859 0) (list 0.079134 0.034192 0)
(list 0.079134 0.032525 0) (list 0.079134 0.030858 0)
  (list 0.079134 0.029191 0) (list 0.079134 0.027524 0)
(list 0.079134 0.025857 0) (list 0.079134 0.02419 0)
  (list 0.079134 0.022523 0) (list 0.079134 0.020856 0)
(list 0.079134 0.019189 0) (list 0.079134 0.017522 0)
  (list 0.079134 0.015855 0) (list 0.079134 0.014188 0)
(list 0.079134 0.012521 0) (list 0.079134 0.010854 0)
  (list 0.079134 0.009187 0) (list 0.079134 0.00752 0)
(list 0.079134 0.005853 0) (list 0.079134 0.004186 0)
  (list 0.079134 0.002519 0) (list 0.079134 0.000852 0)
(list 0.0808 0.0392 0) (list 0.0808 0.037533 0)
  (list 0.0808 0.035866 0) (list 0.0808 0.034199 0)
(list 0.0808 0.032532 0) (list 0.0808 0.030865 0)
  (list 0.0825 0.0392 0) (list 0.0825 0.037533 0)
(list 0.0825 0.035866 0) (list 0.0825 0.034199 0)
  (list 0.0825 0.032532 0) (list 0.0825 0.030865 0)
(list 0.0842 0.0392 0) (list 0.0842 0.037533 0)
  (list 0.0842 0.035866 0) (list 0.0842 0.034199 0)
(list 0.0842 0.032532 0) (list 0.0842 0.030865 0)
  (list 0.085867 0.0392 0) (list 0.085801 0.037533 0)
(list 0.085801 0.035866 0) (list 0.085801 0.034199 0)
  (list 0.085801 0.032532 0) (list 0.085801 0.030865 0)
(list 0.087468 0.0392 0) (list 0.087468 0.037533 0)
  (list 0.087468 0.035866 0) (list 0.087468 0.034199 0)
(list 0.087468 0.032532 0) (list 0.087468 0.030865 0)
  (list 0.0892 0.0392 0) (list 0.0892 0.037533 0)
(list 0.0892 0.035866 0) (list 0.0892 0.034199 0)
  (list 0.0892 0.032532 0) (list 0.0892 0.030865 0)
(list 0.0908 0.0392 0) (list 0.0908 0.037533 0)
  (list 0.0908 0.035866 0) (list 0.0908 0.034199 0)
```

```
list 0.0908 0.032532 0) (list 0.0908 0.030865 0)
      (list 0.0925 0.0392 0) (list 0.0925 0.037533 0)
(list 0.0925 0.035866 0) (list 0.0925 0.034199 0)
      (list 0.0925 0.032532 0) (list 0.0925 0.030865 0)
(list 0.0942 0.0392 0) (list 0.0942 0.037533 0)
      (list 0.0942 0.035866 0) (list 0.0942 0.034199 0)
(list 0.0942 0.032532 0) (list 0.0942 0.030865 0)
      (list 0.0958 0.0392 0) (list 0.0958 0.037533 0)
(list 0.0958 0.035866 0) (list 0.0958 0.034199 0)
      (list 0.0958 0.032532 0) (list 0.0958 0.030865 0)
(list 0.0975 0.0392 0) (list 0.0975 0.037533 0)
      (list 0.0975 0.035866 0) (list 0.0975 0.034199 0)
(list 0.0975 0.032532 0) (list 0.0975 0.030865 0)
      (list 0.0992 0.0392 0) (list 0.0992 0.037533 0)
(list 0.0992 0.035866 0) (list 0.0992 0.034199 0)
      (list 0.0992 0.032532 0) (list 0.0992 0.030865 0)
(list 0.1008 0.0392 0) (list 0.1008 0.037533 0)
      (list 0.1008 0.035866 0) (list 0.1008 0.034199 0)
(list 0.1008 0.032532 0) (list 0.1008 0.030865 0)
      (list 0.1025 0.0392 0) (list 0.1025 0.037533 0)
(list 0.1025 0.035866 0) (list 0.1025 0.034199 0)
      (list 0.1025 0.032532 0) (list 0.1025 0.030865 0)
(list 0.1042 0.0392 0) (list 0.1042 0.037533 0)
      (list 0.1042 0.035866 0) (list 0.1042 0.034199 0)
(list 0.1042 0.032532 0) (list 0.1042 0.030865 0)
      (list 0.1058 0.0392 0) (list 0.1058 0.037533 0)
(list 0.1058 0.035866 0) (list 0.1058 0.034199 0)
      (list 0.1058 0.032532 0) (list 0.1058 0.030865 0)
(list 0.1075 0.0392 0) (list 0.1075 0.037533 0)
      (list 0.1075 0.035866 0) (list 0.1075 0.034199 0)
(list 0.1075 0.032532 0) (list 0.1075 0.030865 0)
      (list 0.1092 0.0392 0) (list 0.1092 0.037533 0)
(list 0.1092 0.035866 0) (list 0.1092 0.034199 0)
      (list 0.1092 0.032532 0) (list 0.1092 0.030865 0)
(list 0.1108 0.0392 0) (list 0.1108 0.037533 0)
      (list 0.1108 0.035866 0) (list 0.1108 0.034199 0)
(list 0.1108 0.032532 0) (list 0.1108 0.030865 0)
      (list 0.1121 0.0392 0) (list 0.1121 0.037533 0)
(list 0.1121 0.035866 0) (list 0.1121 0.034199 0)
      (list 0.1121 0.032532 0) (list 0.1121 0.030865 0)
(list 0.0808 0.0042 0) (list 0.0808 0.002533 0)
      (list 0.0808 0.000866 0) (list 0.082467 0.0042 0)
(list 0.082467 0.002533 0) (list 0.082467 0.000866 0)
      (list 0.084134 0.0042 0) (list 0.084134 0.002533 0)
(list 0.084134 0.000866 0) (list 0.085801 0.0042 0)
      (list 0.085801 0.002533 0) (list 0.085801 0.000866 0)
(list 0.087468 0.0042 0) (list 0.087468 0.002533 0)
      (list 0.087468 0.000866 0) (list 0.089135 0.0042 0)
(list 0.089135 0.002533 0) (list 0.089135 0.000866 0)
      (list 0.0708 0.0708 0) (list 0.0708 0.062465 0)
(list 0.0708 0.05413 0) (list 0.0708 0.045795 0)
      (list 0.0708 0.03746 0) (list 0.0708 0.029125 0)
(list 0.0708 0.02079 0) (list 0.0708 0.012455 0)
      (list 0.0708 0.00412 0) (list 0.062465 0.0708 0)
(list 0.062465 0.062465 0) (list 0.062465 0.05413 0)
      (list 0.062465 0.045795 0) (list 0.062465 0.03746 0)
```

```

(list 0.062465 0.029125 0) (list 0.062465 0.02079 0)
      (list 0.062465 0.012455 0) (list 0.062465 0.00412 0)
(list 0.05413 0.0708 0) (list 0.05413 0.062465 0)
      (list 0.05413 0.05413 0) (list 0.05413 0.045795 0)
(list 0.05413 0.03746 0) (list 0.05413 0.029125 0)
      (list 0.05413 0.02079 0) (list 0.05413 0.012455 0)
(list 0.05413 0.00412 0) (list 0.045795 0.0708 0)
      (list 0.045795 0.062465 0) (list 0.045795 0.05413 0)
(list 0.045795 0.045795 0) (list 0.045795 0.03746 0)
      (list 0.045795 0.029125 0) (list 0.045795 0.02079 0)
(list 0.045795 0.012455 0) (list 0.045795 0.00412 0)
      (list 0.03746 0.0708 0) (list 0.03746 0.062465 0)
(list 0.03746 0.05413 0) (list 0.03746 0.045795 0)
      (list 0.03746 0.03746 0) (list 0.03746 0.029125 0)
(list 0.03746 0.02079 0) (list 0.03746 0.012455 0)
      (list 0.03746 0.00412 0)
    )
  ); Ingreso de lista predefinida de puntos.

; Subrutina para dibujar sobre la plantilla de la discretización las superficies de
; color asignado.
(setq namlay "Campo Temperaturas")
(setq color 1)
(if (tblsearch "LAYER" namlay)
  (command "_LAYER" "_C" color namlay "_S" namlay "")
  (command "_LAYER" "_N" namlay "_C" color namlay "_S" namlay ""))
); if
(command "_SHADEMODE" "_Goureaud")
(setq nd 0)
(foreach elem lst_pn
  (princ elem)
  (command "_BOUNDARY" elem "")
  (setq enamc (entget(entlast)))
  (if (assoc 62 enamc)
    (progn
      (setq enamc (subst (cons 62 (cadr(nth nd lst_asign)) ) (assoc 62 enamc) enamc))
      (entmod enamc)
    ); progn
    (progn
      (setq enamc (append enamc (list (cons 62 (cadr(nth nd lst_asign)) ))))
      (entmod enamc)
    ); progn
  ); if
  (entmod enamc)
  (setq nd (+ nd 1))
); foreach

(princ lst_pn)
(setvar "HPBOUND" currhpbound)
(princ)
); defun c:colt2400

```

Apéndice C

Ecuaciones nodales en diferencias finitas, las cuales se emplean para conocer el campo de temperaturas de la sección del receptor.

Nodos del crisol.

Nodos del crisol, conducción interna (figura C.1).

$$T_{m,n}^p = (1 + 4F_{OI}) T_{m,n}^{p+1} - F_{OI} [T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1}] \quad (a) \quad (C-1)$$

$$T_1^p = T_1^{p+1} - F_{OI} [T_{46}^{p+1} + T_2^{p+1} - 2T_1^{p+1}]$$

$$-F_{OI} (RIR) [T_{274}^{p+1} - T_1^{p+1}] - F_{OI} (Bi_1) [T_\infty - T_1^{p+1}] \quad (b) \quad (C-2)$$

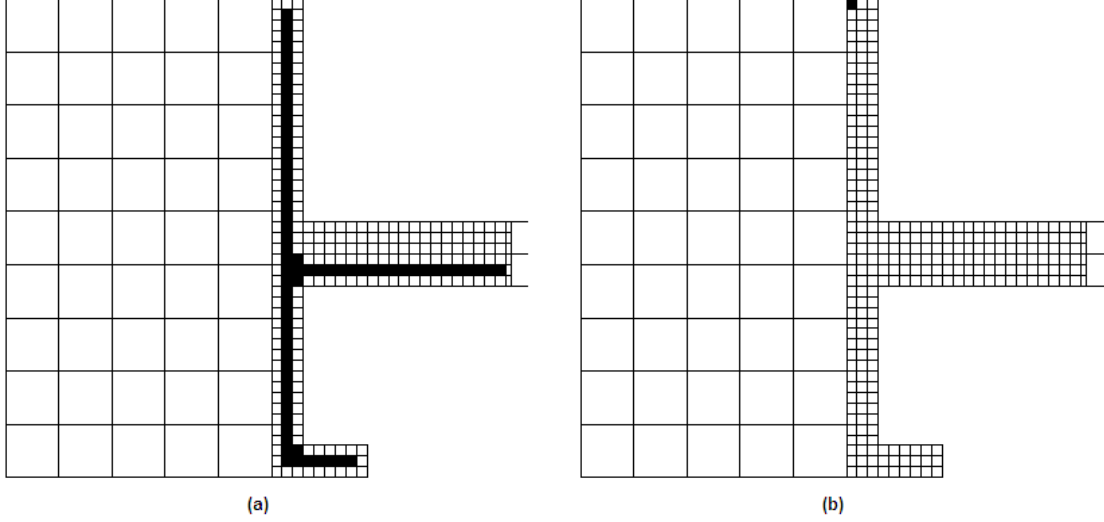


Figura C.1. Localización de los nodos centrales y nodo 1 en el crisol.

$$\begin{aligned}
 T_{m,n}^p &= T_{m,n}^{p+1} - Fo_I [T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1}] \\
 &\quad - Fo_I (RIR) [T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}] \quad (a)
 \end{aligned} \tag{C-3}$$

donde

$$RIR = \frac{1/k_I}{\frac{1}{2k_I} + \frac{1}{2k_R}} \tag{C-4}$$

$$\begin{aligned}
 T_{m,n}^p &= T_{m,n}^{p+1} - Fo_I [T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m+1,n}^{p+1} - 2T_{m,n}^{p+1}] \\
 &\quad - Fo_I (RIR) [T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}] - Fo_I (Bi_7) [T_\infty - T_{m,n}^{p+1}] \quad (b)
 \end{aligned} \tag{C-5}$$

- \overline{Nu}_L es el número de Nusselt promedio para la placa vertical.
- Ra_L es el número de Rayleigh para la longitud característica
- Pr es el número de Pradtl para el aire a temperatura ambiente

Nodos de conducción del crisol en contacto con el aislante (figura C.2a) y con convección (figura C.2b).

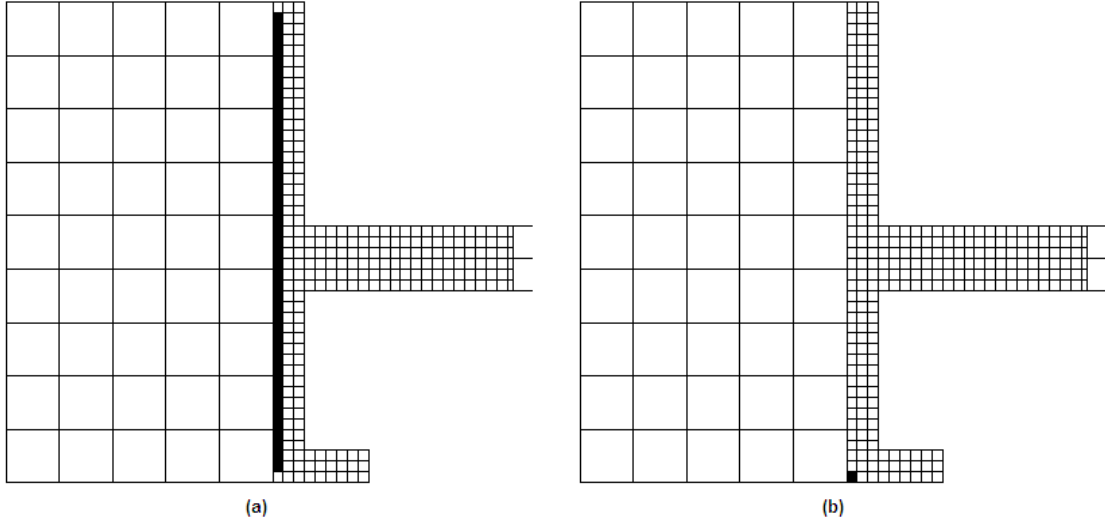


Figura C.2. Localización de los nodos 2 al 44 y nodo 45 en el crisol.

$$T_{46}^p = T_{46}^{p+1} - Fo_I [T_1^{p+1} + T_{47}^{p+1} - T_{91}^{p+1} - 3T_{46}^{p+1} + Bi_1 (T_\infty - T_{46}^{p+1})] \quad (a) \quad (C-6)$$

$$T_{91}^p = T_{91}^{p+1}$$

$$-Fo_I [T_{46}^{p+1} + T_{92}^{p+1} - 2T_{91}^{p+1} + Bi_1 (T_\infty - T_{91}^{p+1}) + Bi_2 (T_\infty - T_{91}^{p+1})] \quad (b) \quad (C-7)$$

Nodos del crisol con conducción y convección (figura C.3).

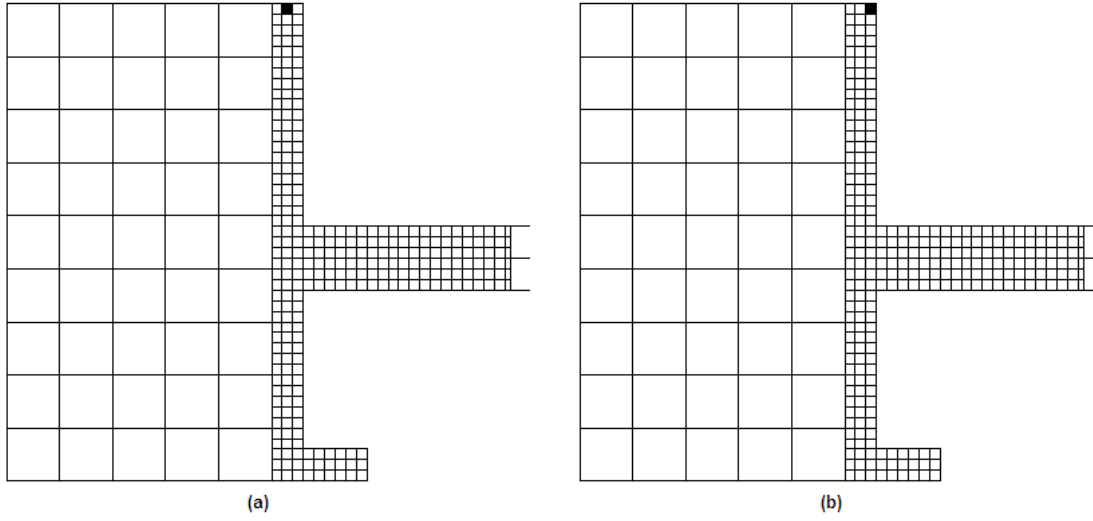


Figura C.3. Localización de los nodos 46 y 91 en el crisol.

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-Fo_I [T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1} + Bi_2 (T_\infty - T_{m,n}^{p+1})] \quad (a) \quad (C-8)$$

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-Fo_I [T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1} + RI (T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1})] \quad (b) \quad (C-9)$$

Nodos del crisol con convección (figura C.4a) y en contacto con el aluminio (figura C.4b).

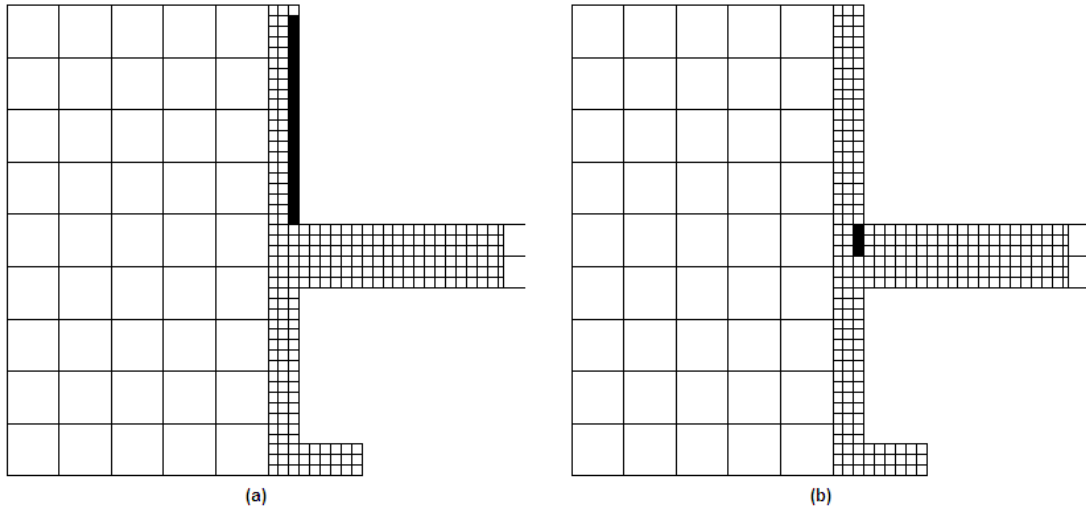


Figura C.4. Localización de los nodos 92 al 111 y 112, 113, 114 en el crisol.

$$T_{136}^p = T_{136}^{p+1}$$

$$-Fo_A [T_{142}^{p+1} + T_{137}^{p+1} - 2T_{136}^{p+1} + RA(T_{112}^{p+1} - T_{136}^{p+1}) + Bi_3(T_\infty - T_{136}^{p+1})] \quad (a) \quad (C-10)$$

$$T_{137}^p = T_{137}^{p+1}$$

$$-Fo_A [T_{136}^{p+1} + T_{143}^{p+1} + T_{138}^{p+1} - 3T_{137}^{p+1} + RA(T_{113}^{p+1} - T_{137}^{p+1})] \quad (b) \quad (C-11)$$

Nodo de aluminio en contacto con el crisol y expuesto a convección (figura C.5a)
 y nodo de aluminio en contacto con el crisol (figura C.5b).

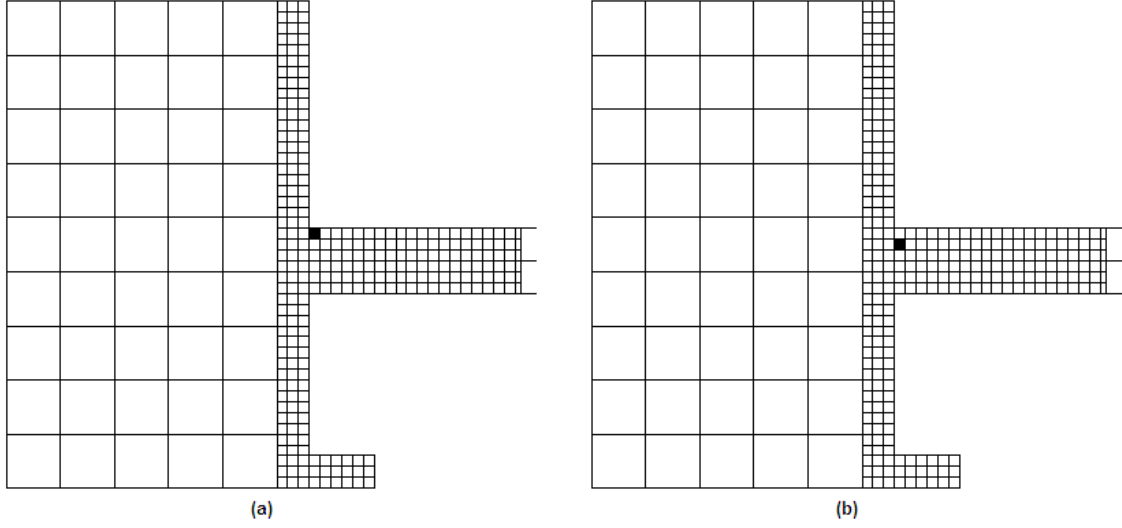


Figura C.5. Localización de los nodos 136 y 137 en el crisol.

$$T_{138}^p = T_{138}^{p+1} - FO_A [T_{137}^{p+1} + T_{144}^{p+1} - 2T_{138}^{p+1} + RA (T_{114}^{p+1} + T_{139}^{p+1} - 2T_{138}^{p+1})] \quad (a) \quad (C-12)$$

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-FO_A [T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1} + Bi_3 (T_\infty - T_{m,n}^{p+1})] \quad (b) \quad (C-13)$$

Nodo de aluminio en contacto con el crisol (figura C.6a) y nodos de aluminio expuestos a convección (figura C.6b).

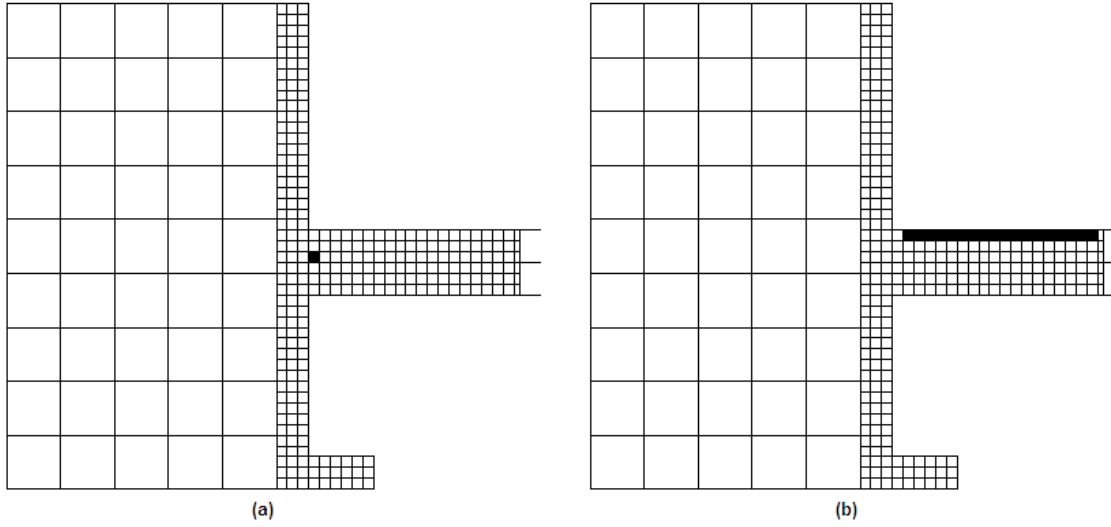


Figura C.6. Localización de los nodos 138 y 142 al 208 en el crisol.

$$T_{m,n}^p = (1 + 4Fo_A) T_{m,n}^{p+1} - Fo_A [T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1}] \quad (a) \quad (C-14)$$

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-Fo_I [T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1} + Bi_4 (T_\infty - T_{m,n}^{p+1})] \quad (b) \quad (C-15)$$

Nodo de aluminio con transferencia de calor por conducción (figura C.7a) y nodos del crisol expuestos a convección en el interior de la cavidad (figura C.7b).

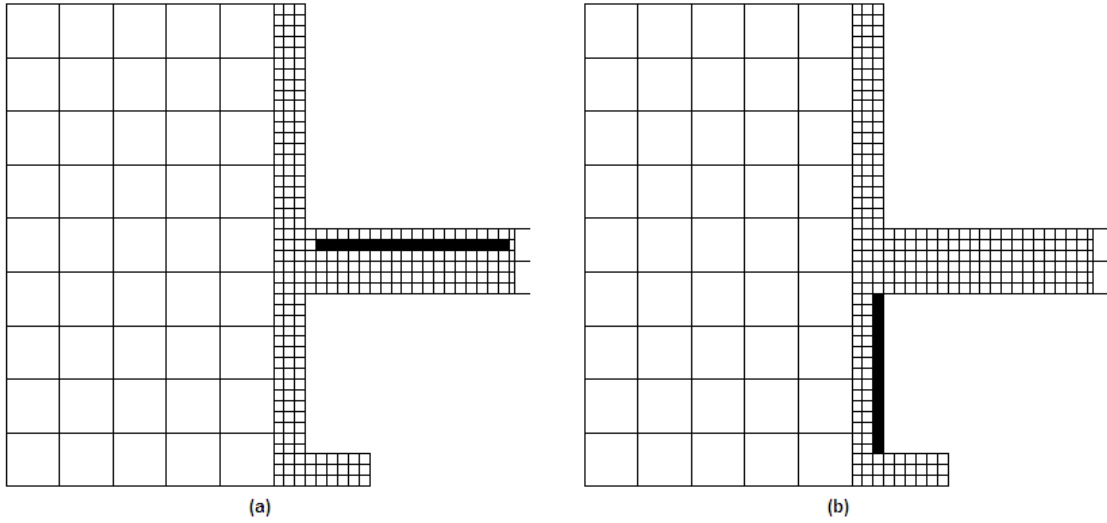


Figura C.7. Localización de los nodos 143 al 245 y 118 al 132 en el crisol.

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-Fo_I \left[T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1} + \frac{q'' \Delta x}{k_I} + Bi_s (T_\infty - T_{m,n}^{p+1}) \right] \quad (a) \quad (C-16)$$

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-Fo_I \left[T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1} + R_I (T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) \right] \quad (b) \quad (C-17)$$

Nodos del crisol dentro de la cavidad que están expuestos a la radiación solar concentrada (figura C.8a) y nodos del crisol en contacto con el aluminio (figura C.8b).

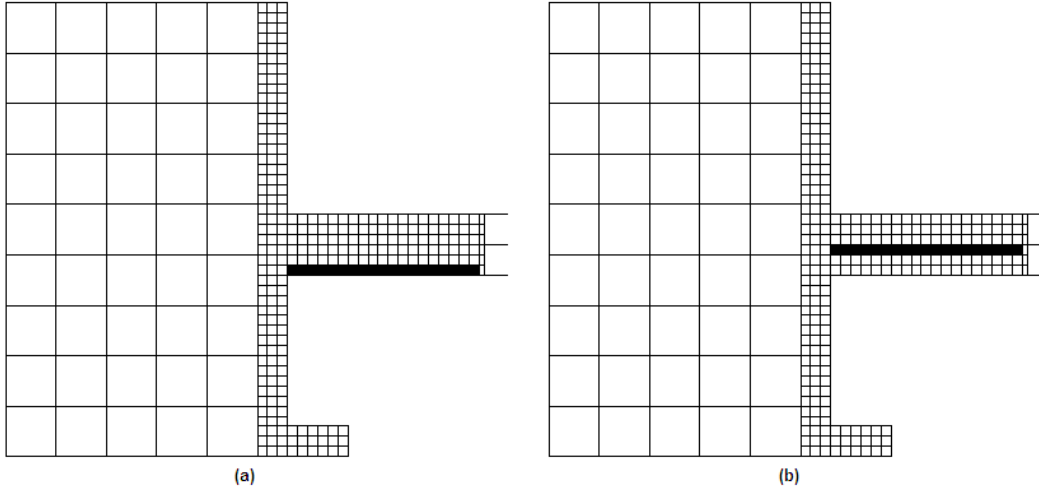


Figura C.8. Localización de los nodos 141 al 249 y 139 al 247 en el crisol.

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-F_{O_A} [T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1} + R_A (T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1})] \quad (a) \quad (C-18)$$

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-F_{O_I} [T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1} + Bi_5 (T_\infty - T_{m,n}^{p+1})] \quad (b) \quad (C-19)$$

Nodos de aluminio en contacto con el crisol (figura C.9a) y nodos del crisol expuestos a convección (figura C.9b).

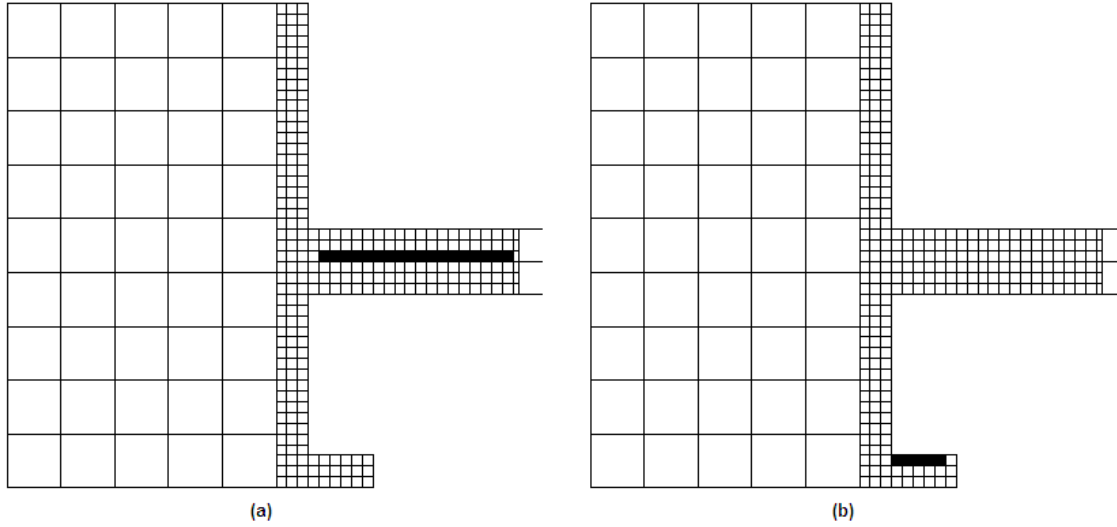


Figura C.9. Localización de los nodos 144 al 246 y 256 al 268 en el crisol.

$$T_{271}^p = T_{271}^{p+1}$$

$$-F_{OI} [T_{268}^{p+1} + T_{272}^{p+1} - 2T_{271}^{p+1} + Bi_5 (T_\infty - T_{271}^{p+1}) + Bi_6 (T_\infty - T_{271}^{p+1})] \quad (a) \quad (C-20)$$

$$T_{272}^p = T_{272}^{p+1}$$

$$-F_{OI} [T_{271}^{p+1} + T_{273}^{p+1} - 3T_{272}^{p+1} + Bi_6 (T_\infty - T_{272}^{p+1})] \quad (b) \quad (C-21)$$

Nodos del crisol expuestos a convección (figura C.10).

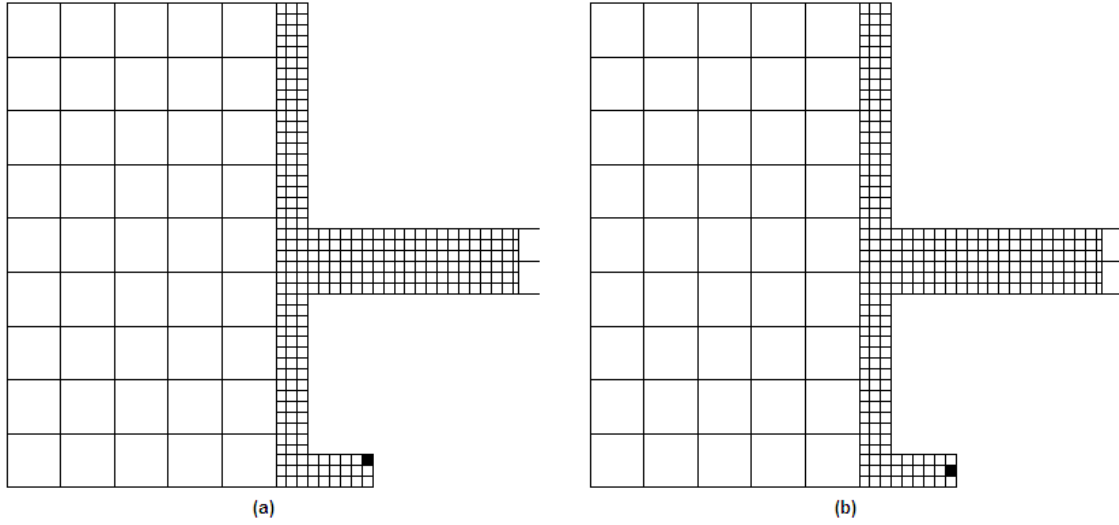


Figura C.10. Localización de los nodos 271 y 272 en el crisol.

$$T_{273}^p = T_{273}^{p+1}$$

$$-FO_I [T_{272}^{p+1} + T_{270}^{p+1} - 2T_{273}^{p+1} + Bi_6 (T_\infty - T_{273}^{p+1}) + Bi_7 (T_\infty - T_{273}^{p+1})] \quad (a) \quad (C-22)$$

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-FO_I [T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1} + Bi_7 (T_\infty - T_{m,n}^{p+1})] \quad (b) \quad (C-23)$$

Nodos del crisol expuestos a convección (figura C.11).

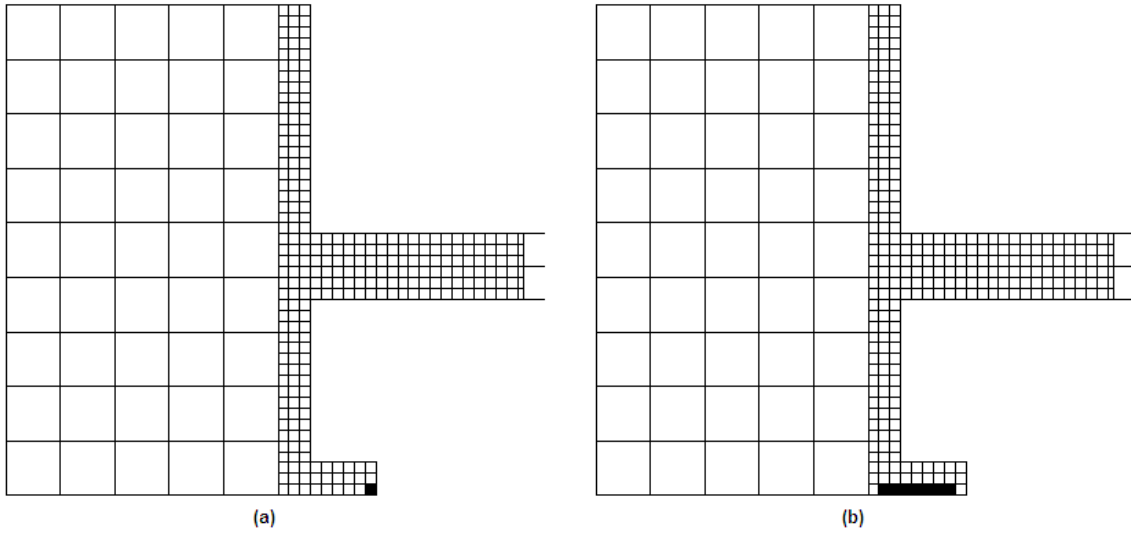


Figura C.11. Localización de los nodos 273 y 90 al 270 en el crisol.

$$T_{250}^p = T_{250}^{p+1} - Fo_A [2T_{244}^{p+1} + T_{251}^{p+1} - 3T_{250}^{p+1} + Bi_3 (T_\infty - T_{250}^{p+1})] \quad (a) \quad (C-24)$$

$$T_{251}^p = T_{251}^{p+1} - Fo_A [2T_{245}^{p+1} + T_{250}^{p+1} + T_{252}^{p+1} - 4T_{251}^{p+1}] \quad (b) \quad (C-25)$$

Nodo de tamaño medio (corte de simetría) de aluminio expuesto a convección (figura C.12a) y nodo de tamaño medio con conducción (figura C.12b).

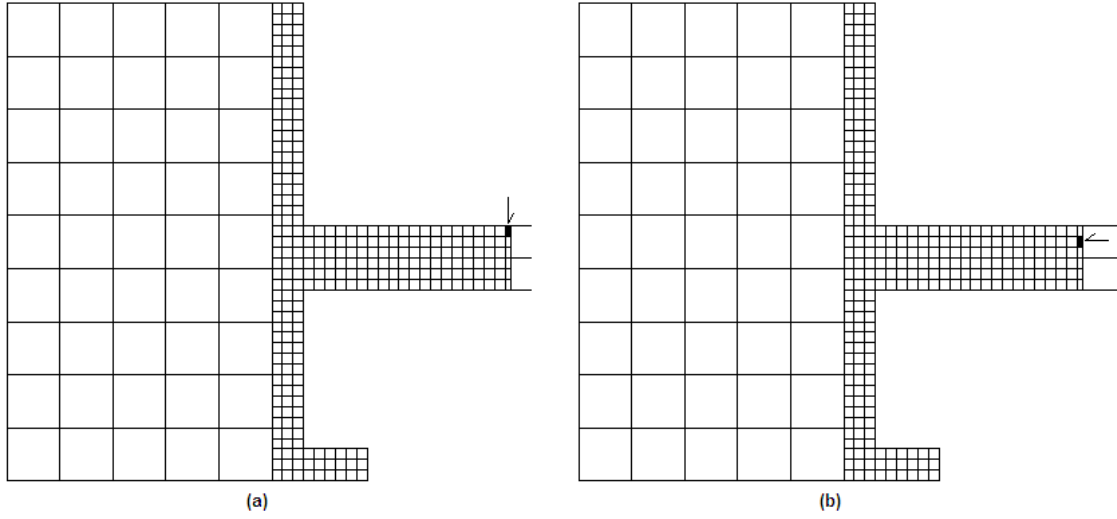


Figura C.12. Localización de los nodos 250 y 251 en el crisol.

$$T_{252}^p = T_{252}^{p+1} - Fo_A [2T_{246}^{p+1} + T_{251}^{p+1} - 3T_{252}^{p+1} + R_A (T_{253}^{p+1} - T_{252}^{p+1})] \quad (a) \quad (C-26)$$

$$T_{253}^p = T_{253}^{p+1} - Fo_I [2T_{247}^{p+1} + T_{254}^{p+1} - 3T_{253}^{p+1} + R_I (T_{252}^{p+1} - T_{253}^{p+1})] \quad (b) \quad (C-27)$$

Nodo de tamaño medio (corte de simetría) de aluminio en contacto con el crisol (figura C.13a) y nodo de tamaño medio del crisol en contacto con el aluminio (figura C.13b).

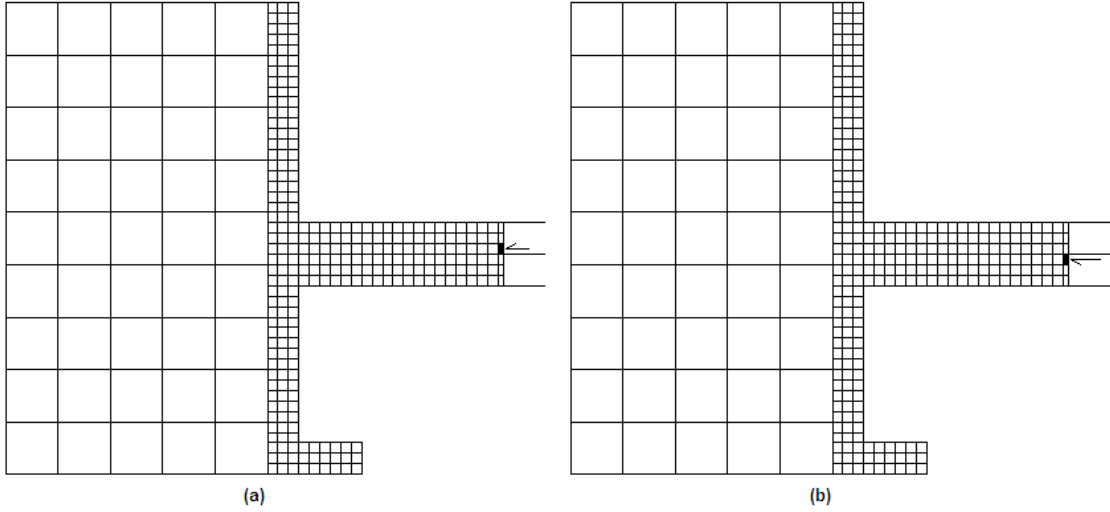


Figura C.13. Localización de los nodos 252 y 253 en el crisol.

$$T_{254}^p = T_{254}^{p+1} - Fo_I [2T_{248}^{p+1} + T_{253}^{p+1} + T_{255}^{p+1} - 4T_{254}^{p+1}] \quad (a) \quad (C-28)$$

$$T_{255}^p = T_{255}^{p+1} - Fo_I \left[2T_{249}^{p+1} + T_{254}^{p+1} - 3T_{255}^{p+1} + Bi_8 (T_\infty - T_{255}^{p+1}) + \frac{q'' \Delta x}{2k_I} \right] \quad (b) \quad (C-29)$$

Nodo de tamaño medio (corte de simetría) del crisol (figura C.14a) y nodo de tamaño medio del crisol expuesto a radiación solar concentrada y convección en el interior de la cavidad (figura C.14b).

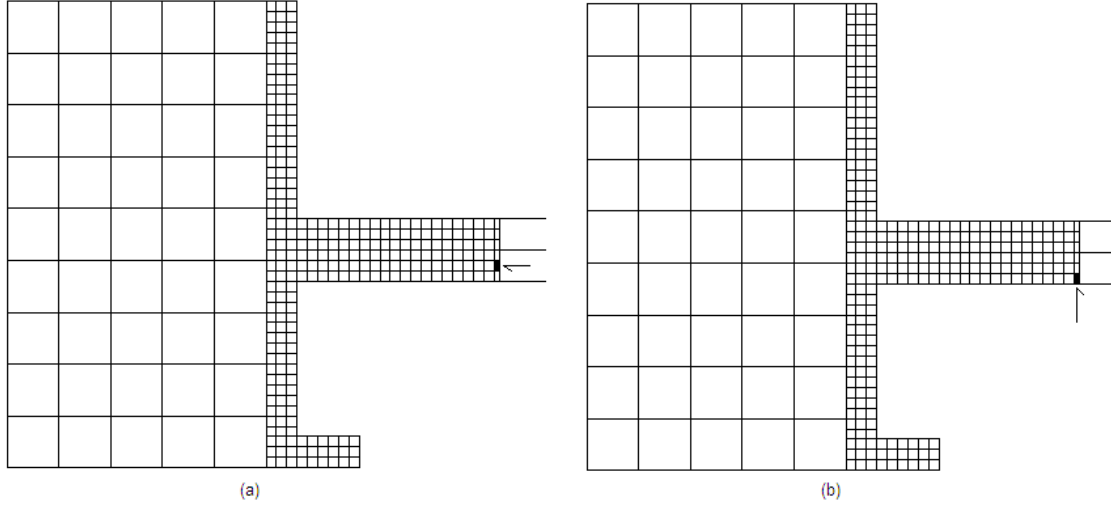


Figura C.14. Localización de los nodos 254 y 255 en el crisol.

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1} - \frac{Fo_R}{25} [T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} - 4T_{m,n}^{p+1}] \quad (a) \quad (C-30)$$

$$T_{274}^p = T_{274}^{p+1} - \frac{Fo_R}{25} [T_{283}^{p+1} + T_{275}^{p+1} - 2T_{274}^{p+1}]$$

$$- \frac{Fo_R}{25} (RR) [T_1^{p+1} + T_2^{p+1} + T_3^{p+1} + T_4^{p+1} + T_5^{p+1} - 5T_{274}^{p+1}]$$

$$- \frac{Fo_R}{5} (Bi_9) (T_\infty - T_{274}^{p+1}) \quad (b) \quad (C-31)$$

Nodos del aislante (figura C.15a) y nodo del aislante en contacto con el crisol y expuesto a convección (figura C.15b).

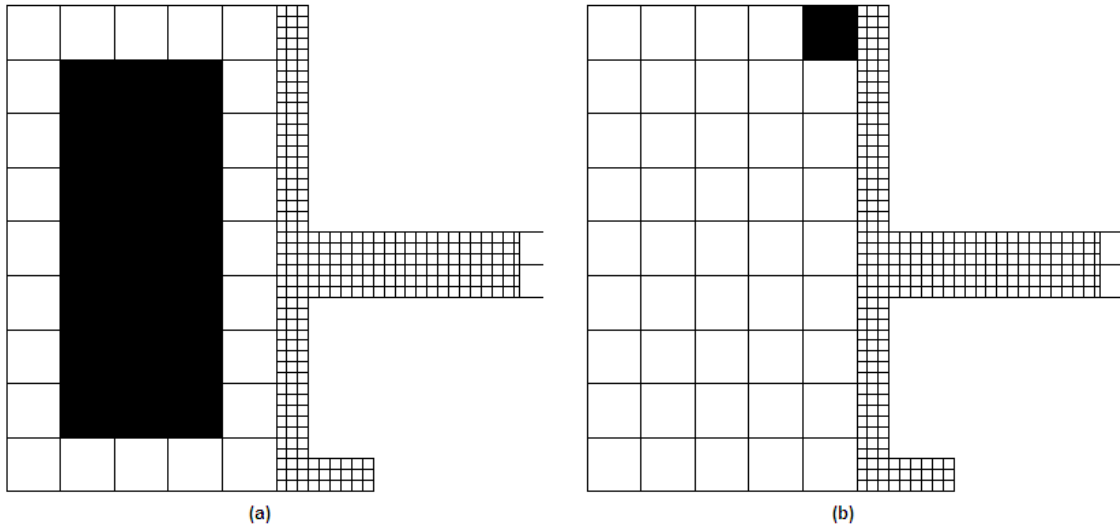


Figura C.15. Localización de los nodos 274 y centrales en la sección de aislante.

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-\frac{F_{OR}}{25} [T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1}] - \frac{F_{OR}}{5} (Bi_{10}) [T_{\infty} - T_{m,n}^{p+1}] \quad (a) \quad (C-32)$$

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1}$$

$$-\frac{F_{OR}}{25} [T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1}] - \frac{F_{OR}}{5} (Bi_{11}) [T_{\infty} - T_{m,n}^{p+1}] \quad (b) \quad (C-33)$$

Nodos del aislante expuestos a convección (figura C.16).

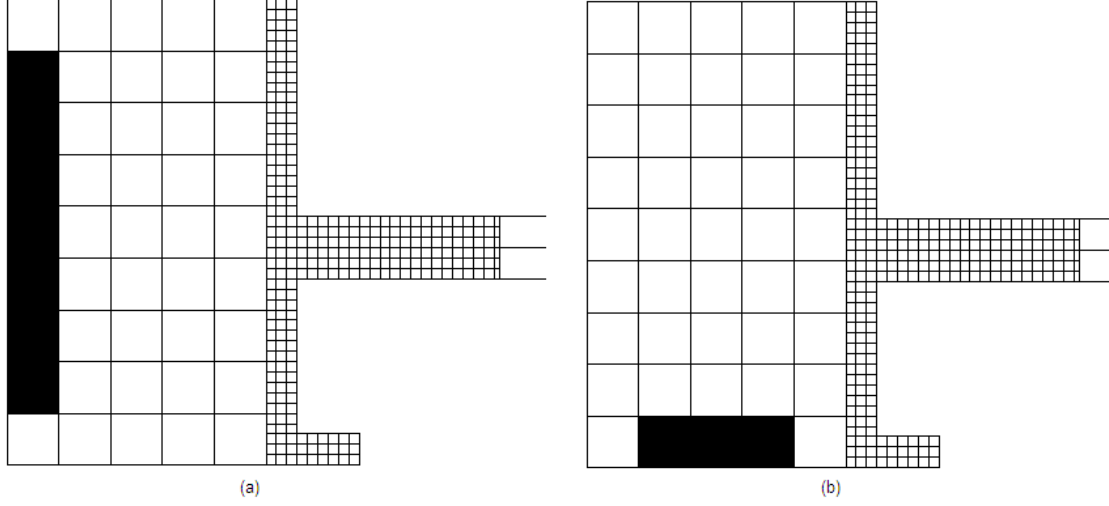


Figura C.16. Localización de los nodos 311 al 317 y 291,300,309 en la sección de aislante.

$$\begin{aligned}
 T_{282}^p &= T_{282}^{p+1} - \frac{Fo_R}{25} [T_{281}^{p+1} + T_{291}^{p+1} - 2T_{282}^{p+1}] \\
 &- \frac{Fo_R}{25} (RR) [T_{41}^{p+1} + T_{42}^{p+1} + T_{43}^{p+1} + T_{44}^{p+1} + T_{45}^{p+1} - 5T_{282}^{p+1}] \\
 &- \frac{Fo_R}{5} (Bi_{11}) (T_\infty - T_{282}^{p+1}) \quad (a)
 \end{aligned} \tag{C-34}$$

$$\begin{aligned}
 T_{m,n}^p &= T_{m,n}^{p+1} - \frac{Fo_R}{25} [T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1}] \\
 &- \frac{Fo_R}{25} (RR) [T_{m+1(a \rightarrow e),n}^{p+1} - 5T_{m,n}^{p+1}] \quad (b)
 \end{aligned} \tag{C-35}$$

donde el término $T_{m+1(a \rightarrow e),n}^{p+1}$ representa a los cinco nodos pequeños correspondientes al material del crisol ubicados a la derecha del nodo de material aislante (refractario). Para el nodo del aislante expuesto a convección y en contacto con el crisol (figura C.18a) y nodos del aislante en contacto con el crisol (figura C.18b).

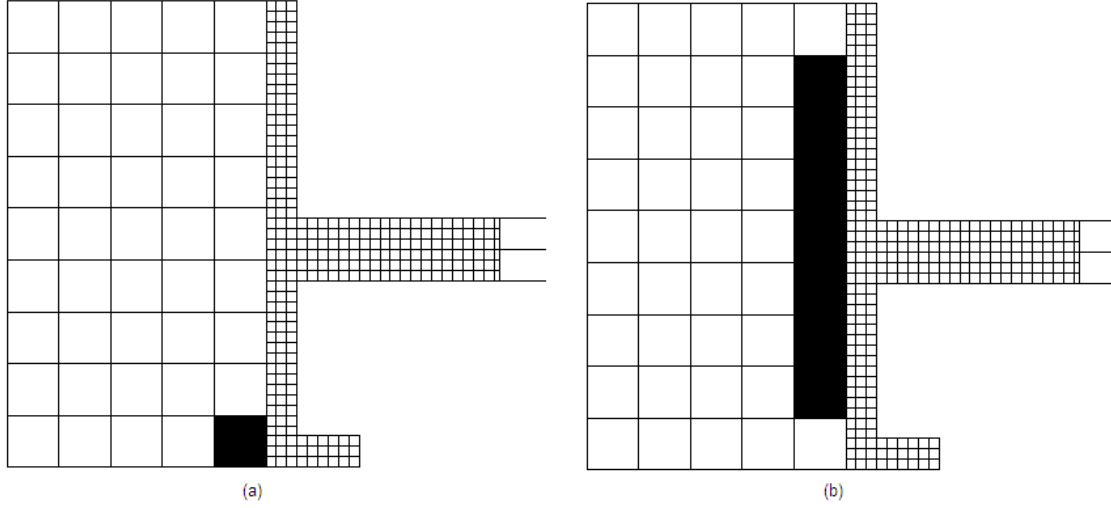


Figura C.18. Localización de los nodos 282 y 275 al 281 en la sección de aislante.

$$T_{310}^p = T_{310}^{p+1} - \frac{F_{OR}}{25} [T_{311}^{p+1} + T_{301}^{p+1} - 2T_{310}^{p+1}]$$

$$- \frac{F_{OR}}{5} (Bi_{10}) [T_{\infty} - T_{310}^{p+1}] - \frac{F_{OR}}{5} (Bi_9) [T_{\infty} - T_{310}^{p+1}] \quad (a) \quad (C-36)$$

$$T_{m,n}^p = T_{m,n}^{p+1} - \frac{F_{OR}}{25} [T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} - 3T_{m,n}^{p+1}]$$

$$- \frac{F_{OR}}{5} (Bi_9) [T_{\infty} - T_{m,n}^{p+1}] \quad (b) \quad (C-37)$$

Nodos del aislante expuestos a convección (figura C.19).

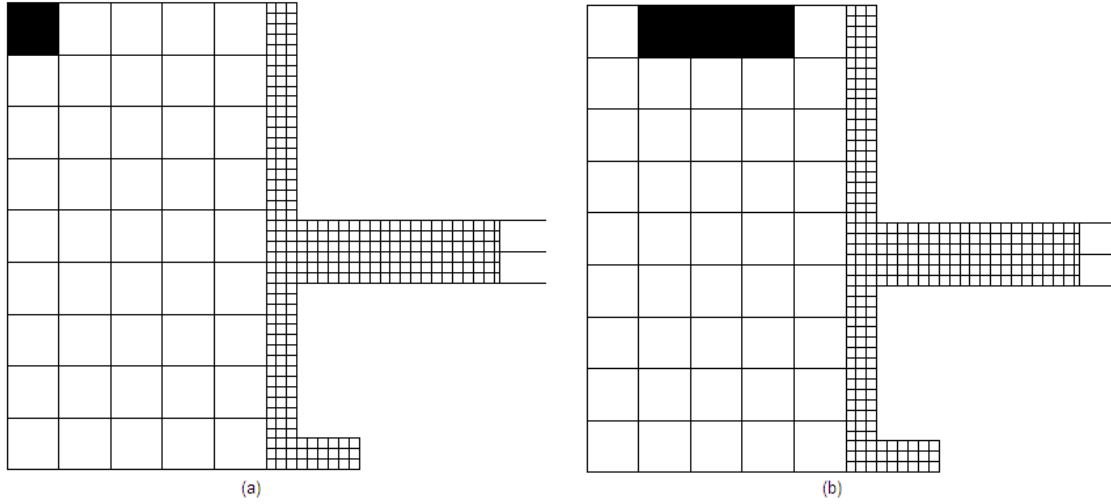


Figura C.19. Localización de los nodos 310 y 283, 292, 301 en la sección de aislante.

$$T_{318}^p = T_{318}^{p+1} - \frac{F_{OR}}{25} [T_{317}^{p+1} + T_{309}^{p+1} - 2T_{318}^{p+1}]$$

$$- \frac{F_{OR}}{5} (Bi_{10}) [T_{\infty} - T_{318}^{p+1}] - \frac{F_{OR}}{5} (Bi_{11}) [T_{\infty} - T_{318}^{p+1}] \quad (C-38)$$

Nodo del aislante expuesto a convección (figura C.20).

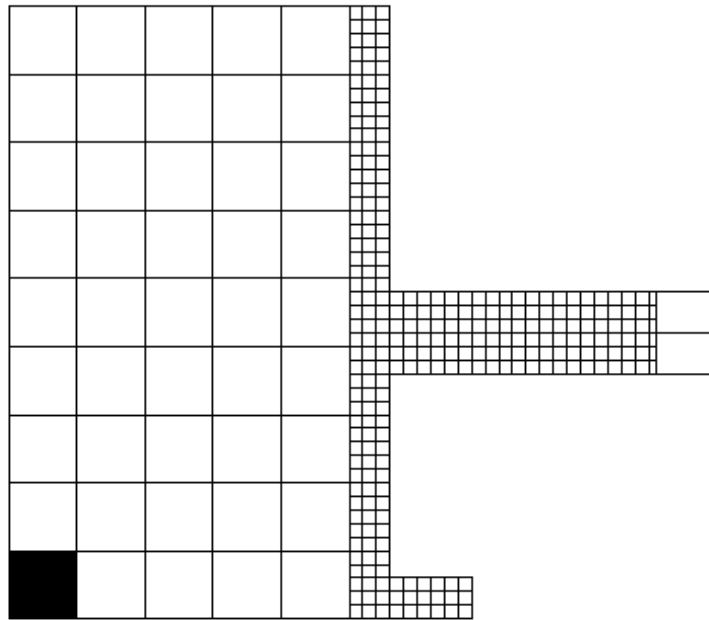


Figura C.20. Localización del nodo 318 en la sección de aislante.