



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"CALENTAMIENTO DE METALES POR MEDIO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y
CONCENTRACIÓN SOLAR"

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

MOISÉS OMAR SALGADO BALTAZAR



DIRECTOR DE TESIS:

DR. ARMANDO ROJAS MORÍN

MÉXICO 2014

AGRADECIMIENTOS:

- Al Proyecto PAPIIT No. 112613, por los recursos otorgados para la adquisición de la licencia académica de COMSOL MULTIPHISYCS[®]., con la cual se pudo realizar la simulación numérica.
- Al Dr. Armando Rojas Morín por su diligente guía, y por la oportunidad de participar en este proyecto.
- A mis Padres por brindarme todo su apoyo, cariño y paciencia que hoy en día me llevaron a lograr esta meta.

OBJETIVO:

ESTE TRABAJO TIENE COMO OBJETIVO EL ANÁLISIS DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO EN UN SÓLIDO METÁLICO. DICHO CALENTAMIENTO SE LLEVÓ A CABO POR MEDIO DE UN HORNO DE INDUCCIÓN Y CONCENTRACIÓN SOLAR AL MISMO TIEMPO.

LA SOLUCIÓN DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR SE REALIZÓ CON AYUDA DEL PROGRAMA COMSOL MULTIPHYSICS®.

ÍNDICE:

INTRODUCCIÓN.	9
1. PROCESOS DE MANUFACTURA QUE INVOLUCRAN CALOR.	13
1.1. FUNDICIÓN.	13
1.2. SOLDADURA.	13
1.3. TRATAMIENTOS TÉRMICOS.	15
1.4. HORNOS PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO.	20
1.5. ECONOMÍA DE LOS HORNOS POR COMBUSTIBLE.	22
1.6. HORNOS DE RESISTENCIA ELÉCTRICA.	23
2. DESCRIPCIÓN DE LOS HORNOS DE INDUCCIÓN Y CONCENTRADORES SOLARES DE DISCO PARABOLICO.	27
2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.	28
2.2. INDUCCIÓN EN SÓLIDOS METÁLICOS.	31
2.3. APLICACIONES.	33
2.4. VENTAJAS.	37
2.5. CONCENTRADORES SOLARES.	38
3. MODELO MATEMÁTICO.	43
3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO.	43
3.2. FORMULACIÓN DEL MODELO DE INDUCCIÓN.	49
3.3. FORMULACIÓN DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.	50
3.4. SIMULACIÓN NUMÉRICA.	51
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
4.1. SIMULACIÓN 1 CASO: CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.	55
4.2. SIMULACIÓN 2 CASO: CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN MÁS CONCENTRADOR SOLAR.	61
4.3. SIMULACIÓN 3 CASO: INDUCTOR ELECTROMAGNÉTICO RECORRIDO.	67
CONCLUSIONES.	73
BIBLIOGRAFÍA.	75

INTRODUCCIÓN

El fuego fue el primer elemento que aprendió el hombre a dominar, el calor siempre representó una ventaja en el desarrollo de la sociedad, cuya importancia no ha disminuido a través de las eras, y desde hace un par de siglos no solo se usa el fuego y el calor para comodidad diaria, sino que ha pasado a ser elemento fundamental del desarrollo tecnológico e industrial que nos caracteriza.

Cuando se habla de calor lo más común es referirse a las fuentes obvias de este como lo es el que produce el fuego o el efecto del Sol, pero mientras este último siempre ha presentado un reto tecnológico, mucho mayor es poder aplicarlo cómodamente en la industria. El uso del fuego como fuente de energía la ha impulsado desde el principio: transformando las propiedades de la materia con el uso del calor. Enfocándose hacia un aspecto metalúrgico, pues el uso de los metales marco el final y el inicio de una etapa importante en nuestro desarrollo como civilización, el calor se usó para ablandar, dar forma, endurecer y mezclar toda clase de metales y aleaciones, lo que permitió la creación de herramientas superiores, duraderas y de mayor rango de utilidad que las de piedra y madera.

Pero la creación de calor no se limita a la combustión. Desde el desarrollo de la electricidad y la fotónica se tienen alternativas que no requieren de la combustión directa de un elemento para producir calor, lo cual, debido a las actuales tendencias ecológicas y de sustentabilidad, representa una ventaja y una oportunidad de redirigir

los métodos industriales actuales en otras direcciones, abriendo así nuevas oportunidades de desarrollo.

Debido a la búsqueda de formas de calentamiento de metales más eficientes, es decir sin los desperdicios de energía clásicos de los procesos de transferencia de calor, se toma en cuenta la practicidad de el calentamiento por inducción electro-magnética, el cual se analiza al mismo tiempo desde un punto de vista electromagnético y térmico [0.1].

Ya que en los procesos de calentamiento por inducción los materiales a calentar son ferro-magnéticos, usualmente las propiedades de estos (conductividad eléctrica, permeabilidad magnética y conductividad térmica) se ven afectadas por los mismos incrementos de temperatura, el modelado matemático de este proceso juntas crea un sistema de ecuaciones magneto-térmicas no lineales, que se describen y resuelven por medio del método del elemento finito [0.2]. En el análisis se desarrollan las ecuaciones de Maxwell de campo eléctrico y campo magnético, así como la ecuación de Fourier para la transferencia de calor, como base para el desarrollo de elemento finito, mismo que se resuelve usando el software COMSOL MULTIPHYSICS®, el cual ya ha demostrado su practicidad en esta clase de análisis [0.1] [0.3] [0.4] [0.5]. Los modelos obtenidos (térmico y electromagnético) se pueden usar para establecer condiciones tecnológicas necesarias para el diseño calentadores por inducción [0.6].

El modelo implementado involucra los campos electromagnéticos, la distribución de temperaturas [0.1] [0.2], pero no involucra el análisis de los esfuerzos térmico-mecánicos de la pieza, como otros autores señalan en sus trabajos [0.5] [0.6]. También se da referencia a la

importancia de detallar todos los balanceos y ecuaciones, así como refinar el modelo por elemento finito con el fin de reducir cualquier error que involucre la complejidad en el estudio del proceso [0.5].

Para trabajos posteriores, se buscará realizar en este sentido, diversas simulaciones numéricas para el calentamiento por inducción electromagnética en piezas axisimétricas con una sola bobina y de igual forma, variar el número de espirales. De la misma manera, se busca implementar el uso de un concentrador solar de disco parabólico que haga un calentamiento o un precalentamiento a la pieza para determinar su funcionalidad y su variación con la eficiencia en la distribución de calor y las temperaturas alcanzadas, así como comparar la simulación con modelos experimentales y proponer aplicaciones a nivel industrial.

CAPITULO 1

PROCESOS DE MANUFACTURA QUE INVOLUCRAN CALOR

1.1 Fundición

La fundición es el proceso en el que el metal derretido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de este (figura 1.1). Es uno de los procesos mas antiguos de conformación, pues se remonta a hace 6000 años. El oro fue el primer metal descubierto y usado por las civilizaciones antiguas; era maleable y se martillaba con facilidad para darle forma a temperatura ambiente. Fue el descubrimiento posterior del cobre lo que originó la necesidad de fundición. Aunque el cobre podía forjarse para darle forma, el proceso era más difícil y se limitaba a formas relativamente simples [1.1].



Figura 1.1 Diagrama de vaciado de metal fundido en un molde

1.2 Soldadura

La soldadura es un proceso en el cual se unen dos materiales, fundiendo en muchos casos una aleación, haciéndola fluir y dejándola enfriar hasta solidificar. Las aleaciones usadas usualmente tienen un punto de fusión entre los 170 y 400 grados Celsius. Los metales que usualmente pueden ser soldados

incluyen el hierro, níquel, cobre, plomo, estaño, zinc y aluminio; y la soldadura suele ser una aleación de plomo o estaño. El proceso produce sellos para gases y líquidos y es comúnmente usada en plomería y electrónica. La soldadura actúa como barrera contra la oxidación lo cual mejora el sello térmico, conductivo y mecánico.

La American Welding Society ha catalogado más de 50 tipos diferentes de operaciones de soldadura que utilizan diversos tipos o combinaciones de energía para proporcionar la energía requerida [1.1]. Los procesos de soldadura pueden dividirse en dos grupos principales: Soldadura por fusión y soldadura de estado sólido

Soldadura de fusión. Son procesos que usan calor para fundir los metales base; en muchas operaciones se agrega un metal de relleno a la combinación fundida para facilitar el proceso y proporcionar volumen y resistencia a la unión soldada como muestra la figura 1.2

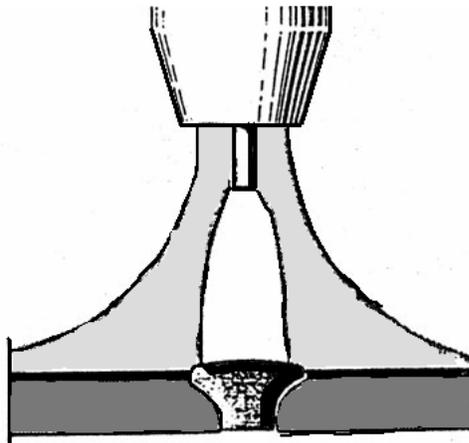


Figura 1.2 Soldadura de fusión.

Soldadura en estado sólido. Se refiere a los procesos de unión en los cuales la fusión proviene solo de la aplicación de presión o de una combinación de calor y presión (figura 1.3). Si se usa calor, la temperatura del proceso está por debajo del punto de fusión de los metales que se van a soldar [1.1].

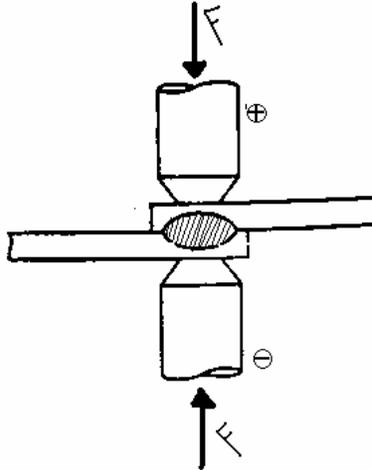


Figura 1.3 Soldadura en estado sólido

1.3 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son un grupo de técnicas de manufactura utilizadas para alterar las propiedades de dureza y tenacidad de un material. Los tratamientos térmicos incluyen pero no se limitan a recocido, endurecimiento superficial, endurecimiento por inducción, endurecimiento por precipitación y templado. Un metal que ha sido endurecido con calor, puede ser muy frágil para un producto final a menos que sea condicionado con un tratamiento térmico. Usualmente, el metal es puesto a cierta temperatura durante cierto tiempo, y luego lentamente se enfría en un periodo determinado. El calentamiento puede ser cíclico, y en cada ciclo de enfriamiento se forman cristales en el metal. La cantidad exacta de calor depende del metal o aleación a ser tratada, las propiedades finales, pueden tener diferente dureza o tenacidad, dependiendo de la fuente de metal o aleación utilizado.

Recocido. El recocido consiste en calentar el metal a una temperatura adecuada, en la cual se mantiene por un cierto tiempo y después se enfría lentamente. El recocido se realiza sobre un metal en cualquiera de los siguientes casos:

1. Para reducir la dureza y al fragilidad.
2. Para alterar la microestructura de manera que pueda obtener las propiedades mecánicas deseadas.
3. Para ablandar los metales y mejorar su maquinabilidad o formabilidad,
4. Para recristalizar los metales trabajados en frío,
5. Para aliviar los esfuerzos residuales inducidos por los procesos de formado previo.

Normalización. Implica ciclos similares de calentamiento y recalentamiento, pero las velocidades de enfriamiento son más rápidas. Se permite que el acero se enfríe en aire, a temperatura ambiente.

Austenitización. Implica calentamiento del acero a una temperatura lo suficientemente alta para convertirse entera o parcialmente en austenita. La formación de austenita, cuya estructura cristalina puede verse en la figura 1.4, implica un cambio de fase que requiere tiempo y calentamiento.

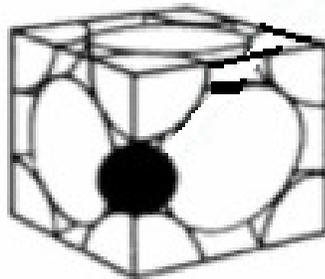


Figura 1.4 Estructura cristalina Austenita

Revenido. Es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros endurecidos para reducir su fragilidad, incrementar su ductilidad y tenacidad y aliviar los esfuerzos en la estructura de la martensita como se ve en la figura 1.5. El

tratamiento implica calentamiento y mantenimiento de la temperatura por debajo de la eutectoide durante aproximadamente una hora, seguido de un enfriamiento rápido.

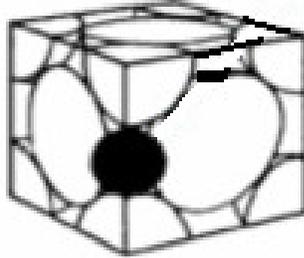


Figura 1.5 Estructura cristalina Martensita

Endurecimiento por precipitación. Implica la formación de finas partículas que actúan para bloquear el movimiento de las dislocaciones y hacer mas resistente y duro al metal. Es el principal tratamiento térmico para hacer resistentes las aleaciones de aluminio, cobre, magnesio, níquel y otros metales no ferrosos. El endurecimiento por precipitación puede usarse también para hacer resistentes los aceros endurecidos que no pueden formar martensita por medio del método usual. Este proceso consta de 3 pasos:

1. tratamiento de la solución, en el cual se calienta la aleación a la temperatura arriba de la línea de solvus.
2. enfriamiento por inmersión a temperatura ambiente para crear una solución sólida sobresaturada.
3. tratamiento por precipitación o envejecimiento, en el cual se calienta la aleación a una temperatura por debajo de la temperatura de fusión para ocasionar la precipitación de partículas finas de la fase β [1.1] [1.2].

Endurecimiento superficial. Se refiere a cualquiera de los varios tratamientos termoquímicos aplicados al acero en los cuales la composición de la superficie de la pieza se altera por la adición de carbono, nitrógeno u otros elementos.

- *Carburización.* Es el tratamiento de endurecimiento superficial más común. Emplea el calentamiento de una pieza de acero al bajo carbono en presencia de un medio rico en carbono, de manera que el C se difunda en la superficie.
- *Nitruración.* Es un tratamiento mediante el cual se difunde nitrógeno en las superficies de los aceros de aleación especial, para producir una delgada capa dura sin enfriar por inmersión.
- *Carbo-nitruración.* Es un tratamiento en el que tanto el carbono como el nitrógeno se absorben en la superficie del acero, por lo general mediante calentamiento en un horno que contiene carbono y amoníaco.
- *Cromado.* Requiere temperaturas más altas y tiempos de tratamientos más largos que los métodos anteriores. Pero la corteza resultante no solamente es dura y resistente al desgaste, sino también al calor y a la corrosión.
- *Borurado.* Se lleva en aceros para herramienta, aleaciones basadas en níquel y cobalto, y hierros fundidos; también se ejecuta en aceros al carbono, usando polvos, sales o atmósferas gaseosas que contienen boro.

Endurecimiento por flama. Este método implica el calentamiento del trabajo por medio de uno o más sopletes, seguido de un rápido enfriamiento por inmersión. Como proceso de endurecimiento se aplica en aceros al carbono y aleados, aceros para herramienta y fundiciones de hierro. El nombre sugiere una operación muy manual con una falta general de control sobre los resultados; sin embargo, el proceso puede configurarse incluyendo control de temperatura, fijadores para posicionar el trabajo respecto a la flama y dispositivos indicadores que operan durante ciclos precisos de tiempo.

Calentamiento por inducción. Este método implica la aplicación de energía inducida electro magnéticamente por medio de una bobina de inducción en una pieza de trabajo conductora de electricidad (figura 1.6). El calentamiento por inducción es un método ampliamente usado en la industria para procesos como la soldadura dura, la soldadura suave y el curado adhesivo, así como en varios tratamientos térmicos.

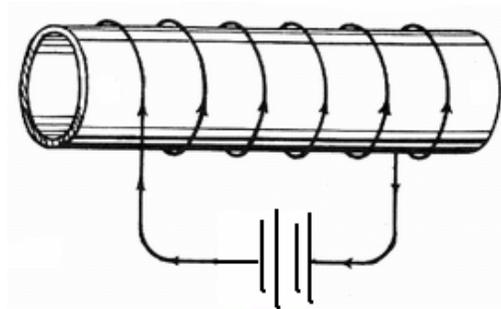


Figura 1.6 Diagrama de una bobina

Calentamiento por resistencia a alta frecuencia. Este método se utiliza para endurecer áreas específicas de superficies de trabajo de acero mediante la aplicación de calentamiento por resistencias localizado a altas frecuencias (40kHz).

Calentamiento por haz de electrones. Esta tecnología es relativamente nueva en manufactura. Sus aplicaciones incluyen el corte, la soldadura por fusión y el tratamiento térmico.

Calentamiento por haz láser. Los láseres constituyen otra tecnología nueva, cuyas aplicaciones incluyen corte, soldadura por fusión, medición e inspección y tratamiento térmico. El endurecimiento de acero por este método, se enfoca un haz de luz consistente de alta densidad en un área pequeña; el haz se mueve generalmente a lo largo de una trayectoria definida sobre la superficie de trabajo (figura 1.7).

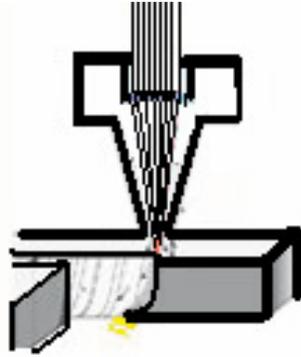


Figura 1.7 Corte con láser

1.4 Hornos para el tratamiento térmico.

Los hornos varían mucho en cuanto a la tecnología, tamaño y capacidad, construcción y control de la atmósfera. Por lo general, calientan las piezas mediante una combinación de radiación, convección y conducción. La tecnología de calentamiento se divide entre los calentados con combustible y los calentados con electricidad. Los hornos calentados con combustible, como el de la figura 1.8, son generalmente calentados directamente, lo cual significa que las piezas de trabajo quedan expuestas directamente a los productos de la combustión. Los hornos eléctricos usan una resistencia eléctrica para calentar; son más limpios, silenciosos y proporcionan un calentamiento mas uniforme, pero son más caros tanto en su valor de compra como en su costo de operación [1.3].



Figura 1.8 Horno industrial para tratamientos térmicos de **LOBO HORNOS INDUSTRIALES**[®]
<http://www.lobohi.com/>

Un horno convencional es un espacio cerrado diseñado para resistir las fugas de calor y adecuarse al tamaño de las piezas a procesar. Los hornos se clasifican en de carga por lotes, y continuos. Los hornos por lote son mas simples, consisten básicamente en un sistema de calentamiento dentro de una cámara aislada con una puerta para cargar y descargar las piezas ejemplo de este tipo general de horno son los hornos de caja, que se construyen como cajas rectangulares, disponibles en varios tamaños; hornos con carro, que son mucho mas grandes y usan carros tipo ferrocarril para mover piezas grande en la cámara del calentamiento; y hornos tipo campana, en los cuales la cubierta o campana del horno se puede elevar por medio de una grúa de puente para cargarlo y descargarlo.

Los hornos continuos se usan generalmente para velocidades de producción más altas y proporcionan un medio para mover la pieza de trabajo en el interior de la cama de calentamiento. Los mecanismos alternativos para transportar el trabajo incluyen configuraciones circulares que utilizan solera giratorias, y del tipo en línea recta en el cual las piezas se mueven mediante transportadores a través de una o varias cámaras de calentamientos colocadas en línea.

Los hornos al vacío son capaces de crear un vacío en la cámara de calentamiento y calentar las piezas por radiación. Una ventaja de estos hornos que se cita frecuentemente es que evitan la oxidación superficial de las piezas de trabajo; esto es una ventaja atractiva para el control de atmósfera. Sin embargo, el tiempo requerido en cada ciclo para crear el vacío es una desventaja que aumenta el tiempo de producción [1.2].

1.5 Economía de los hornos por combustible.

Los términos “economía” y “rendimiento” cuando se utilizan en un verdadero sentido, al aplicarse a los hornos industriales, se refieren al costo de calentamiento por unidad de peso de producto terminado o listo para la venta [1.4].

El “costo de calentamiento” incluye no solamente el costo del combustible, sino también el costo de la calefacción, el costo de explotación del horno, la amortización de éste, los costos de mantenimiento y reparación. El costo de generación de una atmósfera protectora y el costo de las piezas quemadas, estropeadas o rechazadas por cualquier motivo. Además incluye el costo de mecanización de aquellas piezas que la inspección encuentra defectuosas a causa de un calentamiento inapropiado. Finalmente, incluye el costo de la manipulación del material dentro y fuera del horno.

Entrando tantos factores diferentes en el costo de calentamiento, es muy posible que algunos casos el combustible u otro material de energía térmica de precio superior pueda resultar el mas barato al final, en lo que se refiere al costo total de calentamiento. De hecho, estas condiciones se presentan en mucho hornos eléctricos de tratamiento térmico.

En el calentamiento de algunos metales, por ejemplo el acero, se proporciona una parte del calor por combustión (oxidación) de la carga. El calor de combustión del hierro o del acero es de 1340 a 1800 kcal/kg. Si se calienta acero a 1204 °C se pierde, por lo general, de un 1 a un 4% del peso de la carga al formarse la cascarilla de óxidos, lo que constituye la “pérdida de horno” [1.4]. En consecuencia, de 14 350 a 57 00 kcal/ton neta de acero se originan en la combustión de una parte de la carga. Esto constituye una fracción mínima del calor (o del combustible consumido en el horno), sin embargo, esta fracción es muy costosa, puesto que el acero con 1585 kcal/kg

cuesta más de 10 veces más que una tonelada de carbón con 6680 a 7780 kcal/kg. En la práctica es fácil encontrar muchos hornos en los que el costo del combustible es el factor principal del gasto y en los que la economía de combustible debe ser un factor a estudiar, aparte de todos los demás factores que forman la suma total del costo de calentamiento. Además, es necesario conocer previamente el consumo probable de combustible de un horno para seleccionar el tamaño y número adecuado de quemadores, para calcular las dimensiones de los respiros, canales de humo y chimeneas, para seleccionar el equipo auxiliar adecuado.

1.6 Hornos de resistencia eléctrica.

Son todos aquellos equipos o instalaciones que operan, en todo o en parte del proceso [1.5], a temperatura superior a la ambiente, realizando el calentamiento de forma directa sobre las piezas (inducción, pérdidas dieléctricas, resistencia propia) o de forma indirecta por transmisión de calor de otros elementos (resistencias eléctricas (figura 1.9), tubos radiantes eléctricos, etc.) y cuya fuente de energía calorífica requerida para el calentamiento procede la energía eléctrica en diversas formas:

- Arco voltaico de corriente alterna o continua. juntas
- Inducción electromagnética.
- Alta frecuencia en forma de dielectricidad o microondas.
- Resistencia ohmica directa de las piezas.
- Resistencias eléctricas dispuestas en el horno que se calienta por transmisión de calor (figura 1.9).
- Otras menos utilizadas actualmente en la industria, tales como haz de electrones, plasma y láser.

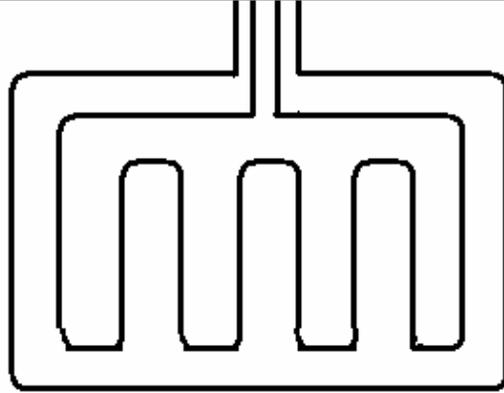


Figura 1.9 Diagrama de una resistencia eléctrica

Campos de aplicación.

- Industria Siderúrgica

Hornos altos de reducción de mineral de hierro.

- Mezcladoras de arrabio calentado por llama o por inducción
- Convertidores de acero
- Hornos de arco por fusión de chatarra
- Hornos de inducción por fusión de chatarra
- Hornos de recalentar para las operaciones de laminación, forja, extrusión...
- Hornos de tratamiento térmico (figura 1.10)
- Precalentadores de cesta

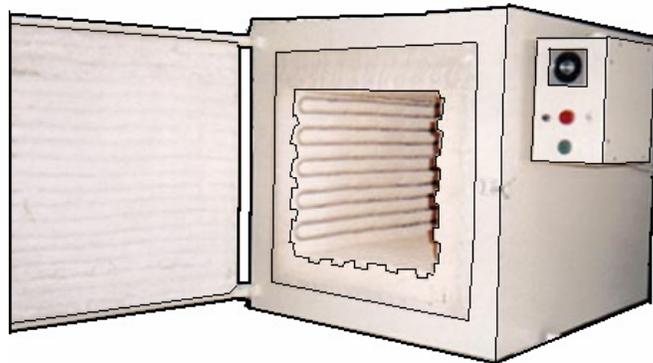


Figura 1.10 Horno eléctrico para tratamiento térmico

- Industria del aluminio
 - Celdas de electrolisis ígnea para convertir alúmina en aluminio fundido (figura 1.11).
 - Hornos de fusión y mantenimiento.
 - Hornos para calentar placas o redondos para laminación.
 - Hornos para tratamientos térmicos, fundamentalmente recocidos.

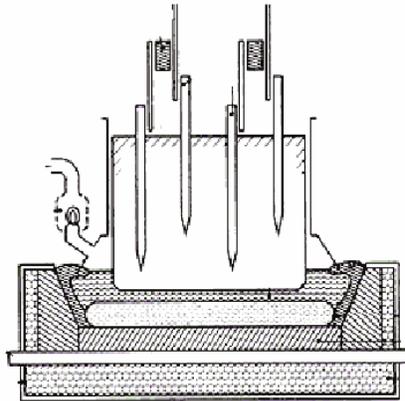


Figura 1.11 Celda de electrolisis para reducción de aluminio

- Industria del cobre y sus aleaciones.
 - Hornos de reducción de minerales
 - Hornos de fusión de chatarra del tipo de reverbero o crisol.
 - Hornos de recalentamiento para laminación, foja, extrusión o estampado.
 - Hornos de tratamientos térmicos, fundamentalmente recocidos y del tipo adecuado al producto a tratar.
- Industria de automoción.
 - Hornos de fusión de metales férricos y no férricos.
 - Hornos de tratamientos térmicos.
 - Hornos de preparación y pintado.
- Fundiciones.
 - Hornos de fusión y mantenimiento

- Hornos de tratamientos térmicos, continuos o intermitentes, de los tipos adecuados a la producción, forma de las piezas, temperatura requerida, etc.
- Industria de productos manufacturados.
 - Hornos de recocido de chapa magnética.
 - Hornos de soldadura brillante de pequeñas piezas.
 - Hornos de sinterizado.
 - Grandes hornos de recocido par la eliminación de tensiones en piezas.
 - Hornos de tratamiento de herramienta.

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DEL HORNO DE INDUCCIÓN Y CONCENTRADOR SOLAR DE DISCO PARABÓLICO

La inducción electromagnética, o simplemente "inducción", es un método para calentar materiales eléctricamente conductores tales como metales. Se utiliza comúnmente de precalentamiento en procesos metal mecánicos, en tratamientos térmicos, soldaduras, y fundiciones. El número de productos industriales y de consumo que se someten a calentamiento por inducción durante alguna etapa de su producción es muy grande y están en rápida expansión.

Como su nombre implica, el calentamiento por inducción se basa en las corrientes eléctricas que son inducidas internamente en el material a ser calentado. Estas corrientes, denominadas corrientes de Foucault (figura 2.1) disipan la energía y provocar el calentamiento.

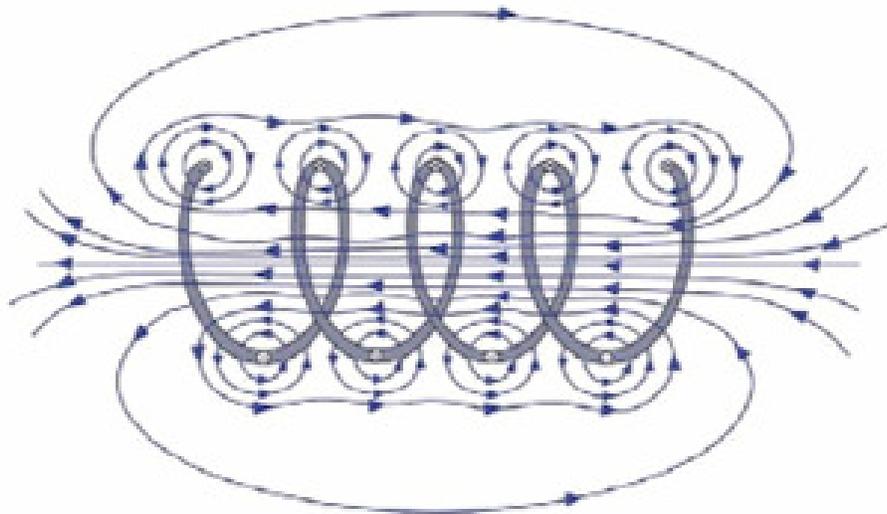


Figura 2.1 Diagrama del campo magnético y las corrientes de Foucault en un solenoide

Los componentes básicos de un sistema de calentamiento por inducción son una bobina de inducción, una fuente de alimentación de corriente (corriente alterna), y la propia pieza de trabajo. La bobina, la cual puede adoptar diferentes formas dependiendo del patrón de calentamiento requerido, está conectada a la fuente de alimentación. El flujo de corriente de corriente alterna a través de la bobina genera un campo magnético alterno que corta a través de la pieza de trabajo. Es este campo magnético alterno que induce las corrientes de Foucault que calientan la pieza.

2.1 Antecedentes Históricos

El nacimiento de la tecnología de inducción electromagnética se remonta a 1831, cuando, Michael Faraday (Figura 2.2) terminó dos bobinas de alambre en un anillo de hierro, y señaló que cuando se hace pasar una corriente alterna a través de una de las bobinas, una tensión era inducida en la otra. Reconociendo el potencial de aplicaciones de transformadores basados en este efecto, los investigadores trabajaron las siguientes décadas, en el desarrollo de equipos para la generación de corriente alterna de alta frecuencia.



Figura 2.2
Michael Faraday 1791 -
1867

No fue sino hasta la última parte del siglo XIX que las aplicaciones prácticas de la inducción para calentar materiales conductores, fueron descubiertas. La primera aplicación seria fue la fundición de metales. Inicialmente, esto se hizo usando el metal o crisoles conductores. Más tarde, Ferranti, Colby, y Kjellin desarrollaron hornos de fusión por inducción que usaban de crisoles no conductores. En estos diseños, las corrientes eléctricas fueron inducidos directamente, por lo general a una frecuencia de lineal simple, o de 60 Hz. Cabe señalar que estos hornos de fusión utilizaban corazones que contenían la

masa fundida en la forma de anillo. Esta práctica tenía dificultades inherentes provocadas por las fuerzas mecánicas creadas en la carga fundida debido a la interacción entre las corrientes de Foucault en la carga y las corrientes que fluyen en la bobina primaria, o de inducción. En casos extremos, causaba un efecto de "pellizco" sobre la masa fundida, y por lo tanto, rompía el flujo eléctrico necesario para la inducción, y calentamiento por inducción, que se produzca. Este tipo de problemas eran más graves en la fundición de metales no ferrosos.

Los hornos de fundición de anillo estaban casi eliminados en 1900 por el trabajo de Northrup, que diseñó y construyó un equipo que consistía en un crisol cilíndrico y una fuente de alimentación de chispa de alta frecuencia. Este equipo fue utilizado por primera vez por Baker & Company para fundir platino y por American Brass Company para fundir otras aleaciones no ferrosas. Sin embargo, las amplias aplicaciones de tales hornos de inducción "sin núcleo", estaban limitadas por la potencia alcanzada por los generadores de chispa. Esta limitación se alivió en cierta medida en 1922 por el desarrollo de conjuntos de motor-generador que podría suministrar niveles de potencia de varios cientos de kilovatios a frecuencias de hasta 960 Hz. No fue sino hasta finales de 1960 que los grupos electrógenos fueron reemplazados por los convertidores de estado sólido para las frecuencias que ahora se consideran ser la "frecuencia media" en vez de la gama de alta frecuencia.

Tras la aceptación del calentamiento por inducción para la fundición de metales, se buscaron y desarrollaron otras aplicaciones de esta tecnología prometedora. Entre estos se incluyen el endurecimiento superficial de los aceros por inducción, introducido por Midvale Steel (1927) y Ohio Crankshaft Company (mediados de 1930). La compañía utilizó un motor-generador para calentamiento superficial y endurecimiento de rodillos laminadores, una práctica todavía se sigue hoy en día casi todo el mundo para mejorar la

resistencia al desgaste y a la fatiga de esas partes. El Ohio Crankshaft Company, uno de los mayores fabricantes de cigüeñales de motores diesel, también aprovechó el efecto del calentamiento superficial de alta frecuencia de corriente alterna y utilizó generadores en 1920 de 3000 Hz en el endurecimiento de la superficie de los cojinetes del cigüeñal. Esta fue la primera aplicación de alta producción de calor de calentamiento por inducción para el tratamiento de superficie de metales. La aplicación más amplia a una multiplicidad de otras partes era un paso obvio. Por ejemplo, en Budd Company se interesaron en la inducción de endurecimiento superficial de los orificios internos de las secciones tubulares y se aplicó esta técnica para cubos del eje de automoción y más tarde a la superficie de cilindros.

La Segunda Guerra Mundial proporcionó un gran impulso para el uso de la tecnología de calentamiento por inducción, en particular en el tratamiento térmico de los componentes de las municiones. La capacidad de utilizar la inducción de manera local, así como el endurecimiento superficial también fue llamado para salvar a más de un millón de proyectiles que habían sido indebidamente procesados, produciendo puntos débiles y agrietamientos. Además, se encontró que los componentes de los tanque de vía, ejes, piñones y engranes podían ser endurecidos, en grandes cantidades, más eficazmente por inducción de alta frecuencia. En otras áreas, el calentamiento por inducción se aplicó el precalentamiento de piezas de acero antes de la forja de piezas tales como cañones.

En los últimos años, la aplicación de calentamiento y fundición por inducción se ha incrementado hasta el punto de que la mayoría de los ingenieros en las industrias metalúrgicas están familiarizados con las aplicaciones existentes y desarrollan algunas ideas para otros posibles usos. Además, varias industrias no metálicas están empezando a familiarizarse con los principios de

calentamiento por inducción, para encontrar y desarrollar usos en la fabricación de sus productos [2.1].

2.2 Inducción en sólidos metálicos

Un sistema de calentamiento por inducción consiste en una fuente de corriente alterna, una bobina de inducción, y la pieza de trabajo a calentar. El calentamiento por inducción se basa en dos mecanismos de disipación de energía para el propósito de calefacción. Estas son las pérdidas de energía debido al efecto Joule y a pérdidas asociadas con histéresis magnética. El primero de ellos es un mecanismo que consiste en el calentamiento de un conductor debido al movimiento de electrones cuando pasa una corriente eléctrica. El segundo medio de generación de calor por inducción se refiere al rozamiento de moléculas o dipolos magnéticos cuando el elemento está magnetizado primero en una dirección y luego en otra. Los dipolos pueden ser considerados como pequeños imanes que giran en torno con cada inversión del campo magnético asociado con una corriente alterna. La energía necesaria para dar la vuelta se disipa en forma de calor, la tasa de gasto de que se incrementa con la tasa de inversión del campo magnético.

El fenómeno básico de la inducción está relacionado con el hecho de que un campo magnético se asocia con cualquier corriente eléctrica, ya sea AC o DC. Para un conductor eléctrico que conduce una corriente directa, el campo de inducción magnética está alineado en ángulo recto a la corriente, su resistencia disminuye con la distancia desde el conductor. La magnitud del campo magnético varía en proporción a la corriente; la polaridad o la dirección de las líneas de inducción magnética están dadas por la regla de "la mano derecha". Si una corriente directa pasa a través de una bobina de solenoide, la intensidad de campo resultante es mayor dentro de las vueltas de la bobina y más pequeña fuera de la bobina. Los campos magnéticos entre vueltas adyacentes son muy pequeños porque las líneas de inducción magnética para las vueltas

adyacentes tienen signos diferentes y por lo tanto se anulan entre sí. Si una barra sólida se coloca en una bobina que transporta una corriente continua, y si la barra es no magnética, entonces el campo no se ve afectada; por otro lado, si es de un material magnético, el número de líneas de inducción magnética es mucho mayor. Debido a esto, se dice que la permeabilidad de los materiales magnéticos es mucho mayor que la de los no magnéticos.

El campo de inducción magnética es más fuerte en el espacio entre el diámetro interior de la bobina y el diámetro exterior de la capa más exterior. Una cierta cantidad de flujo pasa a través de la funda más exterior, la inducción de corrientes de Foucault. La intensidad del campo magnético se reduce dentro de la funda más exterior. Debido a esto, la corriente inducida en la segunda capa de la superficie es más pequeña que la de la funda más exterior, la corriente inducida en la tercera capa es más pequeña que en el segundo, y así sucesivamente (figura 2.3). En general, las magnitudes de las corrientes inducidas disminuyen continuamente desde la superficie, independientemente de si la barra está hecha de un campo magnético o un material no magnético. Este fenómeno se conoce como "efecto piel" [2.1].

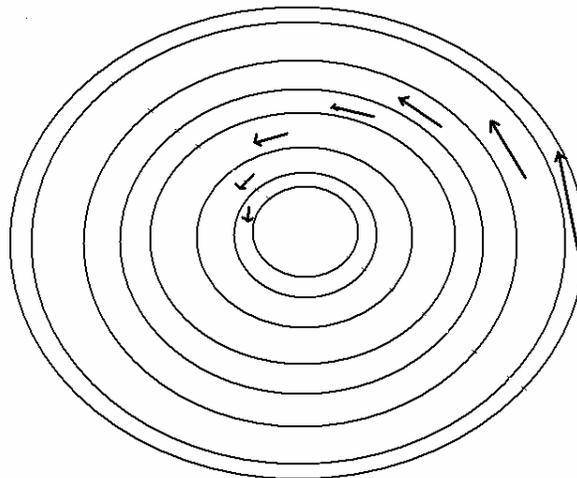


Figura 2.3 La intensidad del campo magnético disminuye del exterior al interior de la pieza. Efecto Piel.

La determinación matemática de la distribución de corriente a lo largo de la sección transversal de una barra, es una tarea difícil. Para el caso más simple que puede ser analizado, de una barra sólida redonda, las soluciones demuestran que la corriente inducida disminuye exponencialmente desde la superficie. El resultado más importante de este tipo de soluciones es que permiten definir una profundidad efectiva de las capas portadoras de corriente. Esta profundidad, conocida como la profundidad de referencia o profundidad de la piel, depende de la frecuencia de la corriente alterna a través de la bobina, la resistividad eléctrica y la permeabilidad magnética relativa de la pieza de trabajo.

La profundidad de referencia varía con la temperatura, para una frecuencia fija, debido a que la resistividad de los conductores varía con la temperatura. Además, para los aceros magnéticos, la permeabilidad varía con la temperatura, disminuyendo a un valor de unidad por encima de la temperatura de Curie. También en estos materiales, la profundidad de referencia por debajo de la temperatura de Curie aumenta con la densidad de potencia como el acero se vuelve magnéticamente saturado y disminuye la permeabilidad. Debido a estos efectos, la profundidad de referencia en materiales no magnéticos puede variar en un factor de dos o tres en un amplio intervalo de calentamiento, mientras que para los aceros magnéticos, que puede variar tanto como 20 veces [2.1].

2.3 Aplicaciones

Los usos principales se dividen en el precalentamiento antes de la manufactura, tratamientos térmicos, soldaduras y fundición de metales. Si bien estos son los usos más comunes, una variedad de otras operaciones, también son susceptibles a los métodos de calentamiento por inducción [2.1].

Pre calentamiento en la manufactura. Calentar por inducción antes del trabajo metal-mecánico es muy aceptado en la industria de la forja y extrusión. Se adapta fácilmente a través de pre calentamiento de aceros, aleaciones de aluminio, y metales especializados tales como el titanio y las aleaciones a base de níquel. Con frecuencia, las piezas de trabajo en este tipo de aplicaciones consisten en barras redondas, cuadradas, o con las esquinas redondeadas. Para los aceros, el pre calentamiento reduce las pérdidas materiales. El rápido calentamiento aumenta las tasas de producción.

Tratamiento térmico. El calentamiento por inducción se utiliza en el endurecimiento superficial, templado, y el recocido de los aceros. Una ventaja principal es la capacidad de controlar el área que es tratada térmicamente. El templado por inducción, la operación de tratamiento térmico por inducción más común, mejora la resistencia al desgaste, y las propiedades de fatiga de los aceros. Productos tubulares de acero, por ejemplo, se prestan muy fácilmente al endurecimiento por inducción en las operaciones en línea continua. Templado por inducción de acero, aunque no es tan común como el endurecimiento por inducción, restaura ductilidad y mejora la resistencia a la fractura. También aplicado con menos frecuencia es el recocido por inducción, que restaura la dureza y propiedades de ductilidad, importantes para el conformado de los aceros, aleaciones de aluminio, y otros metales.

Fundición. Procesos de inducción se utilizan con frecuencia para fundir aceros de alta calidad y aleaciones no ferrosas (por ejemplo, aluminio y aleaciones de cobre). Las ventajas específicas de la fundición por inducción como muestra la figura 2.4, en comparación con otros procesos de fusión incluyen una fusión más uniforme y mayor vida para el crisol.



Figura 2.4 Fundición por inducción
LUZARS Induction Heating®
<http://luzars.com/>

Soldadura. Soldadura por inducción de alta frecuencia ofrece un ahorro sustancial de energía ya que el calor se concentra en la unión a soldar. La aplicación más común de la soldadura por inducción es en producción de tubería (figura 2.5) que se presta a un tratamiento automatizado de alta velocidad y alta producción. Soldadura por inducción también se basa en las capacidades de calentamiento y control local inherentes al proceso de calentamiento por inducción.

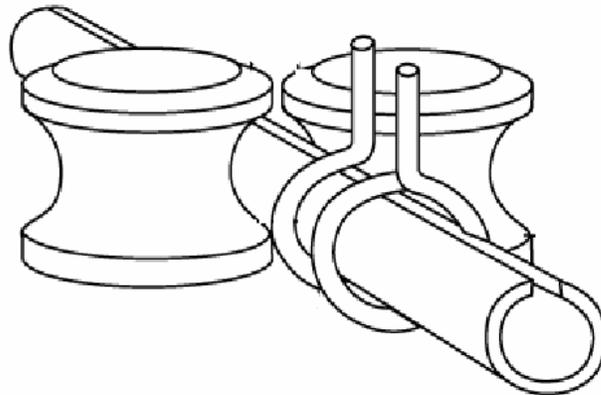


Figura 2.5 Soldadura por inducción

Curado de revestimientos orgánicos. La inducción se utiliza para curar recubrimientos orgánicos tales como pinturas sobre sustratos metálicos mediante la generación de calor dentro del sustrato. Por este medio, el curado se produce desde el interior, lo que minimiza la tendencia a la formación de defectos de recubrimiento. Una aplicación típica es el secado de pintura en una hoja de metal.

Fijación adhesiva. Ciertas partes de automóviles, tales como placas de embrague y pedales de freno, hacen uso de adhesivos termoendurecibles. Como en el curado de la pintura, el calentamiento por inducción de las piezas de metal a temperaturas de curado puede ser un medio excelente para lograr una unión rápida. Sellos metal-no metal, ampliamente utilizado en dispositivos de vacío, también dependen en gran medida de calentamiento por inducción.

Fabricación de semiconductores. El crecimiento de monocristales de germanio y de silicio a menudo se basa en el calentamiento por inducción. La zona de refinación, la zona de nivelación, la de dopaje, y la deposición epitaxial de materiales semiconductores también hacen uso del proceso de inducción.

Chapado. Recubrimientos de estaño electrolíticamente depositados en acero tienen un acabado mate uniforme. El calentamiento de la hoja a 230 °C por inducción provoca reflujo del recubrimiento de estaño y resulta en una apariencia brillante y una cobertura uniforme.

Sinterizado. El calentamiento por inducción es ampliamente utilizado en la sinterización de preformas de carburo, ya que puede proporcionar la temperatura necesaria (2550 °C). Otros preformas de metales ferrosos y no ferrosos pueden ser sinterizados en una manera similar.

2.4 Ventajas

Antes del desarrollo del calentamiento por inducción, los principales medios de calentamiento de metales y no metales eran los hornos de gas y petróleo [2.1]. El calentamiento por inducción ofrece una serie de ventajas sobre las técnicas de horno, tales como:

- *Calentamiento rápido.* Desarrollo de calor dentro de la pieza por inducción proporciona velocidades de calentamiento mucho más altas que los procesos de convección y la radiación que se producen en los hornos.
- *Menos pérdida de escala.* Calentamiento rápido reduce significativamente la pérdida de material debido a la escala (por ejemplo, para los aceros) con respecto a procesos lentos de horno de gas.
- *Rápida puesta en marcha.* Hornos contienen grandes cantidades de materiales refractarios que deben ser calentados durante el arranque, lo que resulta en gran inercia térmica. El calentamiento interno del proceso de inducción elimina este problema y permite mucho más rápido la puesta en marcha.
- *El ahorro de energía.* Cuando no está en uso, la fuente de alimentación de inducción se puede desactivar debido a reinicio rápido. Con los hornos, se debe suministrar energía continuamente para mantener la temperatura y evitar retrasos.
- *Las altas tasas de producción.* Debido a que los tiempos de calentamiento son cortos, el calentamiento por inducción a menudo provoca aumento de la producción y la reducción de los costos laborales.
- *Facilidad de automatización y control.*
- *Requisitos de suelo y espacio reducidos.*
- *Condiciones de trabajo seguras, limpias y tranquilas.*
- *Bajos requerimientos de mantenimiento.*

2.5 Concentradores Solares

El sol ha sido considerado desde hace millones de años una fuente de energía luminosa y además calorífica.

La utilización de la energía solar se remonta a la época de los egipcios a quien se debe el efecto de invernadero, con lo que se podían alcanzar temperaturas de hasta 130 °C.

Los griegos en el siglo IV a. C. conocían ya el principio básico de los colectores solares con seguimiento; sabían que apuntando varios espejos hacia un mismo punto podrían prender fuego a un objeto [2.2]. En la Edad Antigua y la Edad Media dedicaron varios autores, algunas de sus obras al estudio de las propiedades, y métodos de construcción de espejos cóncavos, esféricos y parabólicos. El suizo Horace de Saussure fue quizás el primero en diseñar sistemas de colectores planos para el calentamiento de agua durante la segunda mitad del siglo XVII [3.2]. Uno de los principales exponentes de la construcción de hornos solares fue George Louis Leclerc Buffon (figura 2.5).



Figura 2.5 George Louis Leclerc Buffon. 1707 - 1788

Los colectores tubulares datan al menos de principios de siglo; en 1909 William Lee Roy Emmett (figura 2.6) patentó varios diseños conceptuales de colectores tubulares. Los colectores solares estacionarios con concentración son de reciente aparición.

El Sol es un enorme globo de gases incandescentes y en el interior se realiza una reacción termonuclear de fisión en el cual el Hidrógeno se transforma en Helio.

La energía producida en el interior del Sol que se encuentra a temperaturas de 8×10^6 a 40×10^6 K, es irradiada hacia el espacio. La energía irradiada en todas direcciones es de 3.7×10^{33} ergios cada segundo o lo que es equivalente, una potencia de 3.7×10^{23} KW.



Figura 2.6
William Lee Roy
Emmett
1858-1941

El Sol tiene un diámetro de 1.39×10^9 m y se encuentran aproximadamente los mismos elementos que en la Tierra como el Hidrógeno, Nitrógeno, Oxígeno, Helio, Magnesio, Calcio, Hierro y gran parte de los demás metales.

En el suceden procesos simultáneos de radiación y convección con sucesivas emisiones, absorciones y radiaciones. Haciendo el cálculo de equivalencia entre masa y energía, se obtiene que el, Sol pierde masa a razón de 4.3 millones de toneladas de Hidrógeno cada segundo.

Esto significa que para que se consuma el 10% solamente de Hidrógeno, habrán de transcurrir 6,000 millones de años, lo cual nos abre una fuente de energía por demás valiosa y atractiva.

El Sol está situado a una distancia promedio de 1.5×10^{11} m de la Tierra y la radiación solar que llega a las altas capas de la atmósfera terrestre es de 1.392 KW/m^2 . Esta cantidad de radiación que incide sobre un plano perpendicular a la dirección de insolación, fuera de la atmósfera terrestre se le denomina constante solar y tiene una variación de 3.5% debido a las variaciones estacionales; porque la Tierra se aproxima o aleja del Sol [2.3].

La radiación incidente en la atmósfera exterior se reduce cuando alcanza la superficie de la Tierra debido a que gran parte de ésta radiación se refleja al espacio exterior por la atmósfera y la superficie exterior de las nubes, otra parte es absorbida o dispersada por moléculas, pero la mayor parte se dispersa entre las pequeñas gotas de agua de las nubes y las partículas de polvo.

La radiación solar tiene un espectro variable con la atenuación por dispersión atmosférica. Los rayos X y la luz ultravioleta de longitud de onda menor de 2 000 Å son absorbidos por el oxígeno y el nitrógeno, y la mayor parte de la radiación de 2 000- 3 000 Å es absorbida por el ozono de la atmósfera exterior.

En la actualidad el consumo de energía proveniente de combustibles fósiles está ligado a una serie de factores económicos, sociales y ambientales que afectan cada vez más el pleno desarrollo de la vida en la tierra. El calentamiento global, la inestabilidad en los precios del petróleo y la contaminación del medio ambiente son solo algunos de los impactos generados por dichos factores. Por lo anterior, hoy en día se está despertando a nivel mundial un especial interés hacia la generación de energía proveniente de fuentes alternativas, que siempre han estado disponibles en la naturaleza y que han sido subvaloradas debido al gran auge que siempre han tenido los combustibles provenientes de fuentes no renovables [2.3].

La energía solar además de proporcionar el 99.97% de la energía usada en la Tierra para todos sus procesos naturales y el hecho de que durante un solo año arroja sobre la tierra cuatro mil veces más energía de la que será consumida por todo el planeta, representa una fuente que ha estado disponible desde hace millones de años y se cree que aún no ha alcanzado la mitad de su existencia.

Generalmente, la energía solar directa es concentrada por medio de lentes ó espejos. Los espejos parabólicos tienen la propiedad de que todos los rayos que llegan paralelos al eje óptico y, al ser reflejados, pasan por el foco (figuras 2.7 y 2.8). Los espejos esféricos se comportan de igual forma cuando corresponden a una pequeña sección de esfera.

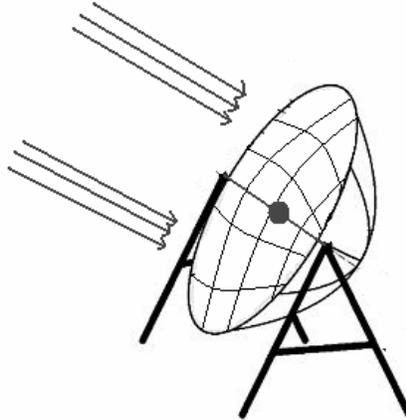


Figura 2.7 Concentrador solar de disco parabólico

En la realidad, los rayos no coinciden literalmente en un punto, sino más bien, en una región con un área determinada. La relación entre el área de captación del concentrador y el área a la cual es redireccionada la radiación, se le conoce como radio de concentración (CR) y se expresa matemáticamente según la ecuación 2.1.

$$\text{CR} = \text{Área de captación} / \text{Área de la imagen} \quad (2.1)$$



Figura 2.8 Planta Termosolar en España
Fuente: TORRESOL ENERGY®

CAPÍTULO 3

MODELO MATEMÁTICO

3.1 Descripción del modelo

La pieza de trabajo a analizar es un cilindro de hierro de radio $D/2$ y de altura $2z_1$, bajo la influencia de una bobina de cobre, de una sola espiral, todo rodeado de un cilindro de aire de radio l_2 y altura $2z_2$, sometido a tres simulaciones de transferencia de calor (figura 3.1).

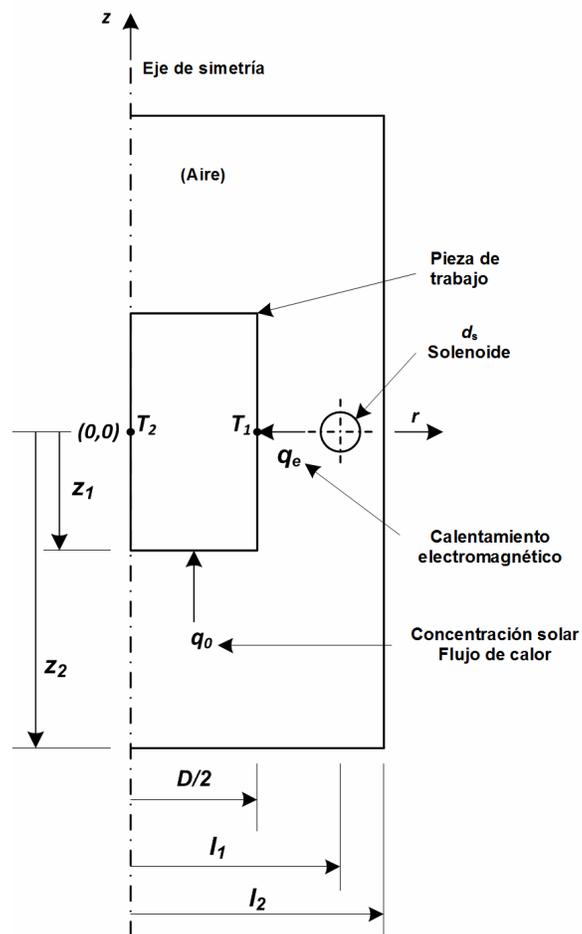


Figura 3.1
Esquema para la formulación del modelo matemático.

La primera pieza, el cilindro de hierro (figura 3.2), es la pieza sobre la cual se analiza todo el proceso térmico de la simulación. Sus propiedades físicas, dadas por el programa COMSOL® [3.1, 3.2] se enlistan en la tabla 3.1

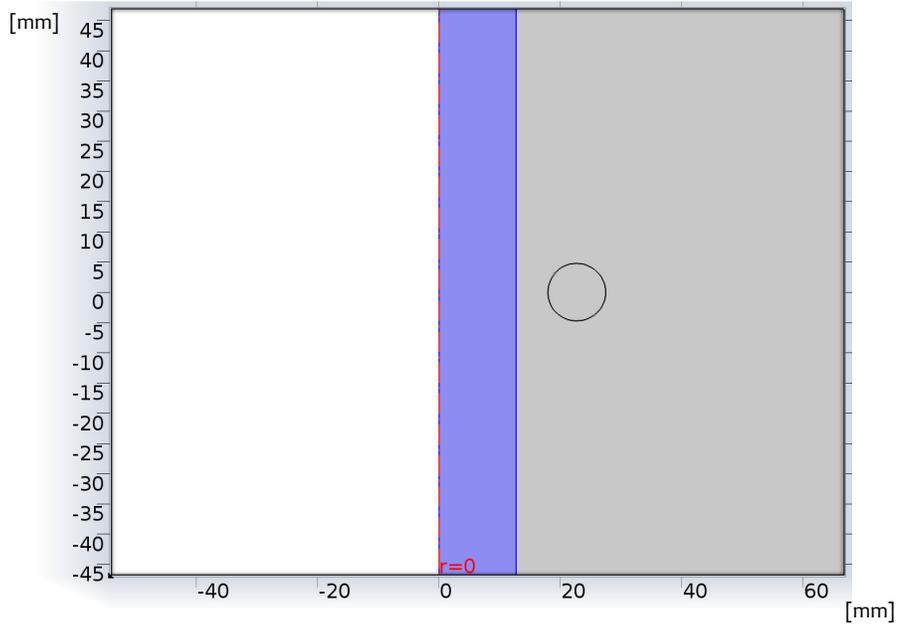


Figura 3.2
Cilindro de hierro.

TABLA 3.1 (Propiedades de la pieza de trabajo)	
Radio	12.7 mm
Altura	100 mm
Permeabilidad Relativa	5000
Conductividad Eléctrica	1.12e7 [S/m]
Capacidad Calorífica	440 [J/kg*K]
Densidad	7870 [kg/m3]
Coefficiente de expansión térmica	12.2e-6 [1/K]
Conductividad térmica	76.2 [W/(m*K)]
Modulo de Young	200e9 [Pa]
Relación de Poisson	0.29

El solenoide o bobina de cobre (figura 3.3), es el responsable de proporcionar la inducción electromagnética. Sus propiedades se encuentran en la tabla 3.2.

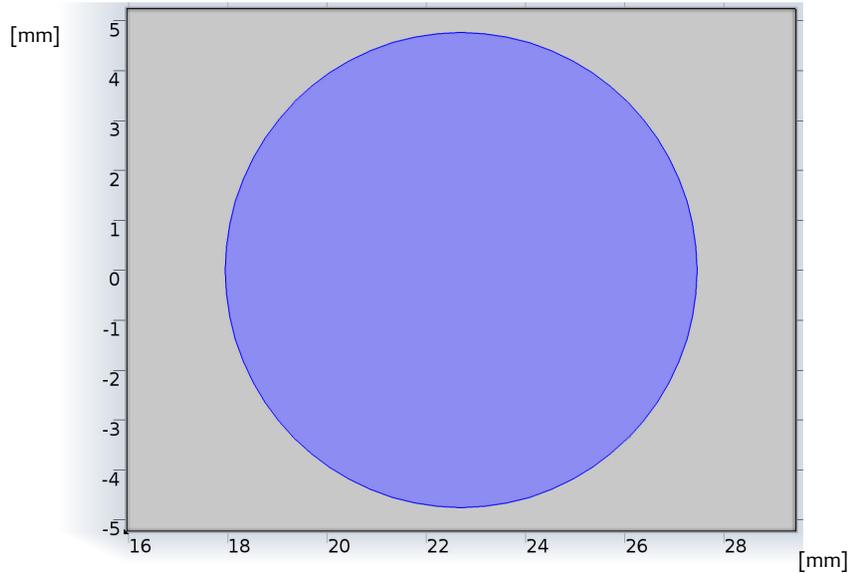


Figura 3.4 Bobina de cobre.

TABLA 3.2	
(Propiedades de la bobina de cobre)	
Diámetro	4.76 mm
Distancia a la superficie	5.24 mm
Conductividad Eléctrica	5.998e7 [S/m]
Permeabilidad Relativa	1
Coefficiente de expansión térmica	17e-6[1/K]
Capacidad calorífica	385[J/(kg*K)]
Densidad	8700[kg/m3]
Conductividad Térmica	400[W/(m*K)]
Modulo de Young	110e9 [Pa]
Relación de Poisson	0.35
Resistividad de referencia	1.72e-8 [ohm*m]
Temperatura de referencia	298 [K]

Finalmente, se tiene el medio o el aire que rodea el sistema, con sus respectivos parámetros, indispensable para la transferencia de calor.

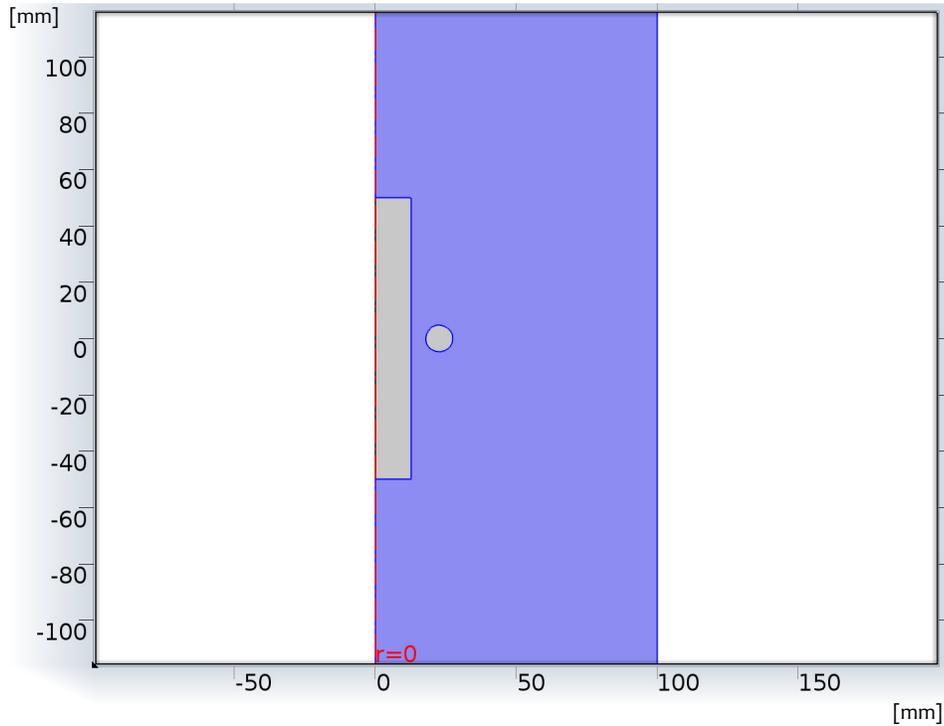


Figura 3.4
Cilindro de aire

TABLA 3.3	
Radio	100 mm
Altura	250 mm
Conductividad eléctrica	0 [S/m]
Permeabilidad Relativa	1
Calor específico	1.4
Viscosidad dinámica	eta (T[1/k]) [Pa*s]
Densidad	rho(pA[1/Pa], T[1/K])[kg/m3]
Conductividad Térmica	(T[1/K])[W/(m*K)]

Habría que señalar que los valores de *eta*, *cp*, y *k*, se obtienen a partir de las gráficas de las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 respectivamente.

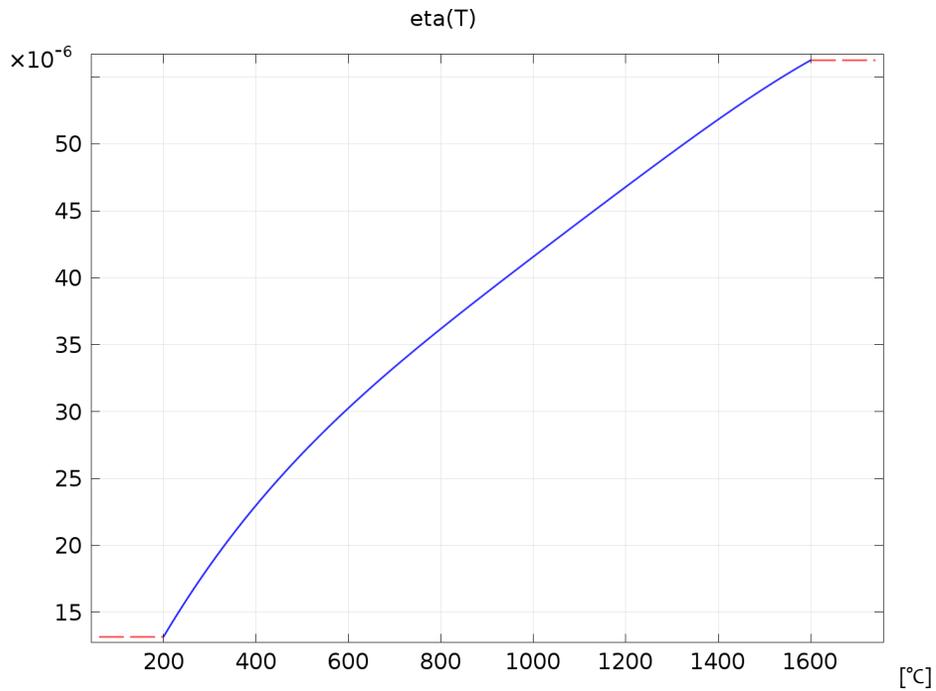


Figura 3.5 Gráfica de eta vs temperatura

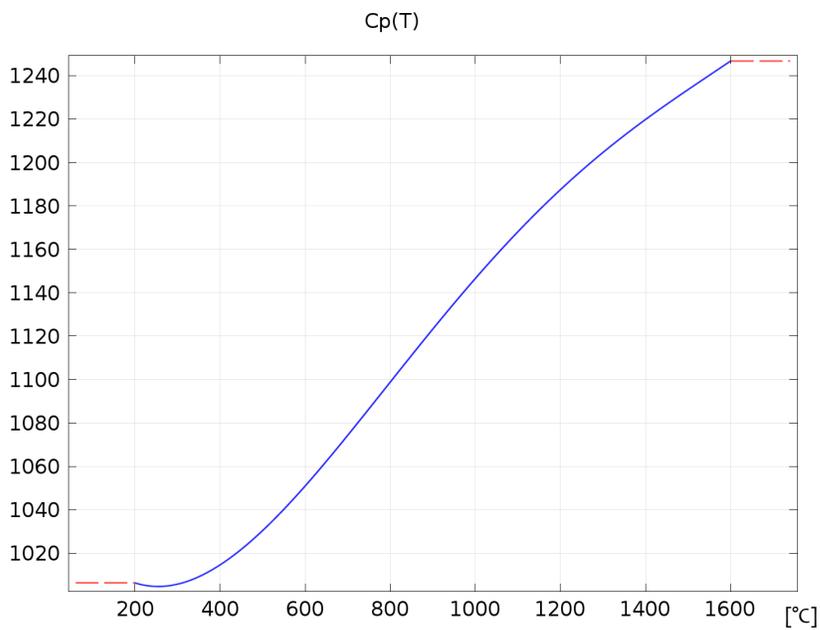


Figura 3.6 Gráfica de Cp vs temperatura

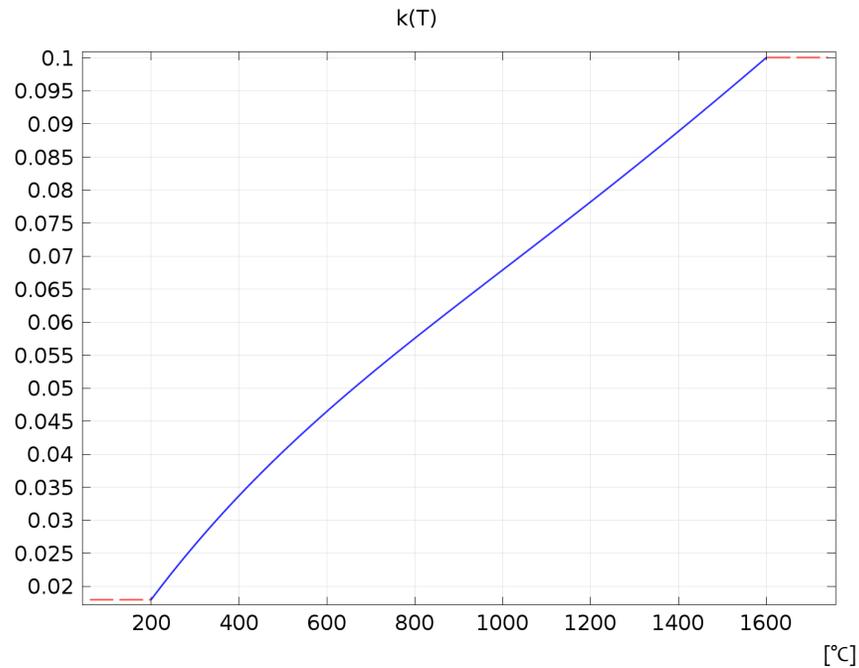


Figura 3.7
Gráfica de K vs temperatura

Los puntos T_1 y T_2 , señalado en la figura 3.1, representan los puntos de interés en este estudio. Con T_1 localizado en el centro axial de la pieza de hierro y T_2 en su superficie, se puede hacer notar el efecto piel en el calentamiento por inducción electromagnética en la pieza de trabajo.

En la primera simulación, la pieza es sometida al calentamiento por inducción electromagnética q_e debido a una bobina de cobre de una sola espira que ejerce acción en el centro de la pieza, a una distancia l_1 del eje axial. Para efectos de la simulación, la bobina se considera como un aro sólido que rodea la pieza, la cual no presenta refrigeración interna.

Para la segunda parte, además del calentamiento debido a la bobina, se agrega el influjo de la concentración solar q_o en uno de los extremos base de la pieza de acero. Y finalmente, en la tercera parte se hace una variación del

experimento anterior moviendo la bobina del centro de la pieza al extremo opuesto a la cara donde hace influjo la concentración solar.

3.2 Formulación del Modelo de Inducción.

Para realizar la debida formulación del modelo matemático se parte de la forma diferencial de la ecuación de Ampere, la cual se puede escribir de lo siguiente forma

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.1)$$

Donde:

- **H** es la intensidad del campo magnético [A/m].
- **J** es la densidad de corriente [A/m²].
- **D** es la densidad del flujo eléctrico [A·s/m²].

La relación constitutiva con la densidad del flujo magnético **B** esta dada por:

$$B = \mu H \quad (3.2)$$

- **μ** es la permeabilidad magnética del material [N/m²].

En términos del vector potencial **A**

$$B = \nabla \times A \quad (3.3)$$

Sustituyendo en la ley de Maxwell-Ampere

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A) = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.4)$$

En un estado de tiempo armónico casi estático, la reducción potencial es aplicable, por lo que se tiene la siguiente expresión:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)A + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A) = J_e \quad (3.5)$$

- ω es la frecuencia angular [rad/s].
- ε es la permitividad del material [F/m].

3.3 Formulación del modelo de transferencia de calor

Se utiliza la ecuación de conducción de calor

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_{th} \nabla T) = Q \quad (3.6)$$

- ρ es la densidad del material [kg/m³].
- C_p es la capacidad calorífica específica [kJ/kg·K]
- k_{th} es la conductividad térmica [W/K·m]
- Q es la fuente de calor, proveniente de la inducción electromagnética [kJ]

La ecuación 3.6 esta sujeta a las siguientes condiciones de frontera:

En la pieza de trabajo, la condición de radiación térmica entre la superficie de la pieza y el medio ocurre cuando

$$q = \varepsilon_{th} \sigma_{th} (T_{amb}^4 - T^4) \quad (3.7)$$

Donde

- ϵ_{th} es la emisividad de la superficie [1]
- σ_{th} es la constante de Stefan-Boltzman (5.6704×10^{-8} [W/m²·K⁴])
- T_{amb} es la temperatura ambiente [K].

Al extremo de la pieza de trabajo, la condición de frontera del flujo de calor es aplicable en $z = z_1$

$$q_0 = -k_{th} \nabla T \quad (3.8)$$

- q_0 es el flujo de calor proveniente del concentrador solar [kJ].

Se requiere también la siguiente condición de frontera en $t = 0$ s.

$$T = T_{amb.} \quad (3.9)$$

3.4 Simulación Numérica

El programa COMSOL[®], permite una gran variedad de análisis para diversos fenómenos físicos, tomando en cuenta la naturaleza de las leyes que los rigen. Con ello se puede maximizar la eficiencia y disminuir el tiempo de cálculo para la resolución de experimentos.

Después de escoger el tipo de estudio físico aplicado a la simulación. En este caso transferencia de calor dependiente del tiempo. Se incurre en la realización del modelo completo (figura 3.8) y a la asignación individual de propiedades.

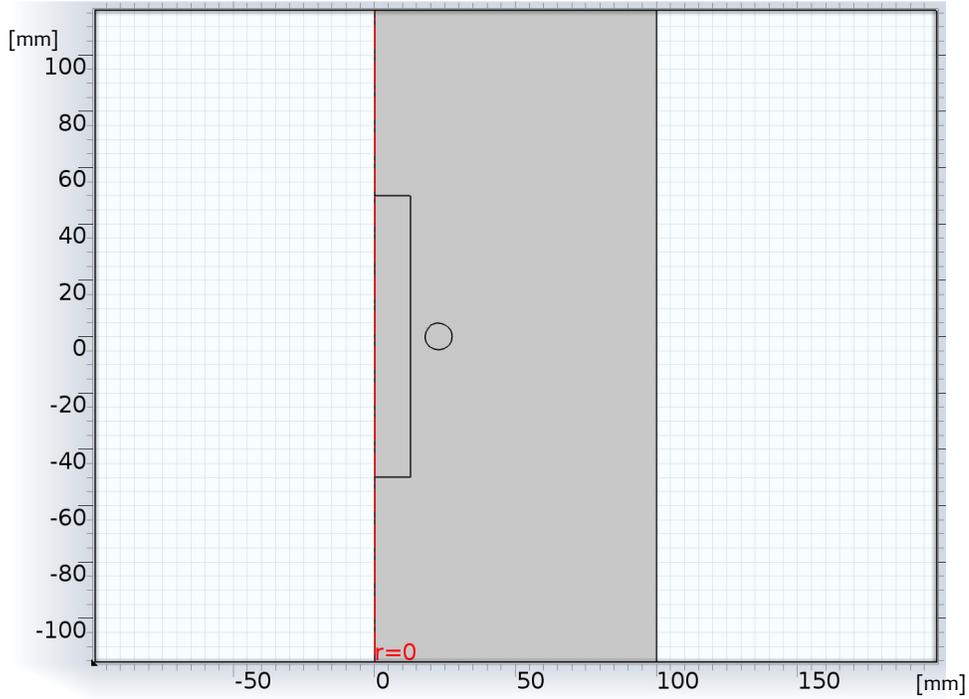


Figura 3.8 Modelo de la geometría de trabajo

Se escogen las relaciones entre los componentes y se asignan las fronteras. Seguido se realiza el mallado para el análisis por elemento finito (figura 3.9)

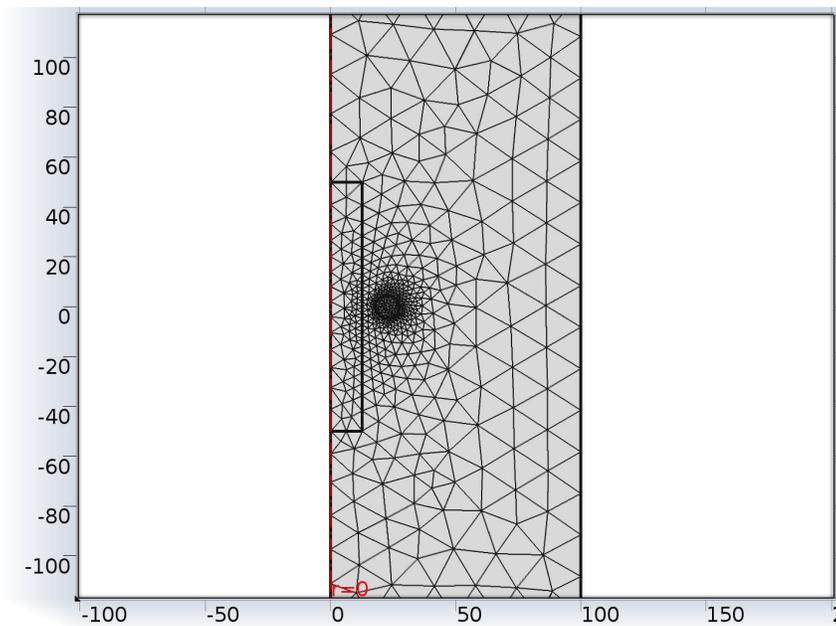


Figura 3.9
Mallado del sistema

La tabla 3.4 muestra las propiedades de la malla.

TABLA 3.4 (Mallado)	
Calidad mínima de electos	0.6614
Calidad promedio de elementos	0.9331
Elementos triangulares	1074
Elementos en frontera	105
Elementos vértices	12
Máximo tamaño de elementos	16.8 mm
Mínimo tamaño de elementos	0.075 mm
Resolución de curvatura	0.3
Radio máximo de crecimiento de elementos	1.3

Una vez dispuesta la malla y con fundamento en todo lo anterior se usa la función de COMSOL[®], para realizar el estudio y resolver las ecuaciones, y con eso solo queda hacer el análisis de los resultados que arroje la simulación.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las simulaciones, se busca observar el comportamiento del factor térmico en el cuerpo de la pieza, y buscar la optimización a partir de ello. El software COMSOL permite ver las variaciones de la temperatura en toda la pieza, parte del objetivo es encontrar el calentamiento homogéneo y analizar las variaciones de temperatura en T1 (en el núcleo de la pieza) y T2 (en la superficie de la misma).

4.1 Simulación 1

CASO: CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

En la primera simulación se tiene el caso para el calentamiento de la pieza, utilizando en ello la inducción electromagnética exclusivamente (figura 4.1)

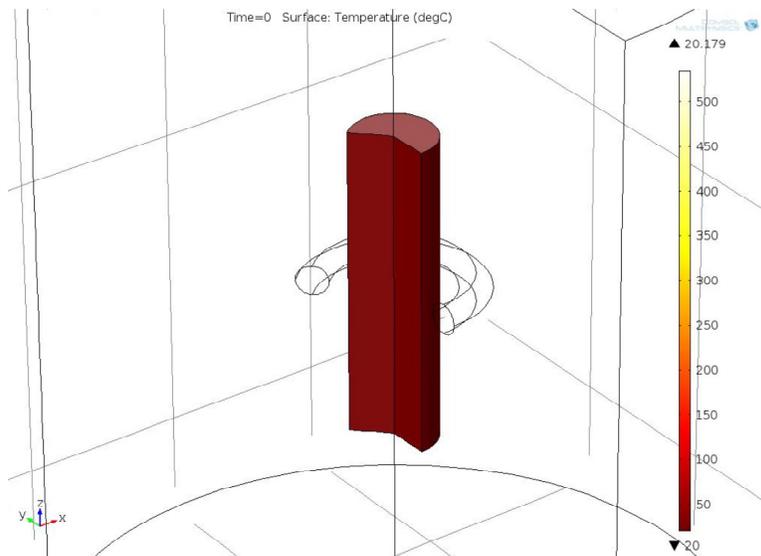


Figura 4.1 Temperatura de la pieza de trabajo en tiempo inicial $t = 0$ segundos

A continuación se muestra por medio de las figuras 4.2 a 4.5, la evolución de la temperatura en la pieza de trabajo.

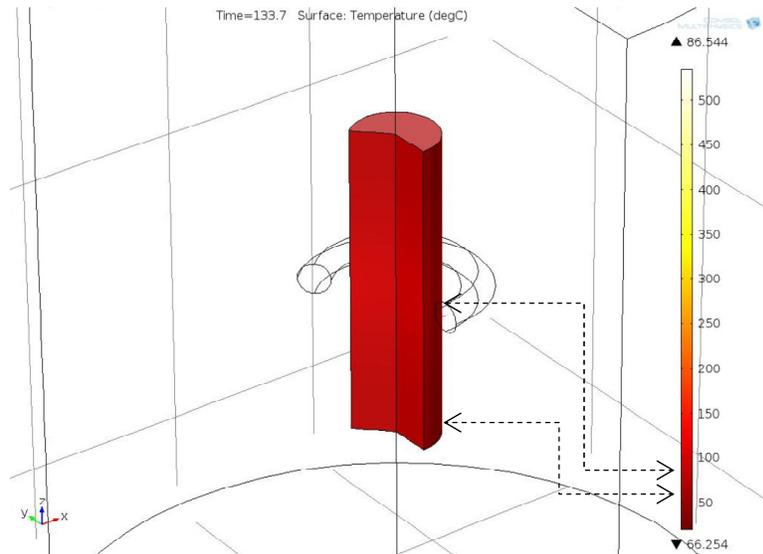


Figura 4.2 Pieza en t = 133.7 segundos

En la figura 4.2, se observa que en un tiempo de calentamiento de aproximadamente 133 segundos, se alcanza una temperatura de 86.354 °C en el centro de de la pieza y de 66.25 °C en sus extremos.

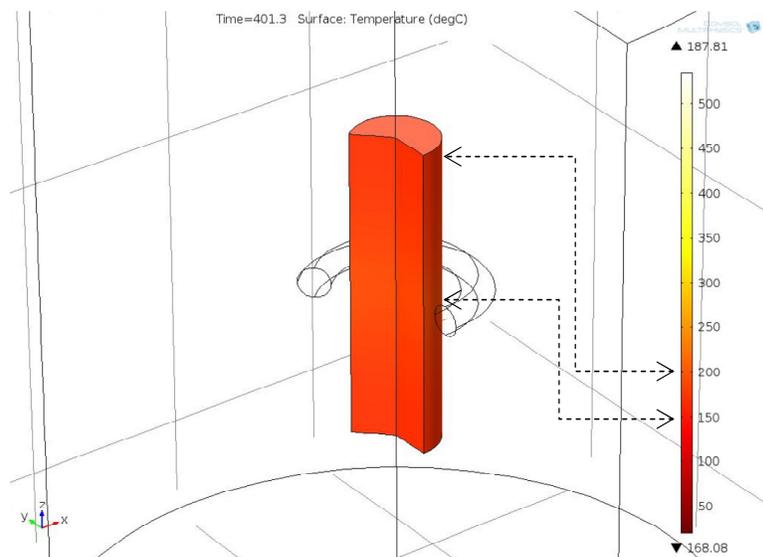


Figura 4.3 Pieza en t = 401.3 segundos

Asimismo, en un tiempo de 401 segundos, la temperatura en el centro de la pieza es de 187.81 °C y en los extremos 168.08 °C (figura 4.3).

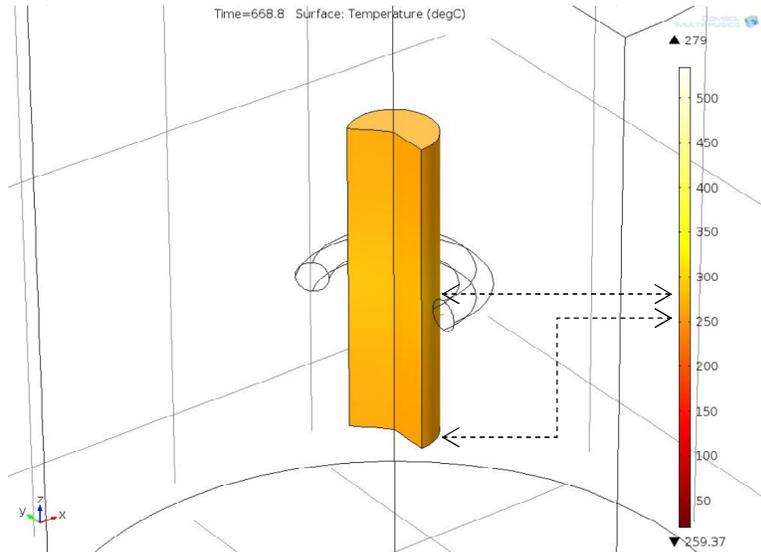


Figura 4.4 Pieza en t = 668.8 segundos

Con una temperatura en el centro de 279 °C y en los extremos de 259.33 °C, en un tiempo aproximado de 669 segundos como lo muestra la figura 4.4 y en comparación con las figuras anteriores se hace notar que durante el calentamiento se mantiene una diferencia de temperatura entre el centro y los extremos de aproximadamente 20 °C

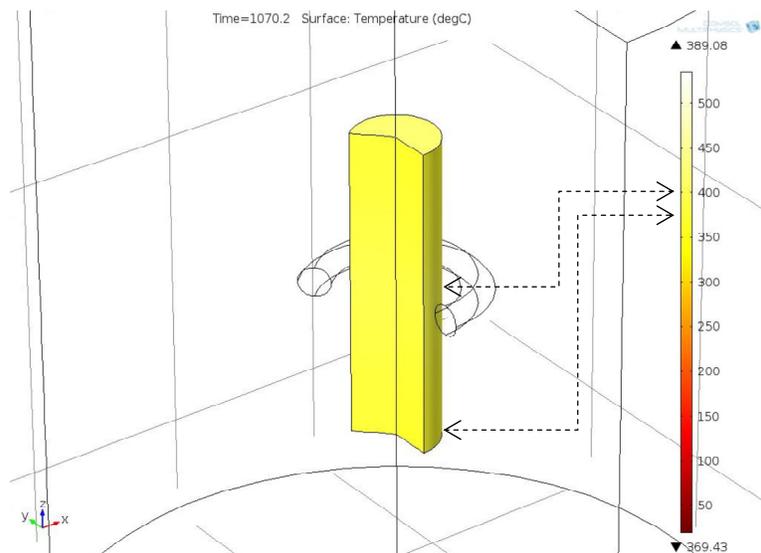


Figura 4.5 Pieza en t = 1070.2 segundos

En la figura 4.5 la temperatura en el centro de la pieza es 389.08 °C y en los extremos de 369.43 °C

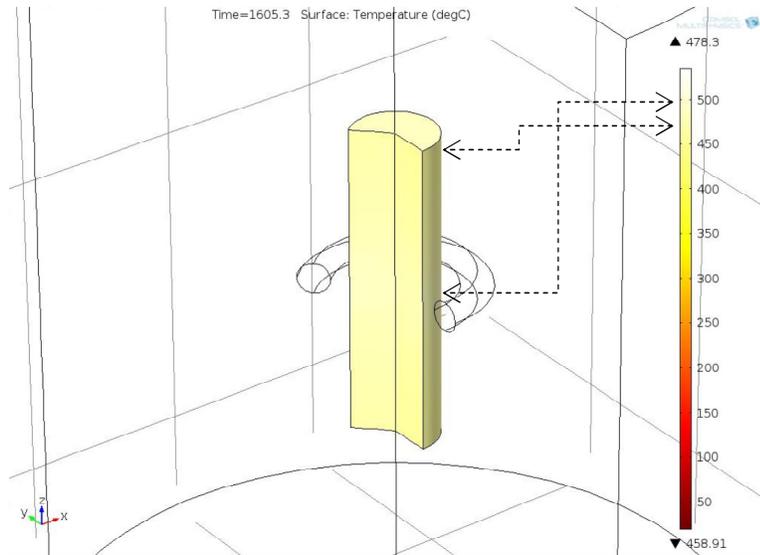


Figura 4.6 Pieza en t = 1605.3 segundos

Desde la figura 4.5 y hasta la 4.6, se observa como la tasa de incremento de temperatura comienza a disminuir, haciendo la diferencia de temperatura entre un tiempo y otro decrezca, por lo que la pieza comienza a entrar en la etapa estacionaria, esto ocurre a partir de un tiempo aproximado de 1700 segundos.

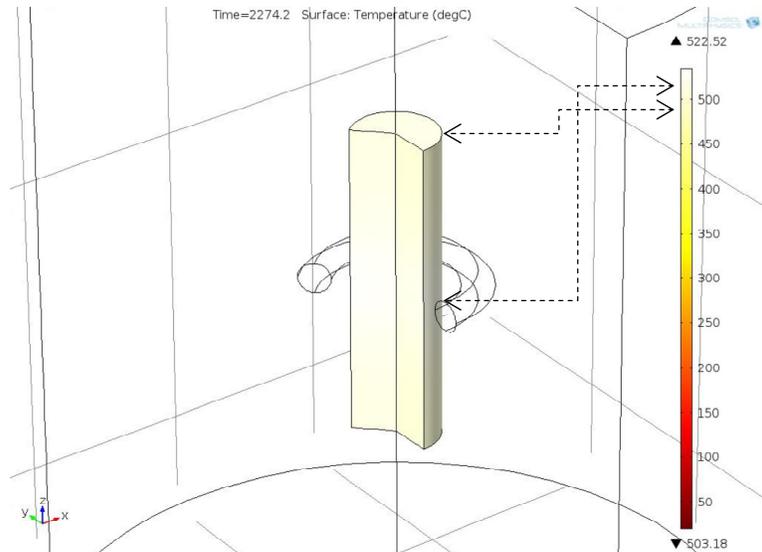


Figura 4.7 Pieza en t = 2274.2 segundos

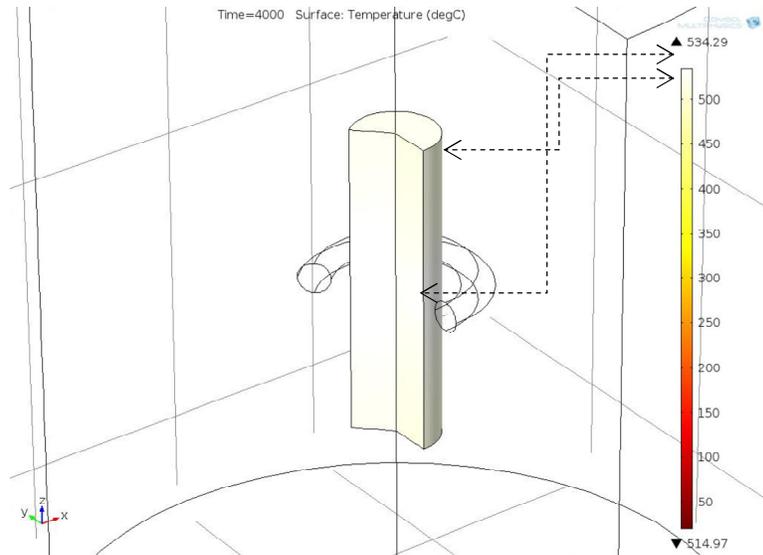


Figura 4.8 Pieza en t = 4000 segundos

En las figuras 4.7 y 4.8 se muestra la última sección del incremento de temperatura, hasta alcanzar el estacionario. Se hace notar como las diferencias de temperaturas entre ambos tiempos son escasas, sin embargo la diferencia de temperaturas entre el centro y los extremos de la pieza se mantuvo en 20 °C durante toda la simulación.

La figura 4.9 muestra, de forma mas detallada, las diferencias de temperaturas alrededor de todo el cuerpo de la pieza durante el instante t = 2000 segundos. Se puede observar como la temperatura varía de un lado a otro de la pieza.

Y en la figura 4.10 se muestra en forma creciente la evolución de la temperatura en los puntos seleccionados T1 y T2, hasta llegar al estado estacionario, el cual se alcanza después de 3000 segundos.

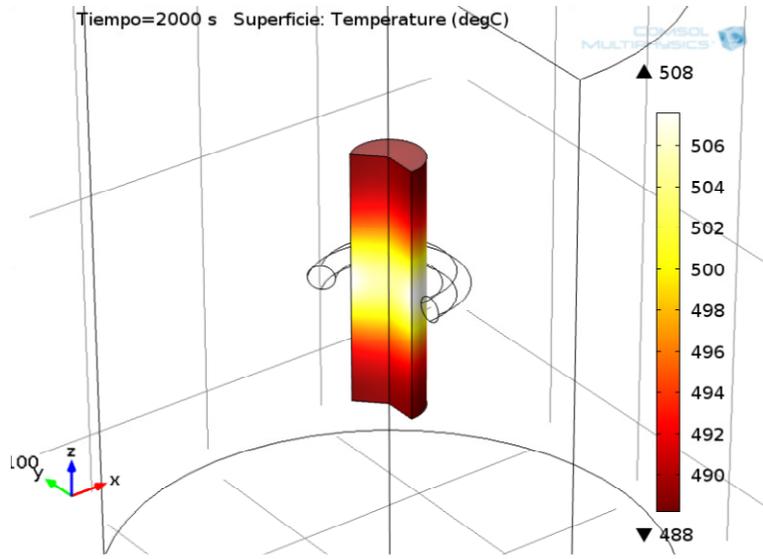


Figura 4.9 Pieza detallada en t = 2000 segundos

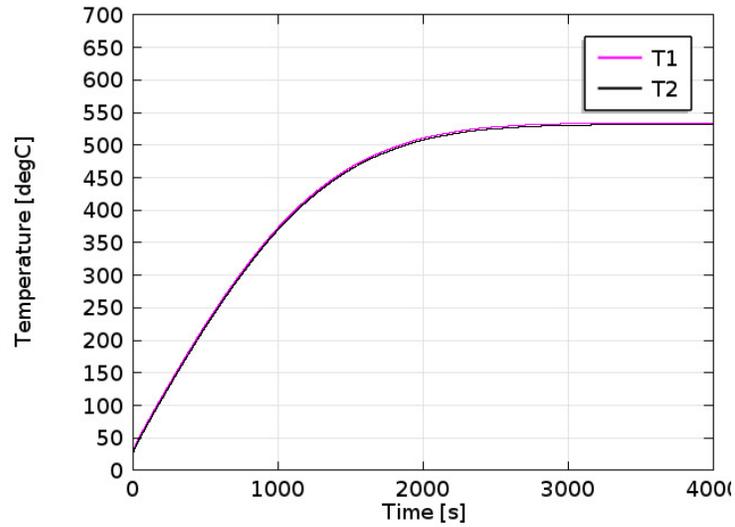


Figura 4.10 Incremento de temperaturas de los puntos seleccionados T1 y T2

4.2 Simulación 2

CASO: INDUCCIÓN MÁS CONCENTRACIÓN SOLAR EN UN EXTREMO.

Para la segunda simulación parte además de la inducción, se agrega al proceso el calentamiento debido a concentración solar en la parte inferior de la pieza.

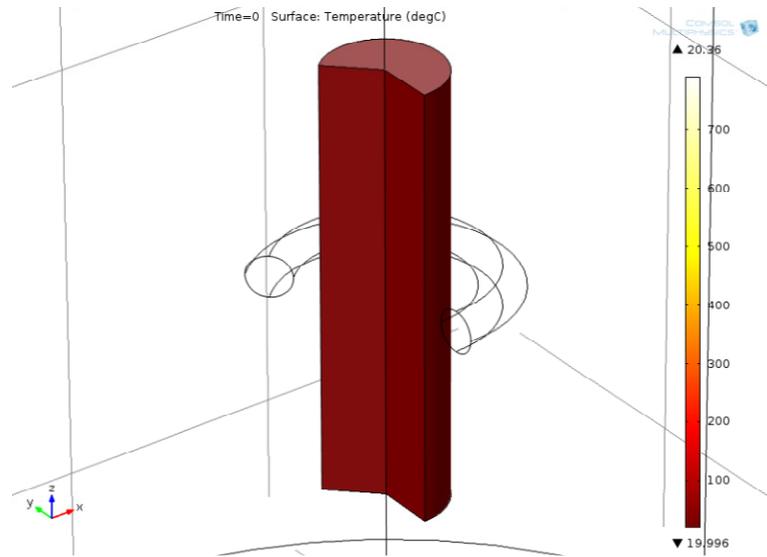


Figura 4.11 Temperatura de la pieza al inicio del experimento

De nuevo se empieza con la pieza de trabajo a una temperatura homogénea de 20°C (figura 4.11)

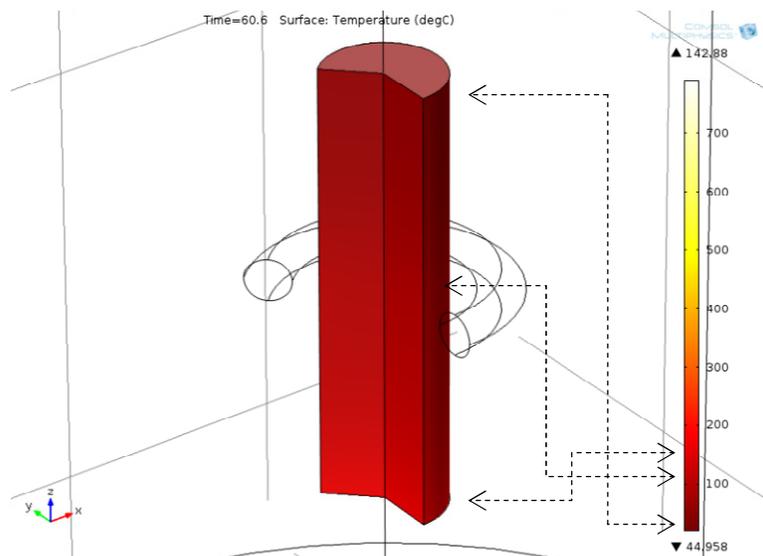


Figura 4.12 Pieza en t = 60.5 segundos

De inmediato, en la figura 4.12, se observa como el calentamiento se da de una forma más acelerada que en la simulación anterior.

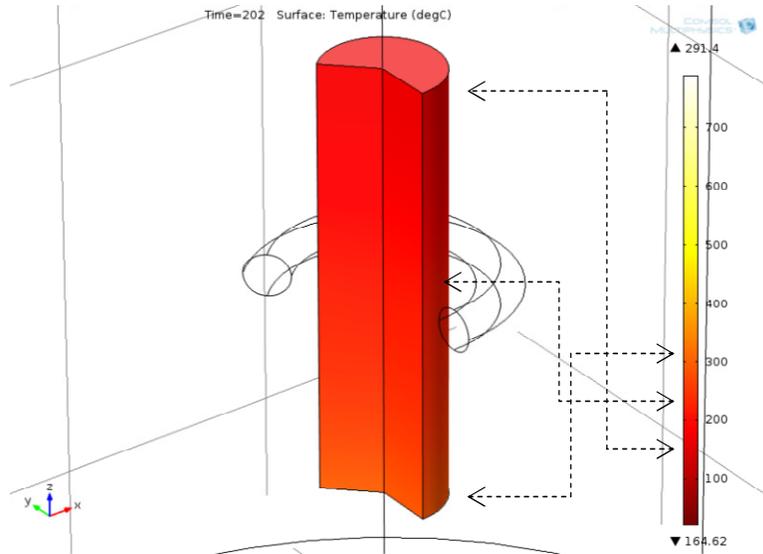


Figura 4.13 Pieza en t = 202 segundos

En esta simulación la parte más caliente de la pieza es la base inferior que en la figura 4.13 tiene una temperatura de 291.4 °C y en la zona mas fría es el techo de la pieza con 164.62 °C.

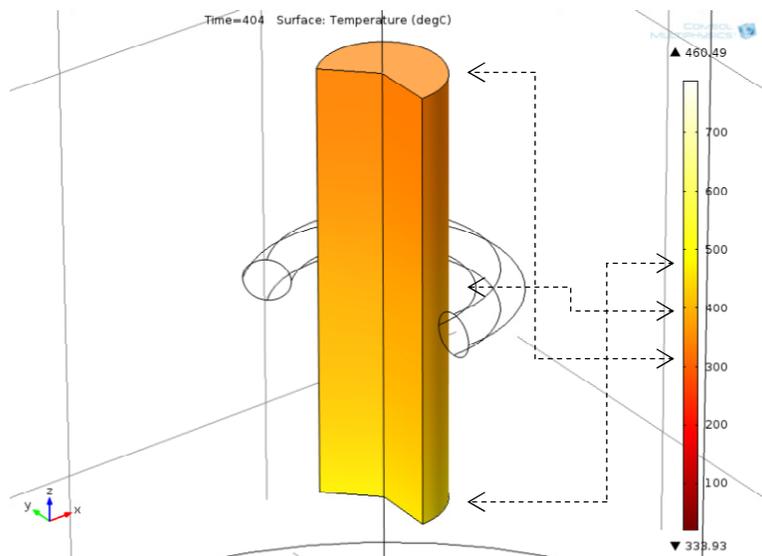


Figura 4.14 Pieza en t = 404 segundos

También se nota que en este experimento la relación del crecimiento de temperatura entre la zona más fría y la mas caliente no es homogénea, como en la simulación 1, sin embargo, es de notar que las diferencias de temperaturas entre un extremo y otro de la pieza superan los 100 °C.

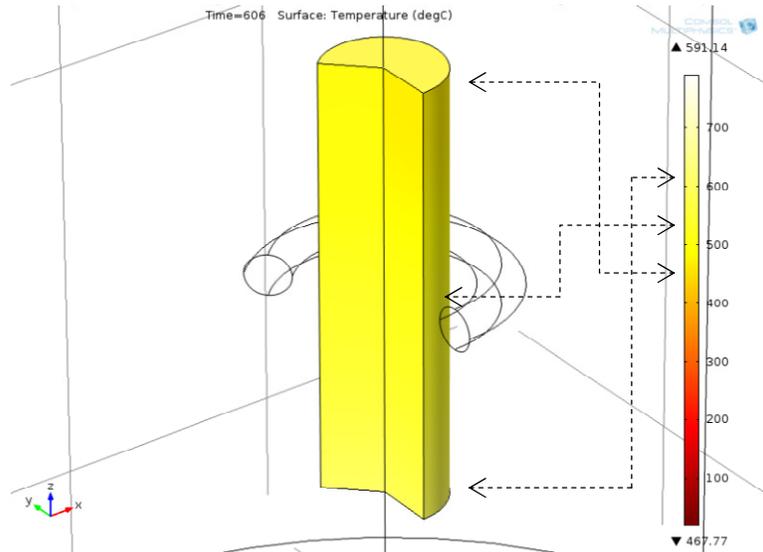


Figura 4.15 Pieza en t = 606 segundos

En la figura 4.15 la temperatura en la base de la pieza es 591.14 °C y en el tope de 467.77 °C.

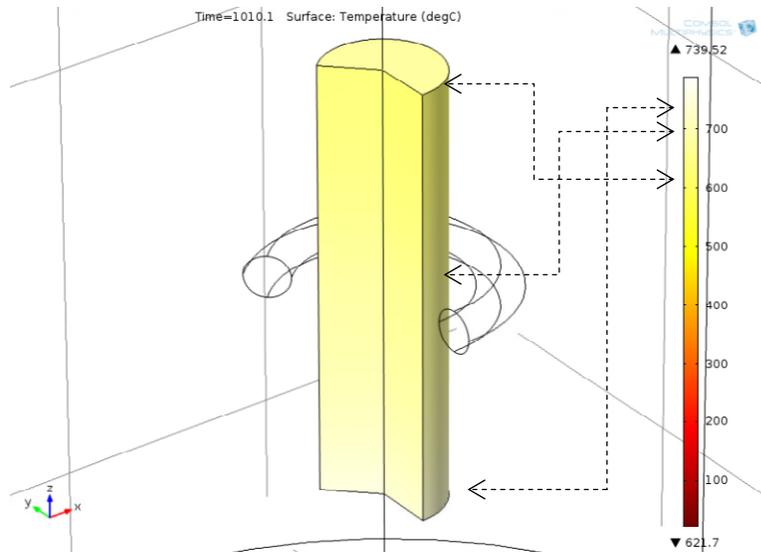


Figura 4.16 Pieza en t = 1010.1 segundos

En las figuras 4.16, 4.17 y 4.18, se observa como la temperatura se estabiliza en la zona más caliente llegando casi a los 790 °C, mientras que en la zona “más fría” no llega a los 670 °C.

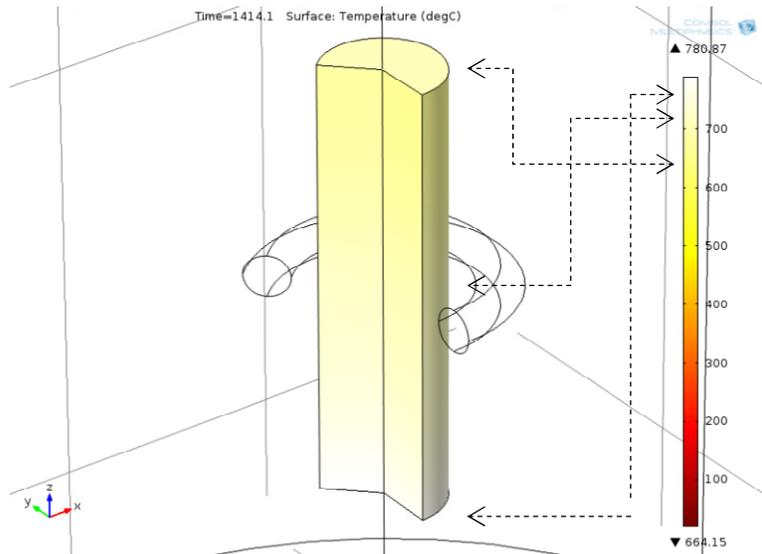


Figura 4.17 Pieza en t = 1414.1 segundos

En comparación con la primera simulación, en esta ocasión se logró una temperatura máxima 200 °C mayor en la mitad del tiempo, sin embargo, hay que tomar en consideración la gran diferencia de temperatura entre una zona y otra, y que consecuencias puede tener en un proceso posterior.

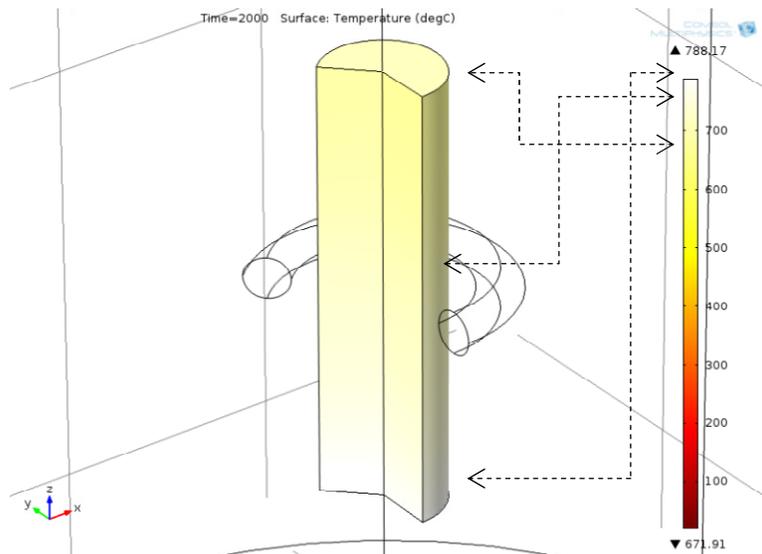


Figura 4.18 Pieza en t = 2000 segundos

En la figura 4.19, la imagen a detalle de la parte final del proceso se observa la distribución de temperaturas, así como la gradación que hay en las mismas de un extremo a otro de la pieza.

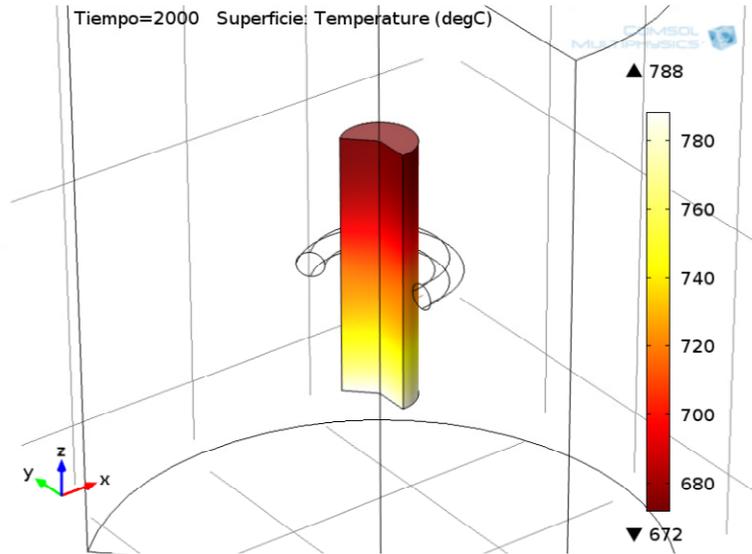


Figura 4.19 Pieza detallada en t = 2000 segundos

La gráfica de la figura 4.20 muestra que la zona estable de las temperaturas aparece después del tiempo $t = 1500$ segundos. Y de nuevo no se observa una diferencia notable entre las temperaturas en los puntos seleccionados T1 y T2.

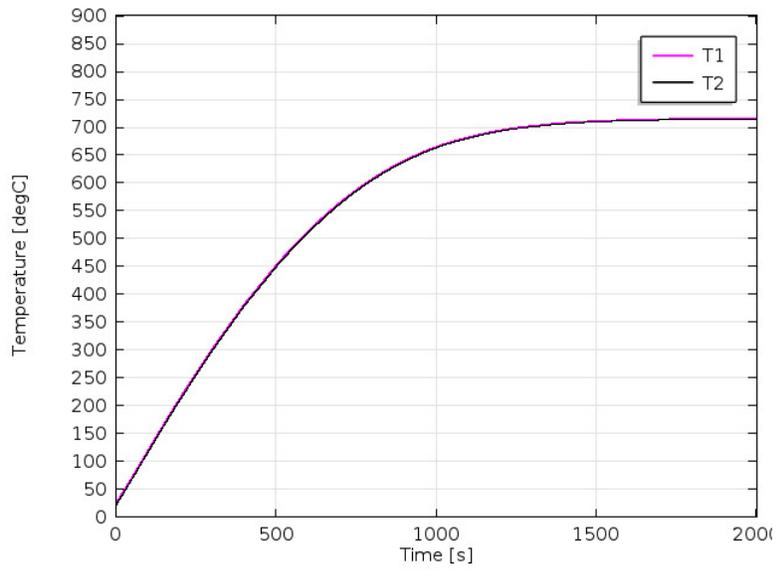


Figura 4.20 Incremento de temperaturas de los puntos seleccionados T1 y T2

4.3 Simulación 3

CASO: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON BOBINA RECORRIDA MÁS CONCENTRACIÓN SOLAR

La variación en esta simulación es que la bobina se recorre al lo que era el extremo “frío” en el experimento anterior, el motivo de esto es ver si se puede conseguir que los extremos de temperatura tengan una diferencia menor entre ellos. De nuevo se comienza con la pieza a 20 °C (figura 4.21).

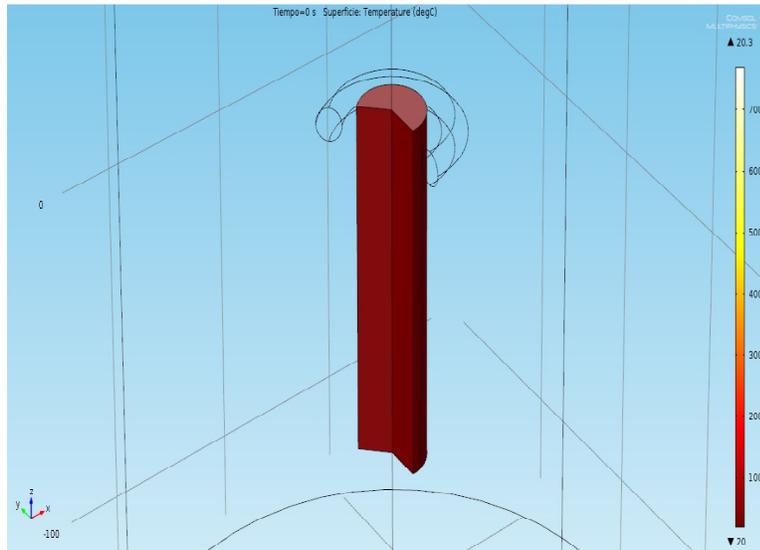


Figura 4.21 Temperatura de la pieza al inicio del experimento

En la figura 4.22, se observa como en esta ocasión la parte fría de la pieza ya no es la tapa superior, sino una zona ligeramente arriba del centro de la pieza.

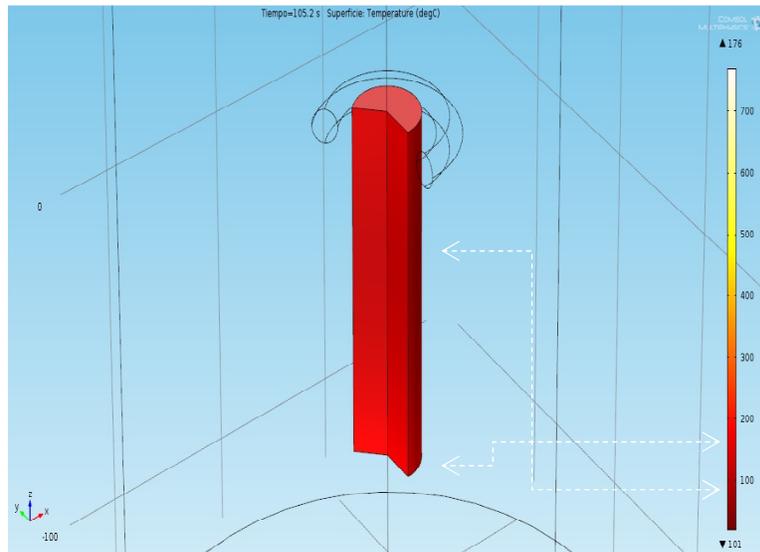


Figura 4.22 Pieza en t = 105.2 segundos

La figura 4.22 presenta las temperaturas mínimas y máximas de 101 ° y 176 °C respectivamente y en la figura 4.23 son de 196 °C y 273 °C. Es importante hacer notar que en esta simulación (de las figuras 4.23 a la 4.28), la diferencia de temperaturas entre la mínima y máxima, se mantiene casi constante en lo que va del proceso. Así como que la diferencia de temperatura entre la tapa inferior y la superior de la pieza, se mantiene en 50 °C.

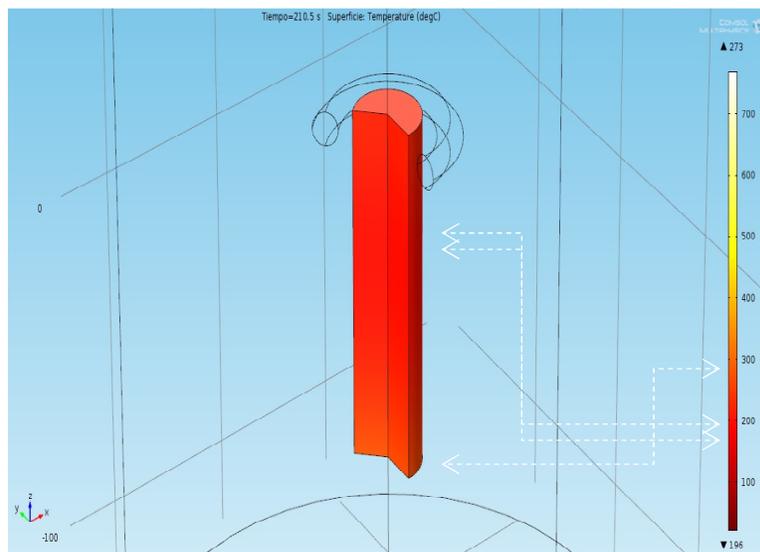


Figura 4.23 Pieza en t = 210.5 segundos

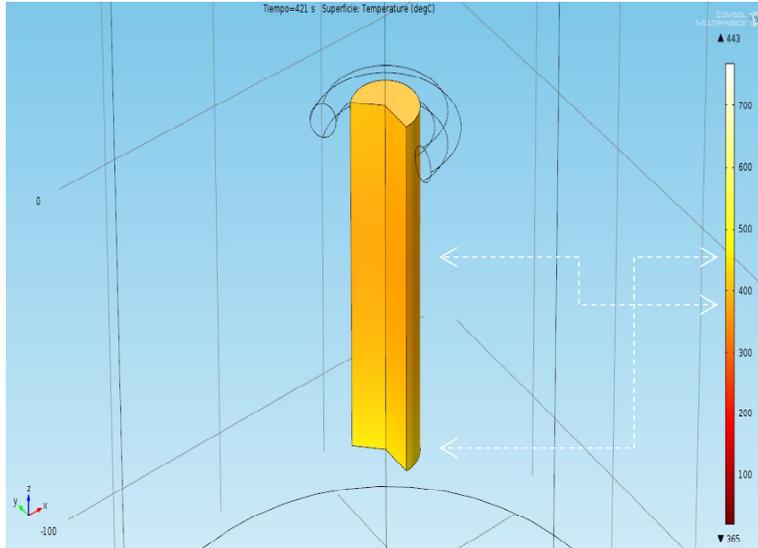


Figura 4.24 Pieza en t = 421 segundos

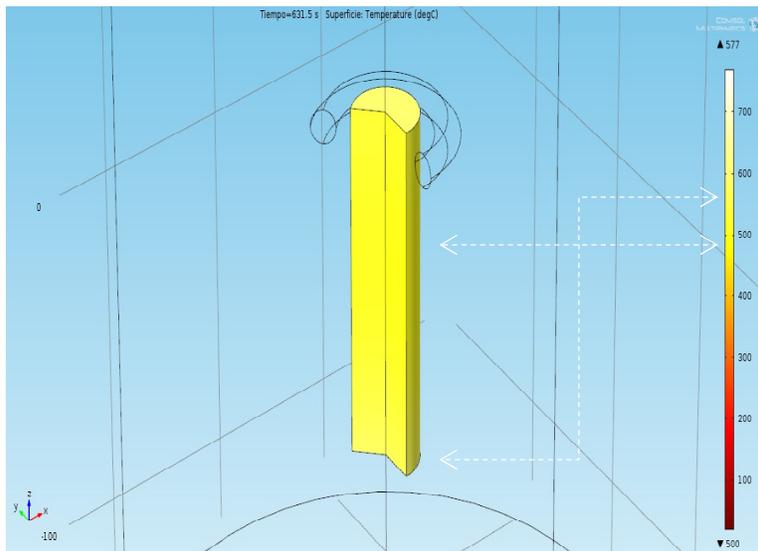


Figura 4.25 Pieza en t = 631 segundos

En la figura 4.26 la temperatura en el centro de la pieza es ronda los 593 °C y en la base los 669 °C

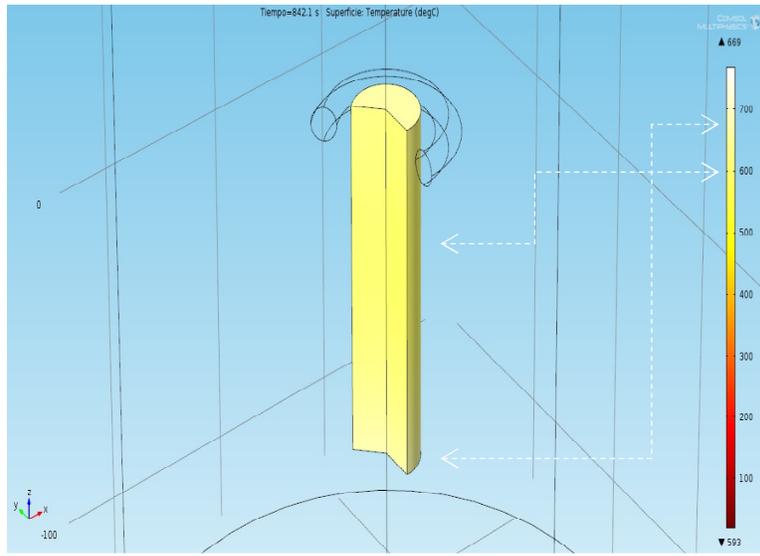


Figura 4.26 Pieza en tiempo 842.1

Desde la figura 4.27 y la 4.28, muestran las partes finales del proceso, incrementando hasta llegar a una temperatura de 767 °C en la zona más caliente y 692 °C en la mínima.

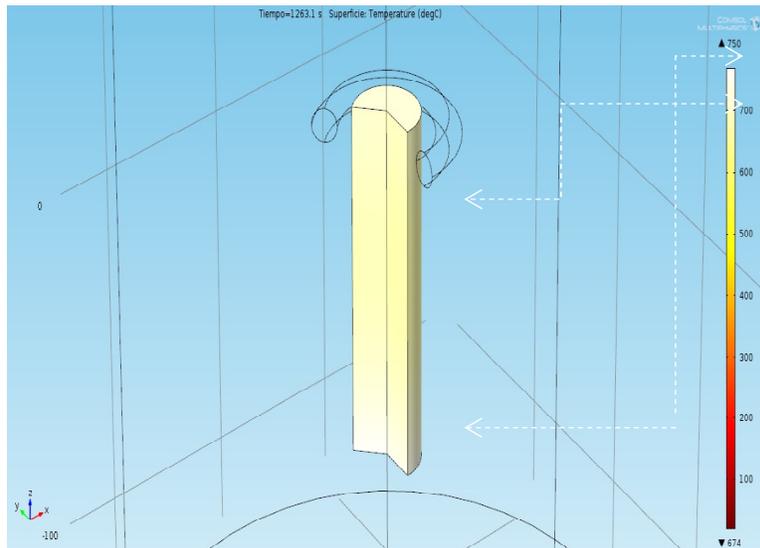


Figura 4.27 Pieza en t = 1263.1 segundos

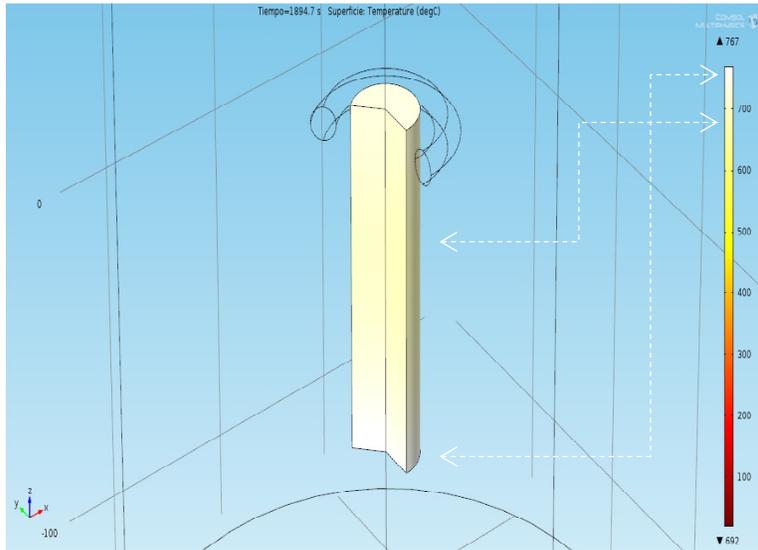


Figura 4.28 Pieza en t = 2000 segundos

En esta secuencia, de nuevo la relación de incremento por zonas de la pieza se mantuvo constante por todo el proceso, como se ve en la figura 4.29, y la relación de diferencia de temperaturas entre la zona caliente y la fría, se mantuvo alrededor de los 76 °C, todo el proceso. También, la diferencia de temperatura entre la base inferior de la pieza y el centro de la misma se mantuvo en 50 °C.

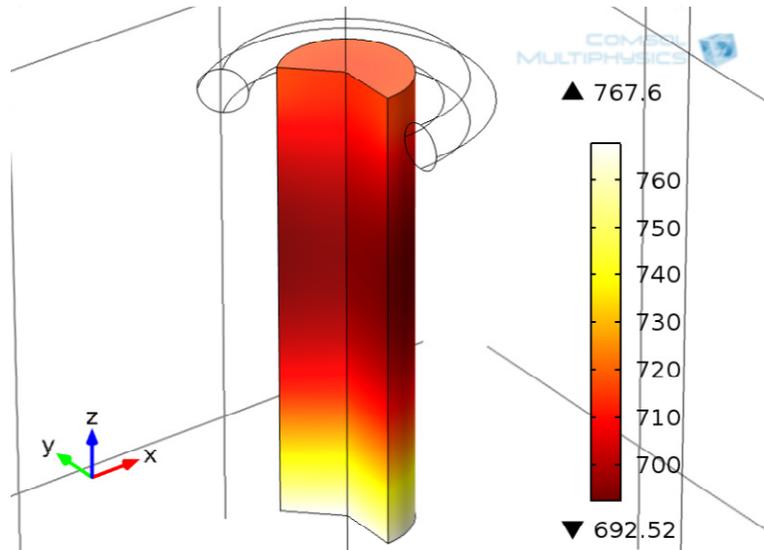


Figura 4.29 Pieza detallada en tiempo 2000

Y para concluir con las simulaciones, la gráfica final (figura 4.30) muestra las temperaturas en los puntos T1 y T2 durante el experimento. Visualmente es notable que la temperatura comienza a estabilizarse cerca del segundo 1500, y que de nuevo, no hay una diferencia apreciable entre T1 y T2

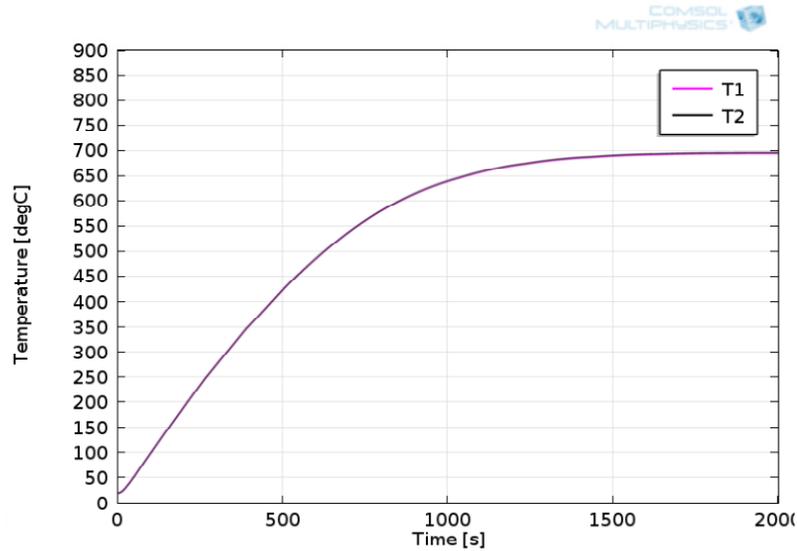


Figura 4.30 Gráfica del incremento de temperaturas de T1 y T2

CONCLUSIONES

- En este trabajo, ha sido posible observar, de manera simulada, el comportamiento de la transferencia de calor en un sólido metálico por medio del calentamiento por inducción magnética y en conjunto con concentración solar.
- El software COMSOL[®], fue de gran utilidad para el análisis de elemento finito del proceso, realizando así la solución numérica de la ecuación de calor, acoplada a la ley de Ampere.
- De los resultados obtenidos, se puede comprobar que con el uso de la concentración solar para el calentamiento de la pieza, se tiene un aumento de la temperatura máxima disminuyendo considerablemente el tiempo de calentamiento.
- Se ha encontrado también que las diferencias de temperatura en toda la pieza, son suficientemente grandes como para que pudieran tener algún efecto, en la integridad de la pieza para un proceso posterior.
- Sin embargo, al querer observar el efecto piel debido al calentamiento por inducción, se notó que en ninguno de los casos las diferencias alcanzadas entre la temperatura del núcleo y la superficie de la pieza eran de consideración, y esto debido a que el radio de la pieza fue demasiado pequeño en comparación al largo de la pieza.

- También quedaría por considerar para trabajos posteriores, el hecho de que el inductor solo contiene una espira, ¿qué pasaría, por ejemplo, si se cubriera toda la pieza? O ¿que tal si las dimensiones de la pieza se alteran en gran medida? Es de sentido común que si se hubiera afectado la longitud o el radio de la pieza, las variaciones longitudinales y axiales de temperatura habrían cambiado.
- También, para la simulación 3, se podría buscar la posición del inductor donde se optimice todo el proceso y las diferencias de temperaturas a lo largo de la pieza se mantengan como mínimas.

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

0.1 ANTO Jeni, Thiagarajan Raj C. “Coupled Electromagnetic and Heat Transfer Simulations for RF Applicator Design for efficient Heating of Materials”

0.2 FELIACHI M., G. Devely, “Magneto-Thermal Behavior Finite Element Analysis for Ferromagnetic Materials in Induction Heating Devices”

0.3 KAPUSTA J., et al. “Modeling of Induction Heating of Steel Billets for DPS Control Design Purposes”

0.4 BHAT A. “Thermal Analysis of Induction Furnace”

0.5 Halvorsen S. A. “A Model for High Temperature Inductive Heating”

0.6 PANTELYAT M. G., Féliachi M. “Magneto-Thermo-Elastic-Plastic Simulation of Inductive Heating of Metals”

CAPÍTULO 1

1.1 GROOVER Mikell P. “Fundamentos de manufactura moderna”, Tercera Edición, McGraw-Hill Interamericana, Mexico 2007.

1.2 SCHEY A. Jhon, “Procesos de manufactura”, Tercera Edición, McGraw-Hill Interamericana, México 2002.

1.3 DESHMUKH Yoshvant V. “Industrial Heating”, Taylor & Francis Grove, 2005

1.4 TRINKS W, Mawhimey M. M., “Hornos Industriales Vol. 1.” URMO S.A de EDICIONES, 1975

1.5 AZTIGARRAGA Uqrquiza Julio, “Hornos Industriales de resistencia: Teoría calculo y aplicaciones”. McGraw-Hill, España 1994.

CAPÍTULO 2

- 2.1 ZINN S., Semiatin S. L. “Elements of induction heating”, ASM Internacional.
- 2.2 FERNÁNDEZ, J.L., “Introducción al estudio de Los sistemas solares activos”, Instituto de Ingeniería de La UNAM
- 2.3 KREITH, F. Y Kreider, J.F, “Principles of Solar Engineering”, McGraw Hill Book Co., New York, 1978.

CAPÍTULO 3

- 3.1 “AC/DC Module, User’s Guide”, COMSOL®.
- 3.2 “Heat Transfer Module, User’s Guide”, COMSOL®.
- 3.3 ROJAS Morin, et al. “Thermal Analysis for the Solar Concentrating Energy and Induction Heating for Metals”, 2013 COMSOL® Conference in Rotterdam