

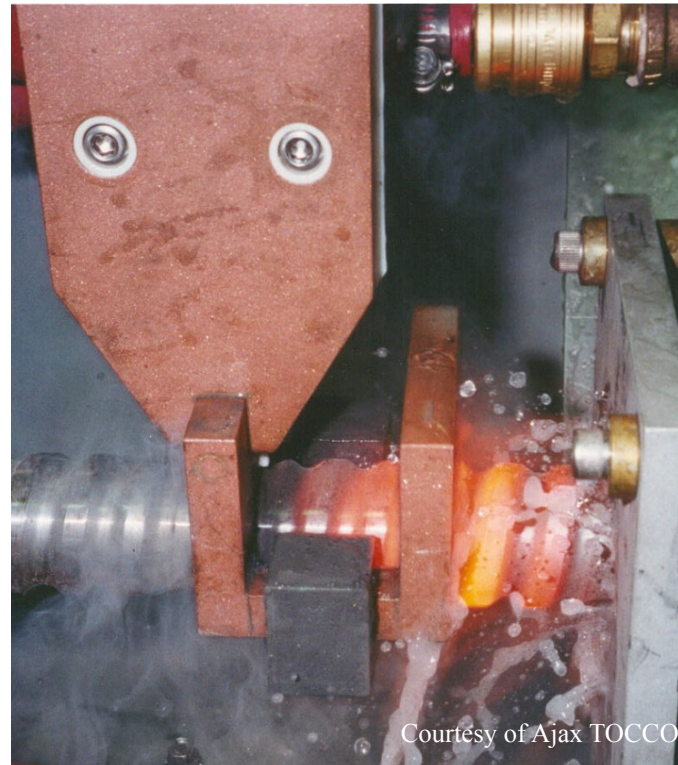


Induction Heating Simulation and Concentrator Use

Sean Muyskens and Ricardo Diaz
smmuyskens@fluxtrol.com rjdiaz@fluxtrol.com
www.fluxtrol.com

Outline

- Induction Heating Introduction
- Reference Depth
- Computer Simulation
 - Frequency Effect
 - Time vs Power
 - Gear Heating
- Effect of Concentrator
- Examples
- Conclusions

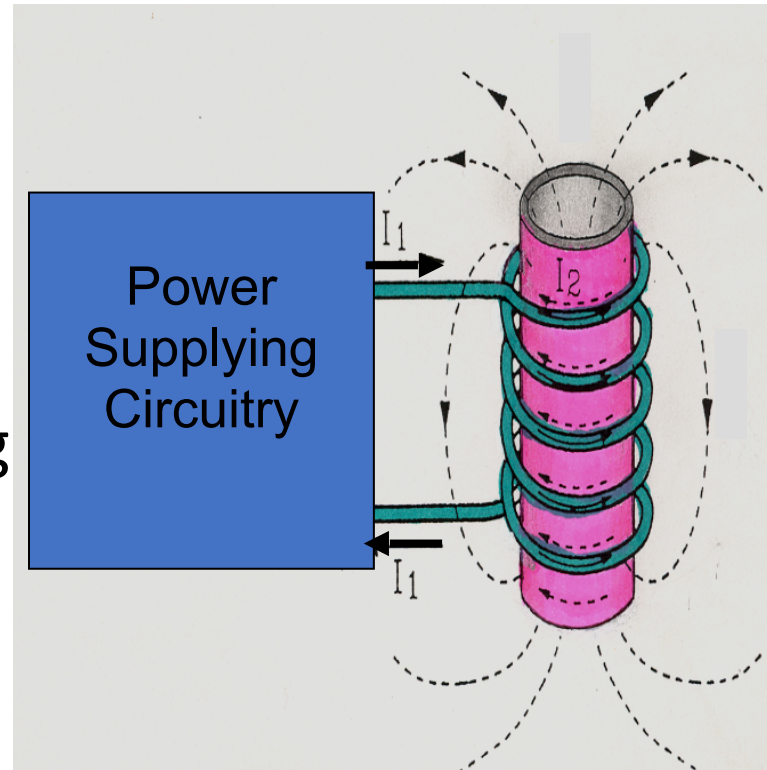


Contorno

- Introducción al calentamiento por inducción
 - Profundidad de referencia
 - Simulación por Computadora
 - Efecto de la frecuencia
 - Tiempo vs Potencia
 - Calentamiento de engranes
- Efecto del concentrador
- Ejemplos
- Conclusiones

What is Induction Heating?

- Contactless Heating Technology
- Uses alternating current (AC) and an induction coil to generate an alternating magnetic field to heat conductive bodies
- Used in many applications including heat treatment, melting forging, etc.



Schematic of an Induction Heating System.

I_1 : AC current in the coil

I_2 : AC current in the workpiece

¿Qué es el calentamiento por inducción?

- Método para calentar sin contacto alguno
Utiliza corriente alterna (AC) y una bobina de inducción para generar un campo magnético alterno para calentar materiales eléctricamente conductivos
Se utiliza en muchas aplicaciones, incluyendo tratamiento térmico, fusión de forja, etc.

Skin Effect and Reference Depth

- Skin Effect refers to AC current flowing volumetrically near the surface of conductive bodies
- The reference depth δ is calculated to quantify the skin effect

$$\delta = k \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

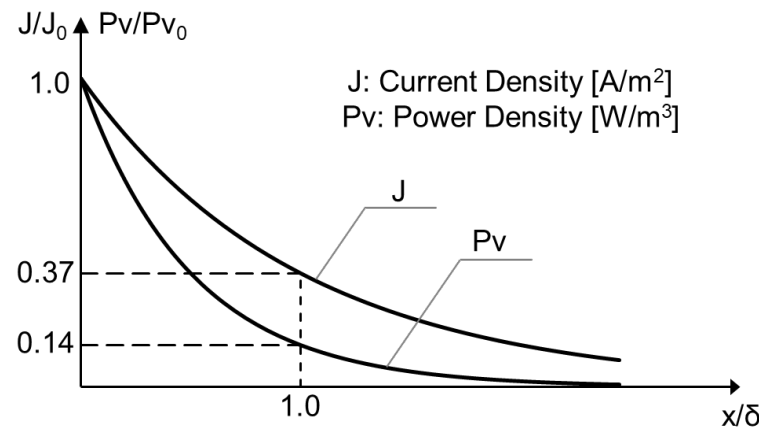
ρ : Electrical Resistivity (Material Property)

μ_r : Relative Magnetic Permeability (Material Property)

f : Frequency (Induction Parameter)

k : Constant

- Reference depth depends on ρ , μ , and f
- Frequency can be chosen to achieve the desired reference depths



Efecto Piel y Profundidad de Penetración

- El efecto piel se refiere a la corriente alterna que fluye volumétricamente cerca de la superficie de los cuerpos conductores.
- La profundidad de penetración δ se calcula para cuantificar el efecto piel

$$\delta = k \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

ρ : Resistividad eléctrica (propiedad del material)

μ_r : Permeabilidad magnética relativa (propiedad del material)

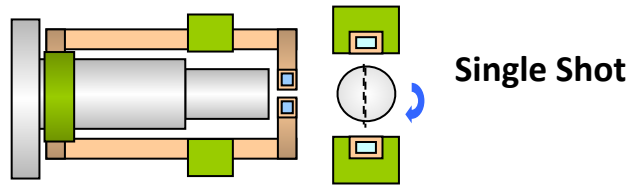
f : Frecuencia (parámetro de inducción)

k : Constante

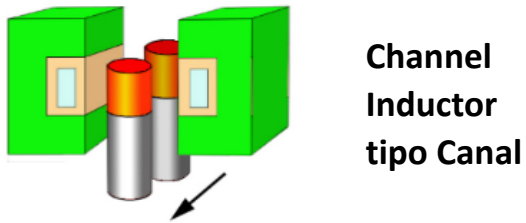
- La profundidad de referencia depende de ρ , μ y f
- La frecuencia se puede elegir para alcanzar las profundidades de referencia deseadas

Coil Types

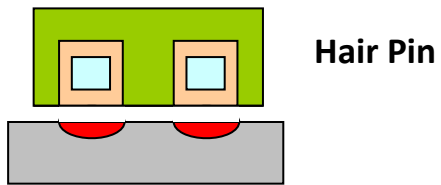
Tipos de Bobinas



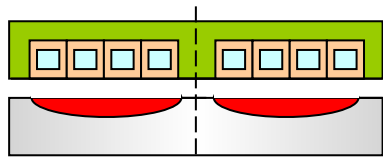
Single Shot



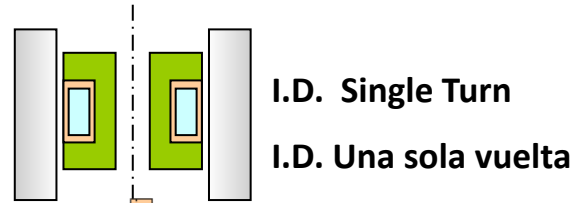
Channel Inductor tipo Canal



Hair Pin

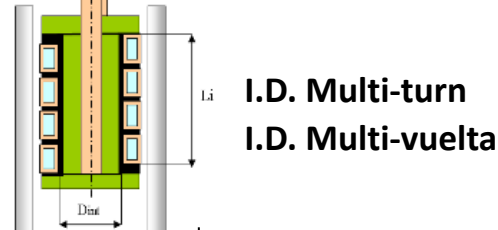


Pancake



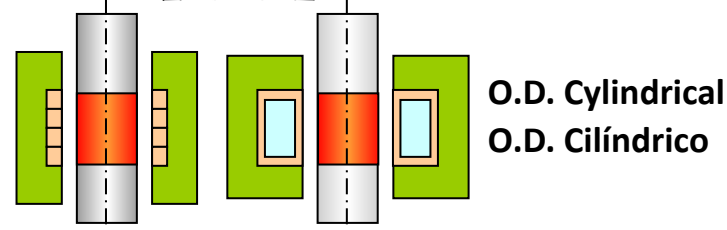
I.D. Single Turn

I.D. Una sola vuelta



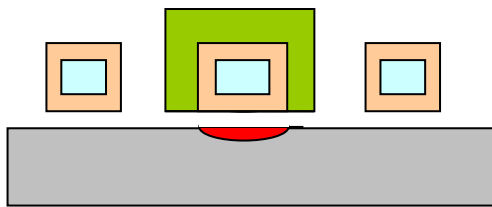
I.D. Multi-turn

I.D. Multi-vuelta

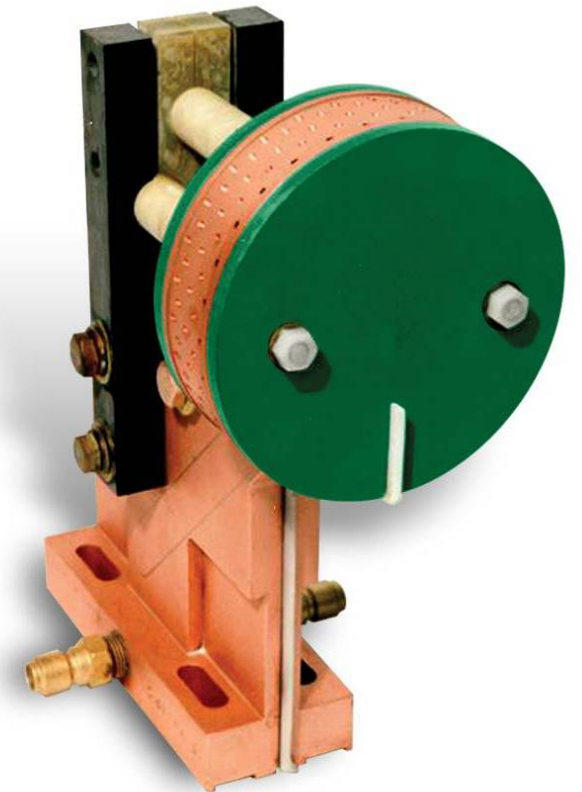


O.D. Cylindrical

O.D. Cilíndrico



Vertical Loop and Split & Return



Single-turn I.D. Induction Coil with Fluxtrol A Concentrator

Bobina de inducción I.D. de una sola vuelta con concentrador Fluxtrol A

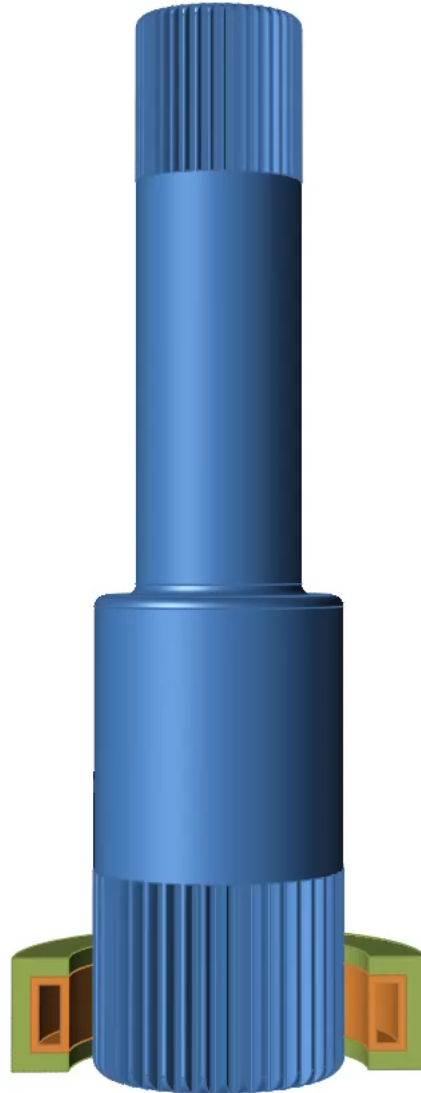
Advantages and Disadvantages of Induction Heating

Advantages

- Contactless
- Repeatable
- Can heat locally
- Versatile
- Fast
- Many different possible coil designs
- Can be very energy efficient

Disadvantages

- Requires understanding and development
- Not always easy to use same equipment for different applications
- Does not work directly with non-magnetic and insulating materials



Ventajas y desventajas del calentamiento por inducción

Ventajas

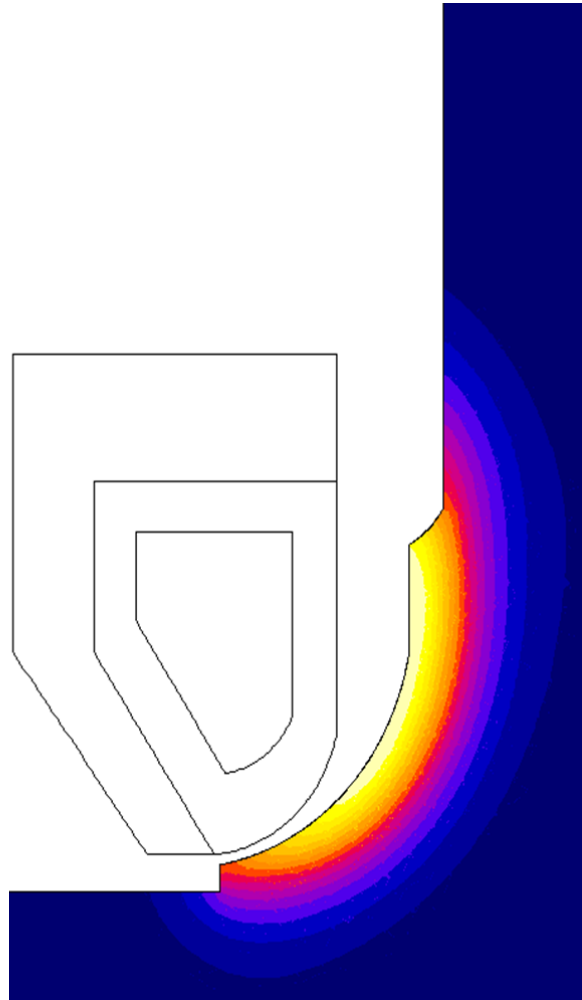
- Sin contacto
- Repetible
- Puede calentar de manera local
- Versátil
- Rapido
- Muchos diseños de bobinas diferentes
- Energéticamente puede ser muy eficiente

Desventajas

- Requiere comprensión del método y de desarrollo
- No siempre es fácil usar el mismo equipo para diferentes aplicaciones
- No funciona directamente con materiales que no son magnéticos y o materiales aislantes

Computer Simulation

- Computer Simulation (Modelling) is a method of using software to mathematically describe a physical system and predict outcomes
- For induction heating, computer simulation can be used to predict electrical parameters and temperature results
- It can also be used to design coils and validate processes
- More physics coupling can be used to predict expansion, stresses, and transformation



Simulación por ordenador

- La simulación por computadora (modelado) es un método de uso de software para describir matemáticamente un sistema físico y predecir resultados
Para el calentamiento por inducción, la simulación por computadora se puede utilizar para predecir parámetros eléctricos y resultados de temperatura También se puede utilizar para diseñar bobinas y validar procesos
Haciendo uso de sistemas adicionales es posible predecir la expansión, las tensiones y la transformación

Simulation vs. Experimental

Simulación vs. Experimental

Simulation

Experimental

Simulación

Experimental

Advantages

- Can work for any geometry and operating conditions
- Demonstrates the entire dynamics of the process
- Leaves records for future
- Limitless accuracy of calculations
- Does not require special equipment
- Less expensive and time consuming
- Future improvements expected

Limits and Disadvantages

- Requires special software and databases
- Requires expertise
- Not all the processes may be simulated (as of today)
- Does not provide physical samples

Advantages

- May provide the most reliable results
- Can show performance of the whole system, including unexpected effects and troubles
- Does not require material property database
- Provides physical samples for properties validation

Limits and Disadvantages

- May require expensive equipment
- Does not provide a good understanding of the process
- Difficult to transfer knowledge
- Case dependent accuracy
- In most cases requires several inductors to be build and modified. Development may require lots of hours to test and cut samples for evaluation
- Limited access to production equipment (expensive)

Ventajas

- Puede trabajar para cualquier geometría y condiciones de funcionamiento
Demuestra toda la dinámica del proceso
Deja historial de datos que nos pueden servir en un futuro
Los Cálculos y modificaciones son ilimitados
No requiere equipo especial
Requiere de menor tiempo y el costo es más bajo
Siempre se puede esperar una mejora en el modelo

Límites y desventajas

- Requiere software y bases de datos especiales
Requiere de experiencia
No todos los procesos pueden ser simulados
No proporciona muestras físicas

Ventajas

- Provee los resultados más confiables
Puede mostrar el rendimiento de todo el sistema, incluyendo efectos inesperados y problemas
No requiere base de datos de propiedades de material
Proporciona muestras físicas para la validación de propiedades

Límites y desventajas

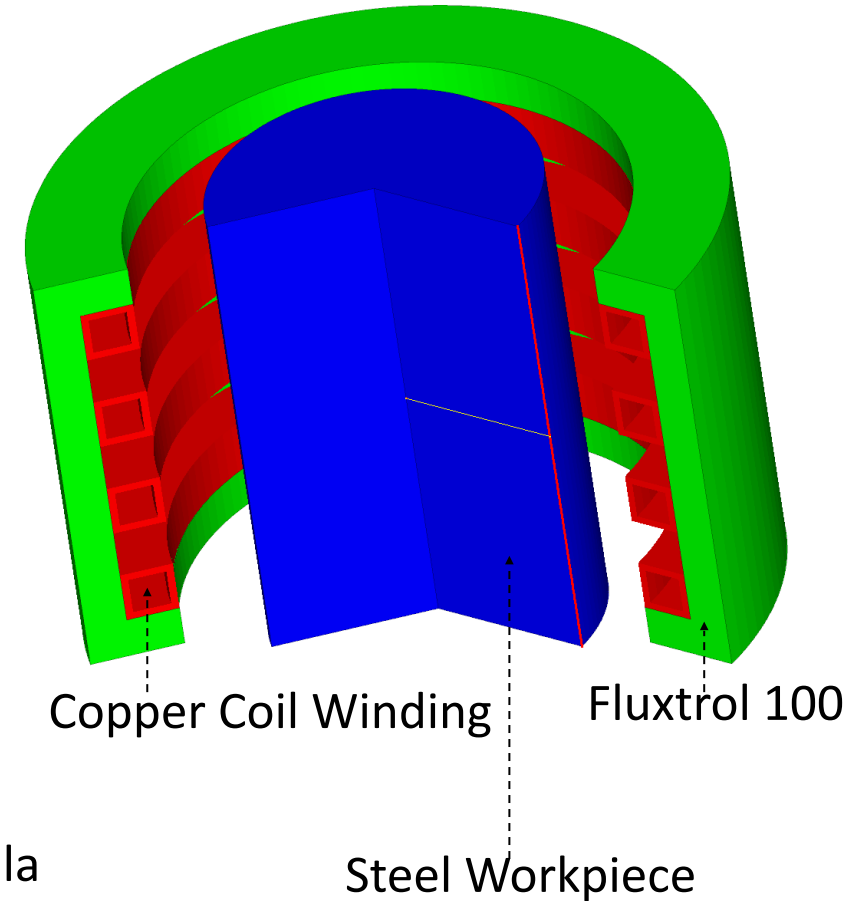
- Pudiera requerir equipos costosos
No proporciona una buena comprensión del proceso
Dificultad para transferir conocimientos
La precisión dependiente de cada caso
En la mayoría de los casos requiere de la construcción y o modificación de varios inductores. El desarrollo puede requerir muchas horas para probar y cortar muestras para su evaluación.
El Acceso a los equipos puede ser limitado, sobre todo si son equipos que trabajan continuamente en producción

Frequency Effect: Set-up

- The system above was modelled at different frequencies to investigate the effects on heating.
- The yellow line was used to plot radial distribution, while the red line was used to plot axial distribution
- For all cases, the steel workpiece was heated so that the maximum temperature is 950 °C using 3 s heat time
- Frequencies of 1, 5, 10, 30, 50, and 100 kHz were used

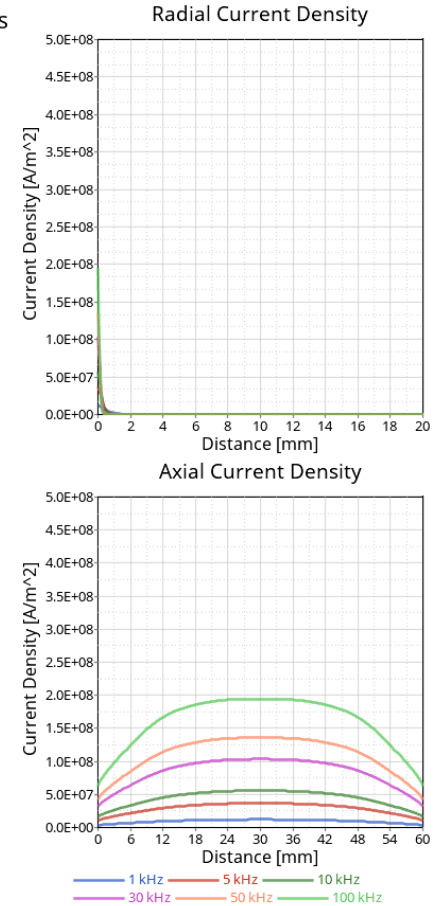
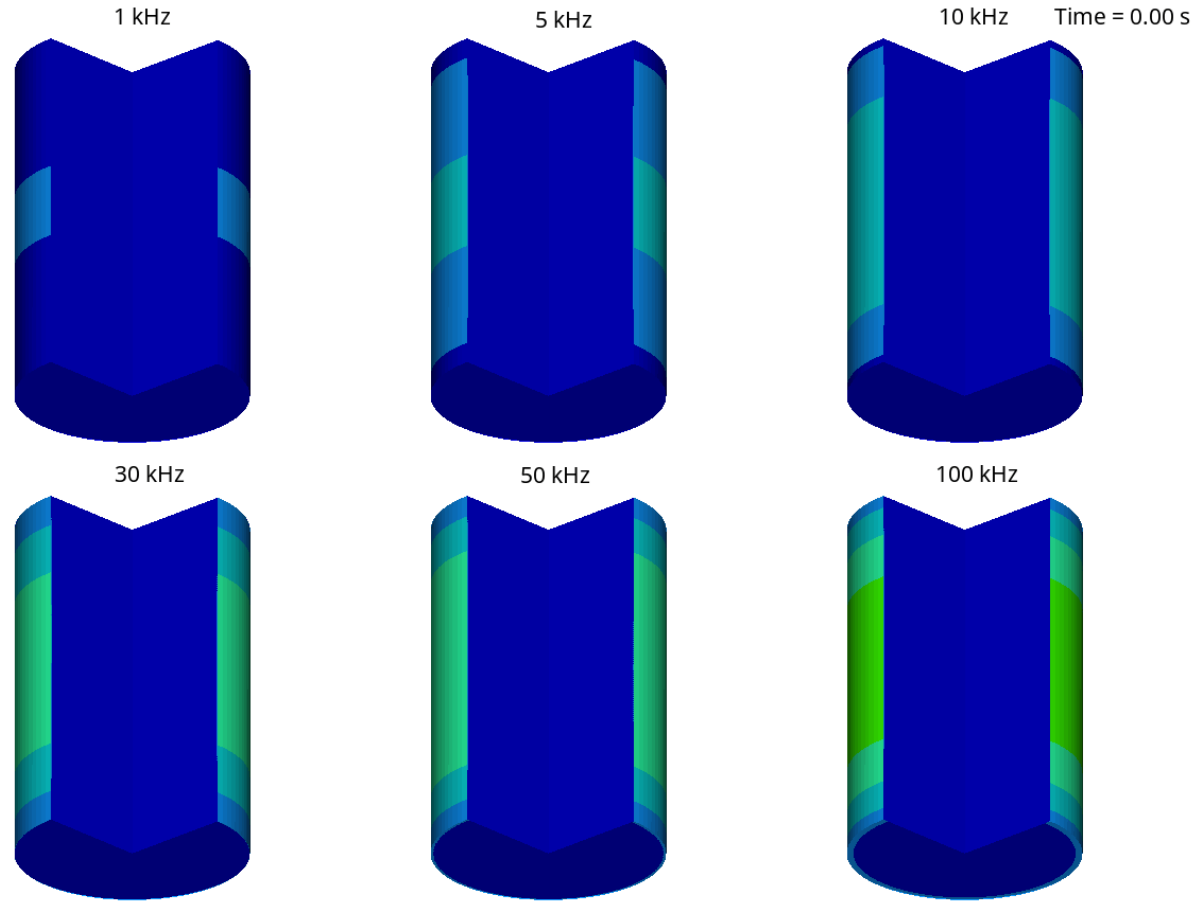
Efecto de frecuencia: Configuración

- El sistema anterior se modeló a diferentes frecuencias para investigar los efectos sobre el calentamiento.
La línea amarilla se usó para trazar la distribución radial, mientras que la línea roja se usó para trazar la distribución axial.
Para todos los casos, la pieza de trabajo de acero se calentó de modo que la temperatura máxima es de 950 ° C utilizando un tiempo de calor de 3 s.
Se utilizaron frecuencias de 1, 5, 10, 30, 50 y 100 kHz.



Frequency Effect: Current Density

- The animated pictures and graphs show the current density (J) distribution throughout the heat cycle
- The results show deeper penetration of J for the lower frequencies, in addition to higher end effects for the higher frequencies



Efecto de frecuencia: densidad de corriente

- Las imágenes y gráficos animados muestran la distribución de la densidad de corriente (J) a lo largo del ciclo de calor
- Los resultados muestran una penetración más profunda de J para las frecuencias más bajas, y de efectos finales más superficiales para las frecuencias más altas

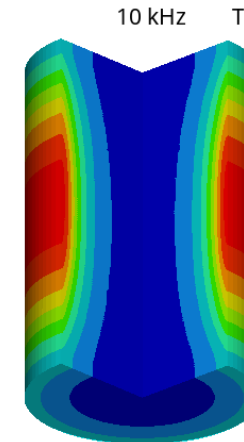
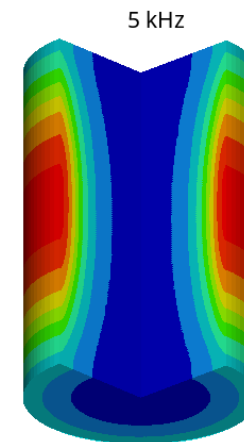
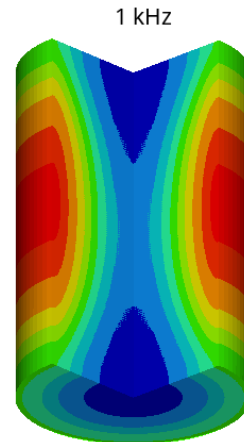
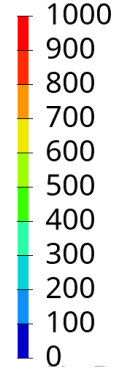
Frequency Effect: Temperature

- The animated pictures and graphs show the temperature distribution throughout the heat cycle
- As with current density, lower frequencies result in deeper penetration, while higher frequencies have a higher end effect

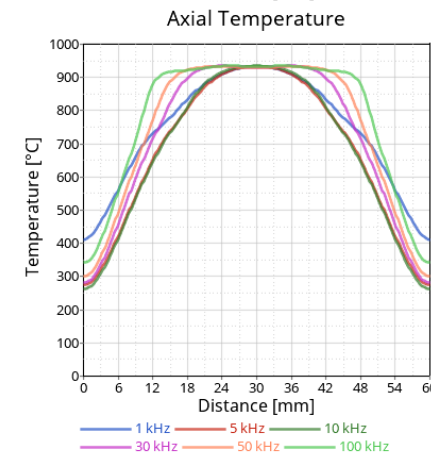
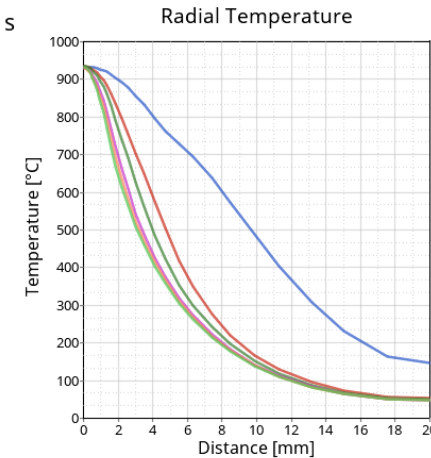
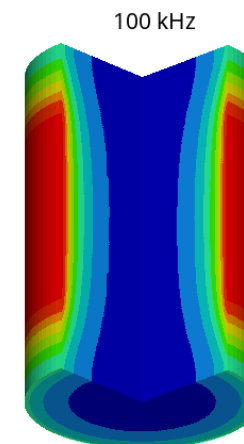
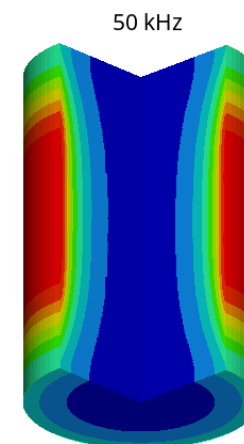
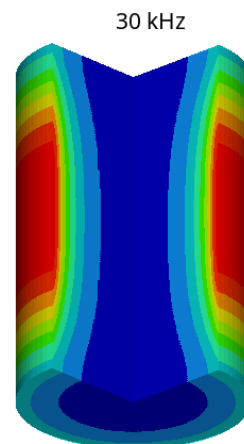
Efecto de frecuencia: Temperatura

- Las imágenes animadas y los gráficos muestran la distribución de la temperatura a lo largo del ciclo de calor
- Al igual que con la densidad de corriente, las frecuencias más bajas dan como resultado una penetración más profunda, mientras que las frecuencias más altas tienen un efecto final más alto

Temperature [°C]



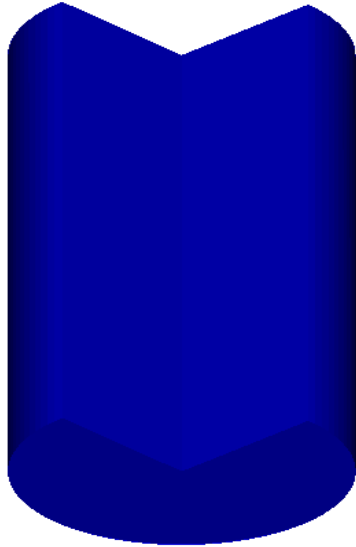
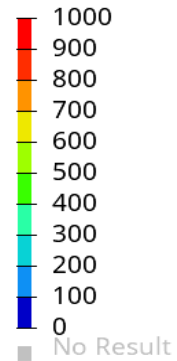
Time = 3.00 s



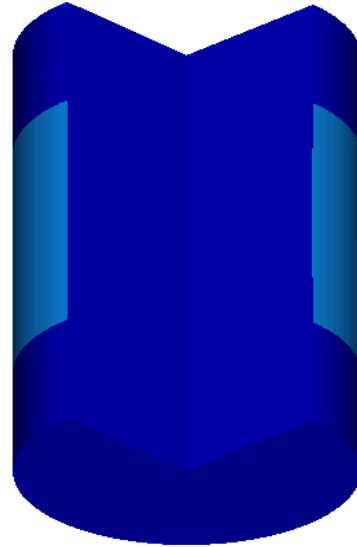
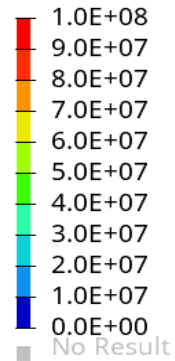
Parameter Change During Heat Cycle

Cambio de parámetros durante el ciclo de calor

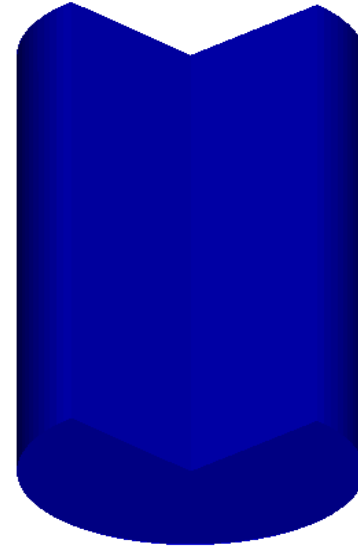
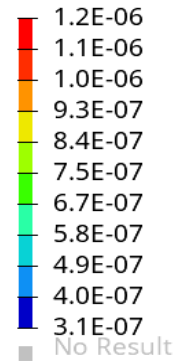
Temperature [°C]



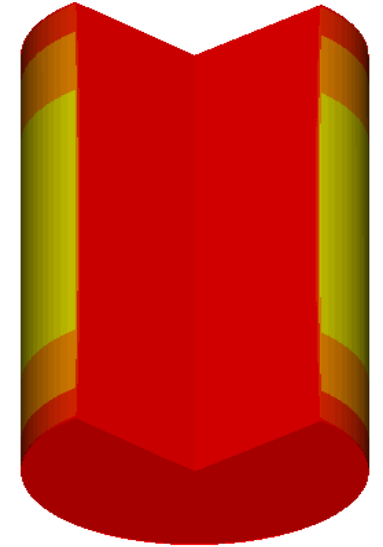
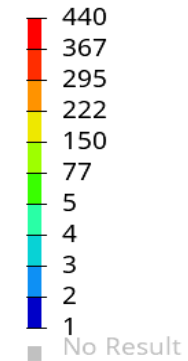
Current Density [A/m²]



Electrical Resistivity [Ωm]



Relative Permeability



- The animated pictures show the change in parameters during the heat cycle
- The electrical resistivity is temperature dependent
- Relative permeability (μ_r) is dependent on the magnetic field strength (H) and temperature
- J is dependent on the material properties, frequency, coil design, and current

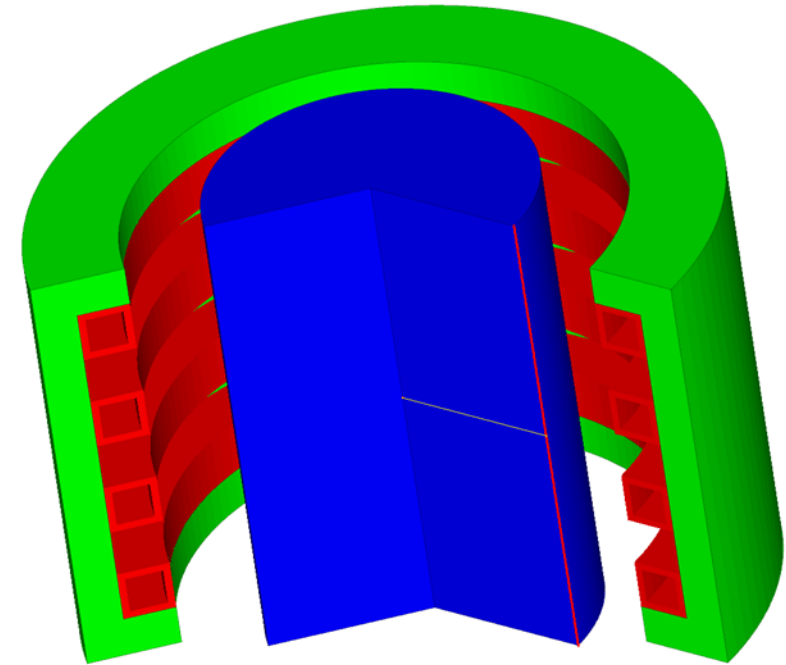
- Las imágenes animadas muestran el cambio en los parámetros durante el ciclo de calor
- La resistividad eléctrica depende de la temperatura
- La permeabilidad relativa (μ_r) depende de la intensidad del campo magnético (H) y la temperatura
- J depende de las propiedades del material, la frecuencia, el diseño de la bobina y la corriente.

Power vs Time: Set-up

- The same setup as the frequency study was used to model the effect of power and time on heating
- The yellow line was used to plot radial temperature distribution
- Three models were modelled at 10 kHz
- Heat times were 1s, 3s, and 5s, with the power adjusted to achieve a maximum 950°C

Potencia vs Tiempo: Configuración

- Se utilizó la misma configuración que el estudio de frecuencia para modelar el efecto de la potencia y el tiempo en la calefacción. La línea amarilla se utilizó para trazar la distribución de la temperatura radial
- Se modelaron tres modelos a 10 kHz
- Los tiempos de calor fueron 1s, 3s y 5s, con la potencia ajustada para alcanzar un máximo de 950 ° C

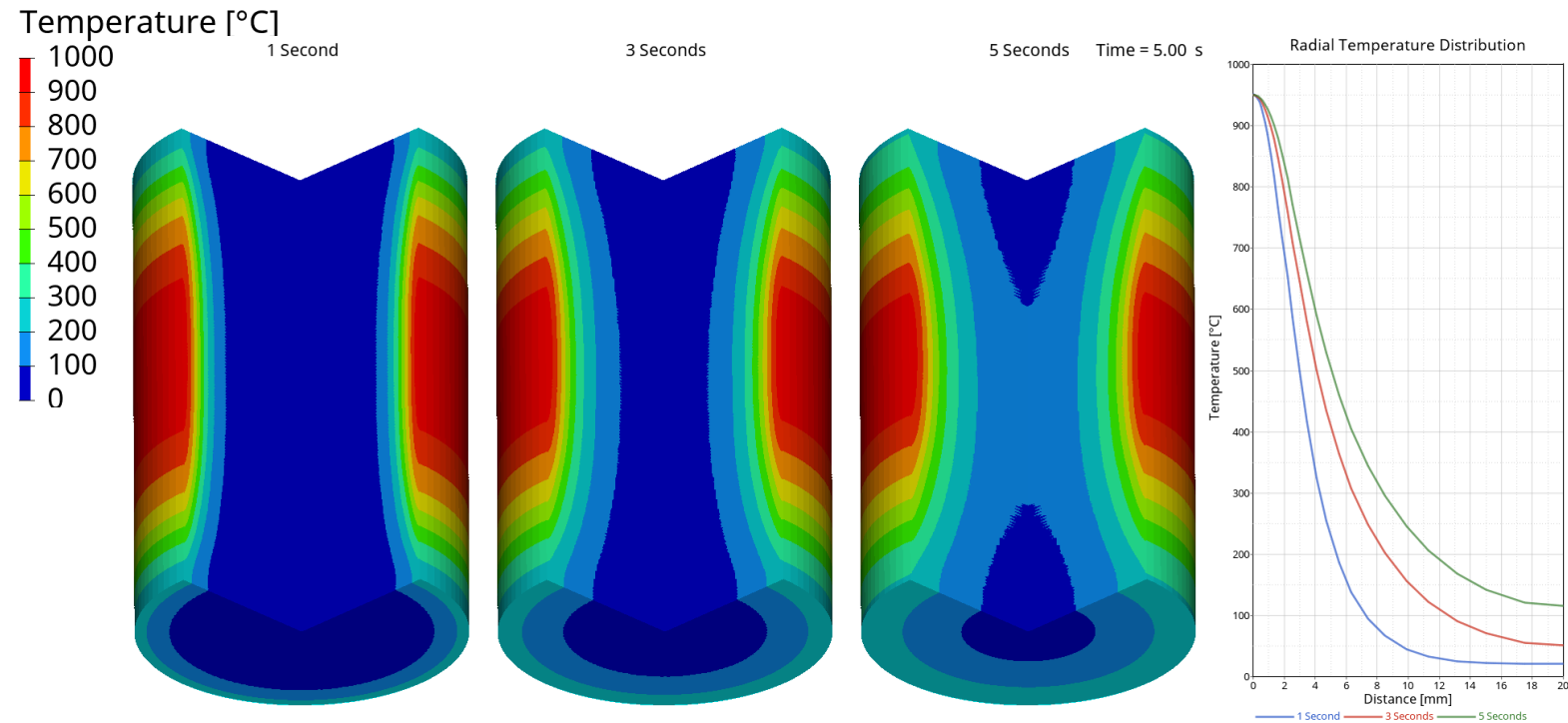


Power vs Time: Temperature Results

- The pictures and graph show the temperature distribution during the heat cycle
- The results show deeper penetration of heat with longer heat cycle
- This is due to having more time the heat to conduct through the workpiece

Potencia vs tiempo: resultados de temperatura

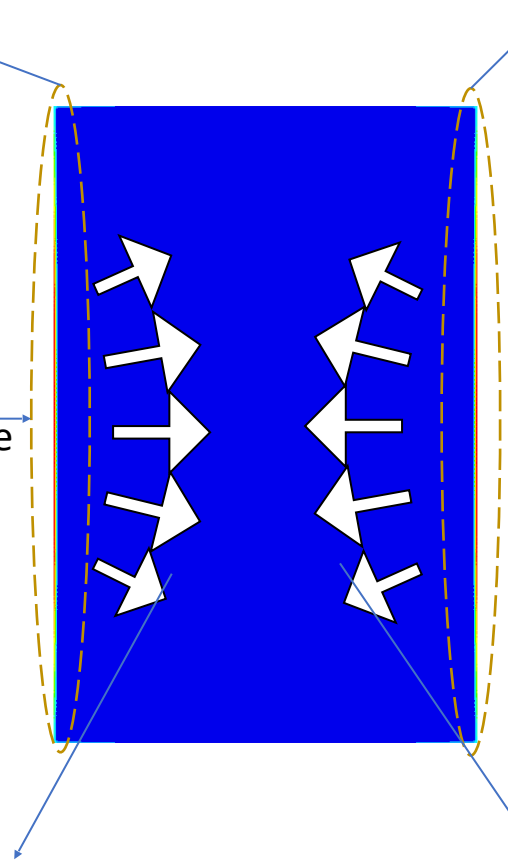
- Las imágenes y el gráfico muestran la distribución de la temperatura durante el ciclo de calor. Los resultados muestran una penetración más profunda del calor con un ciclo de calor más largo. Esto se debe a que el calor tiene más tiempo para conducir a través de la pieza de trabajo



Current Density

- Heat from induced current (induction) on the OD of the workpiece.

Current Density
Densidad de corriente



Densidad de corriente

- Calor generado por la corriente inducida (inducción) en el OD de la pieza de trabajo.

- The interior (center) of the workpiece is heated through conduction (soak)
- The longer the heat cycle, the more heat is allowed to soak through

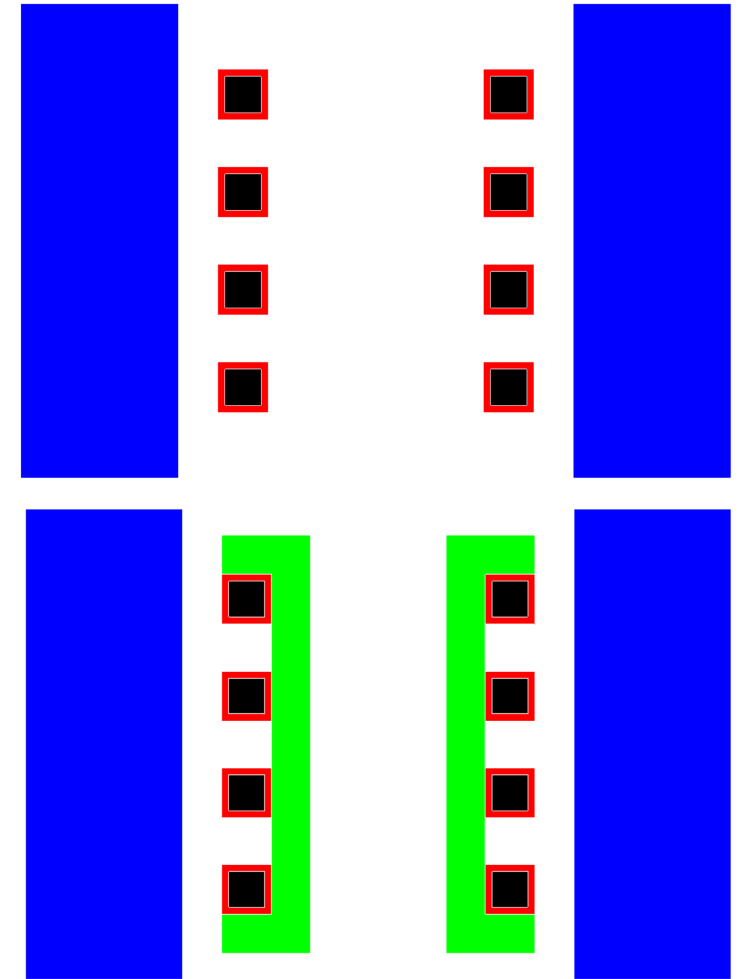
- El interior (centro) de la pieza de trabajo se calienta a través de la conducción (el interior de la pieza va absorbiendo el calor)
Cuanto más largo sea el ciclo de calor, más calor se deja absorber

Concentrator Use in ID Coils

- Concentrator use is common in induction heating application. It can be used to control the magnetic field for concentration and/or shielding
- Concentrator use in ID coils is very common
- The system above was modelled to compare two ID coils, one with concentrator and the other without concentrator
- Both cases were modelled at 10 kHz and the steel was heated so that the maximum temperature is 950 °C in 3 s

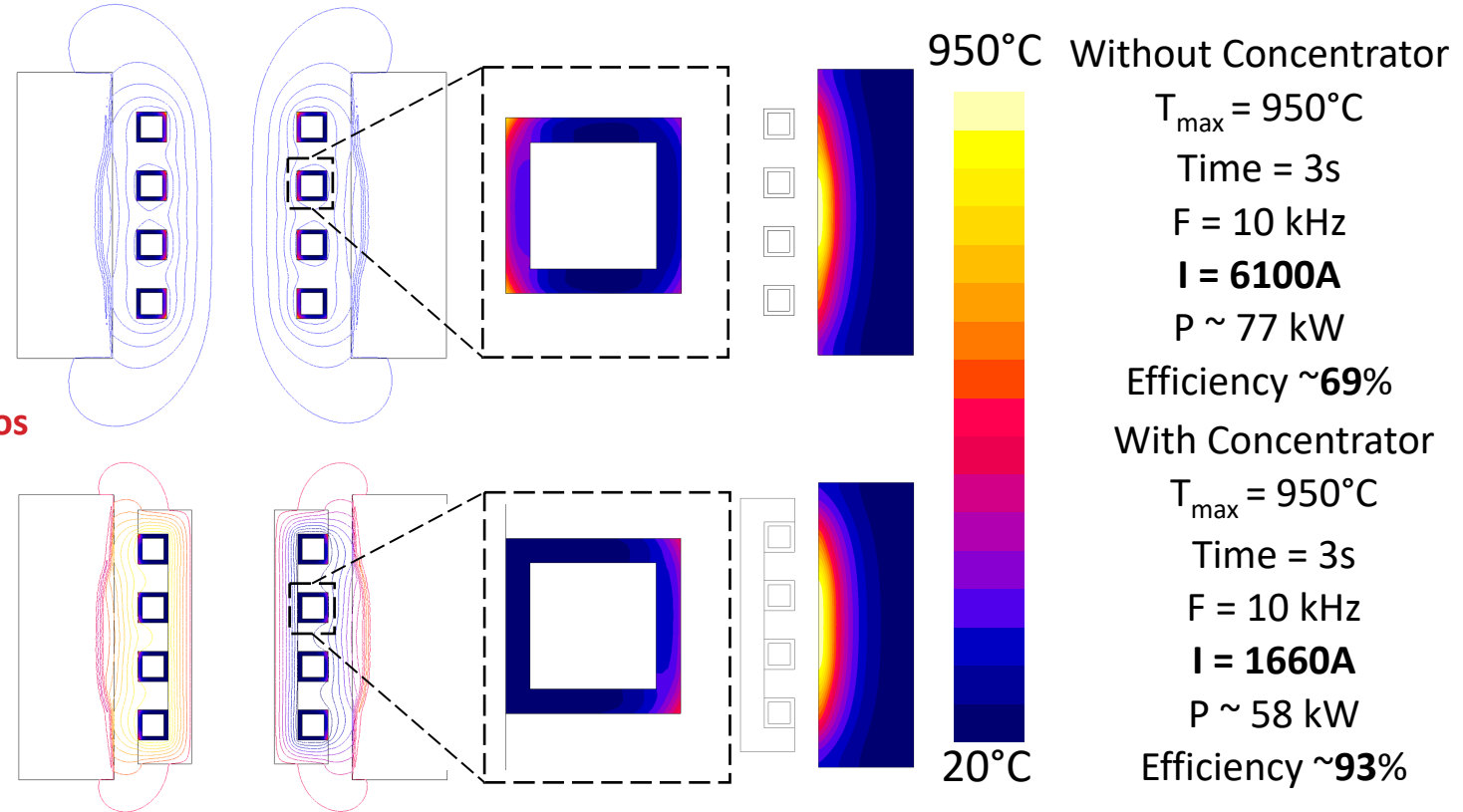
Uso del concentrador en bobinas de diámetro interno

- El uso del concentrador es común en la aplicación de calentamiento por inducción. Se puede utilizar para controlar el campo magnético para la concentración y o para aislarlo
- El uso del concentrador en bobinas de calentamiento interno (ID Coil) es muy común
- El sistema anterior se modeló para comparar dos bobinas ID, una con concentrador y la otra sin concentrador.
- Ambos casos se modelaron a 10 kHz y el acero se calentó de modo que la temperatura máxima es de 950 °C en 3 s



Concentrator Use in ID Coils: Results

- The use of concentrator for the ID Coils allows for the field to be concentrated
- It also provides a better path for the magnetic field at the center of the coil than air.
- current flows on the OD of the copper (closer to the steel)
- In this case, the concentrator use allows for a significant reduction in the current and a significant increase in the efficiency



Uso del concentrador en bobinas de diámetro interno: resultados

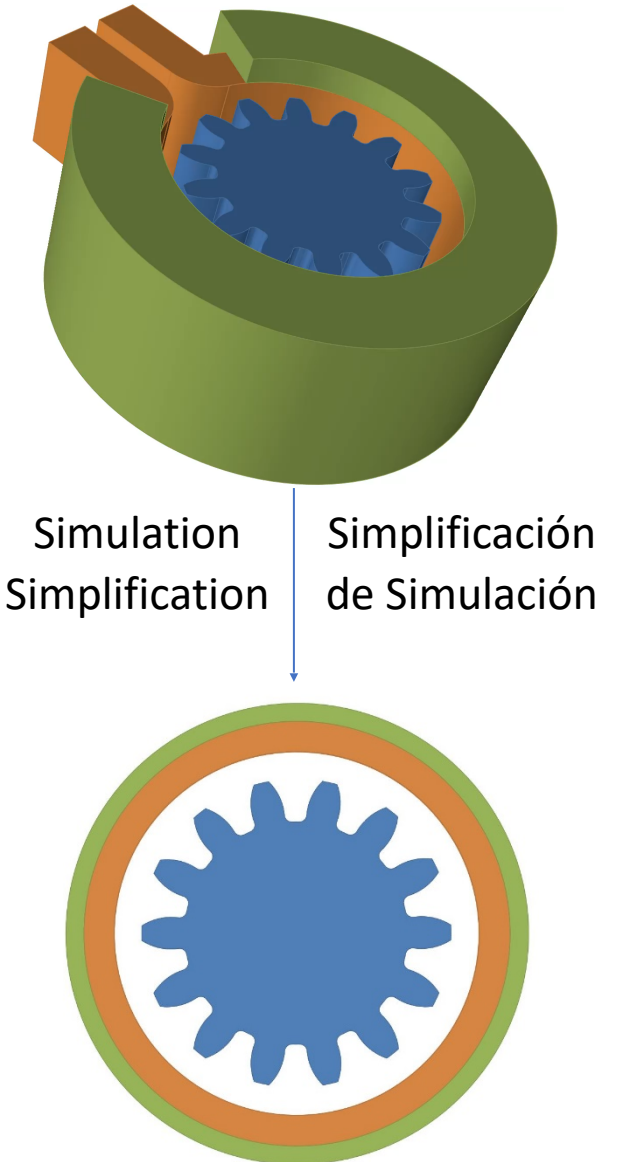
- El uso de concentrador para las bobinas ID permite concentrar el campo
 También proporciona un mejor camino para el campo magnético en el centro de la bobina que el aire.
 La corriente fluye en el diámetro externo del cobre (más cerca del acero)
 En este caso, el uso del concentrador permite una reducción significativa de la corriente y un aumento significativo de la eficiencia.

Gear Heating: Setup

- In typical applications workpiece rotation is used to minimize lead effects.
- The simulation assumes the coil wraps completely around the gear and neglects rotation.
- The simulation is also of a cross section and ignores end effects.
- The simulations are of two gear designs, both have the same OD.
- 1 kHz, 10 kHz, and 100 kHz were used.
- The maximum temperature was raised linearly from 20°C to 950°C in 1 s heat time.

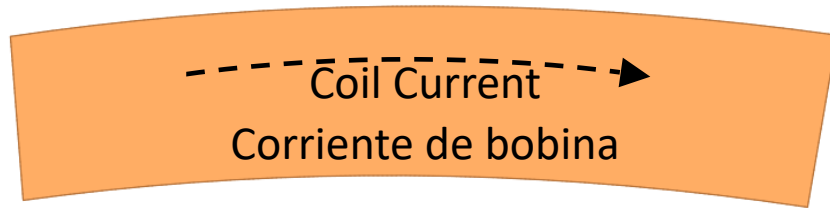
Calentamiento de engranajes: Configuración

- En situaciones típicas la rotación de la pieza de trabajo se utiliza para minimizar los efectos de poca uniformidad que están cerca de las terminales de la bobina.
En un proceso de simulación se asume que la bobina se envuelve completamente alrededor del engranaje y no toma en cuenta la rotación.
La simulación también es de una sección transversal.
Estas simulaciones son de dos diseños de engranajes, ambos tienen el mismo diámetro externo.
Se utilizaron 1 kHz, 10 kHz y 100 kHz.
La temperatura máxima se elevó linealmente de 20 ° C a 950 ° C en 1 seg, ciclo de calor.



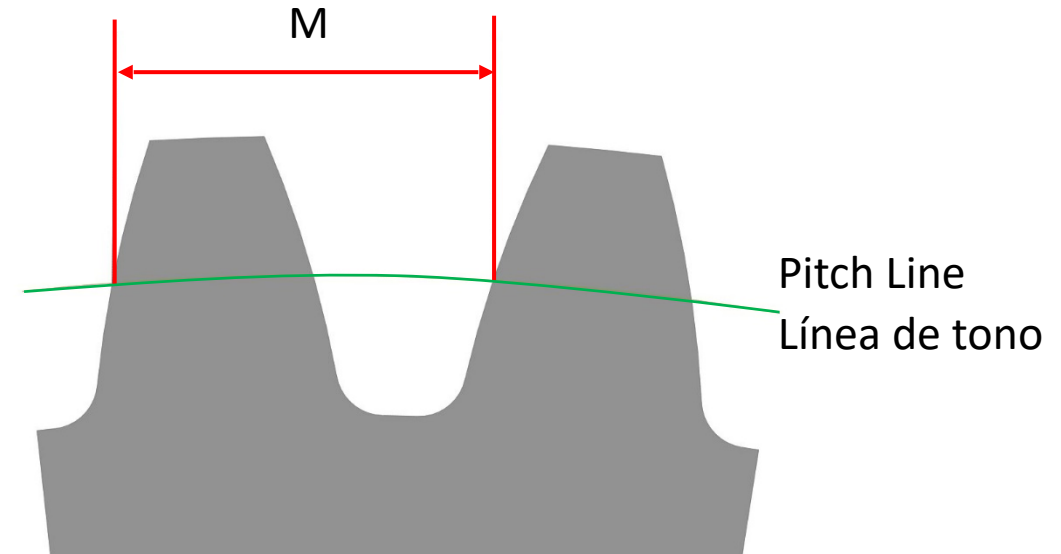
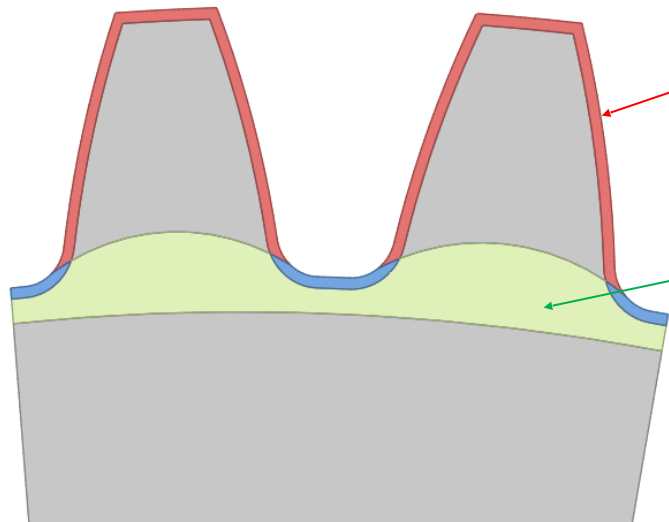
Gear Heating: Frequency Effect

Calentamiento de engranajes: efecto de frecuencia



High Frequency Current
 Corriente de alta frecuencia

Low Frequency Current
 Corriente de baja frecuencia



$$f_{\text{Optimal}} = K/M^2$$

M is gear module in mm
 K a factor depending on
 gear geometry and material.

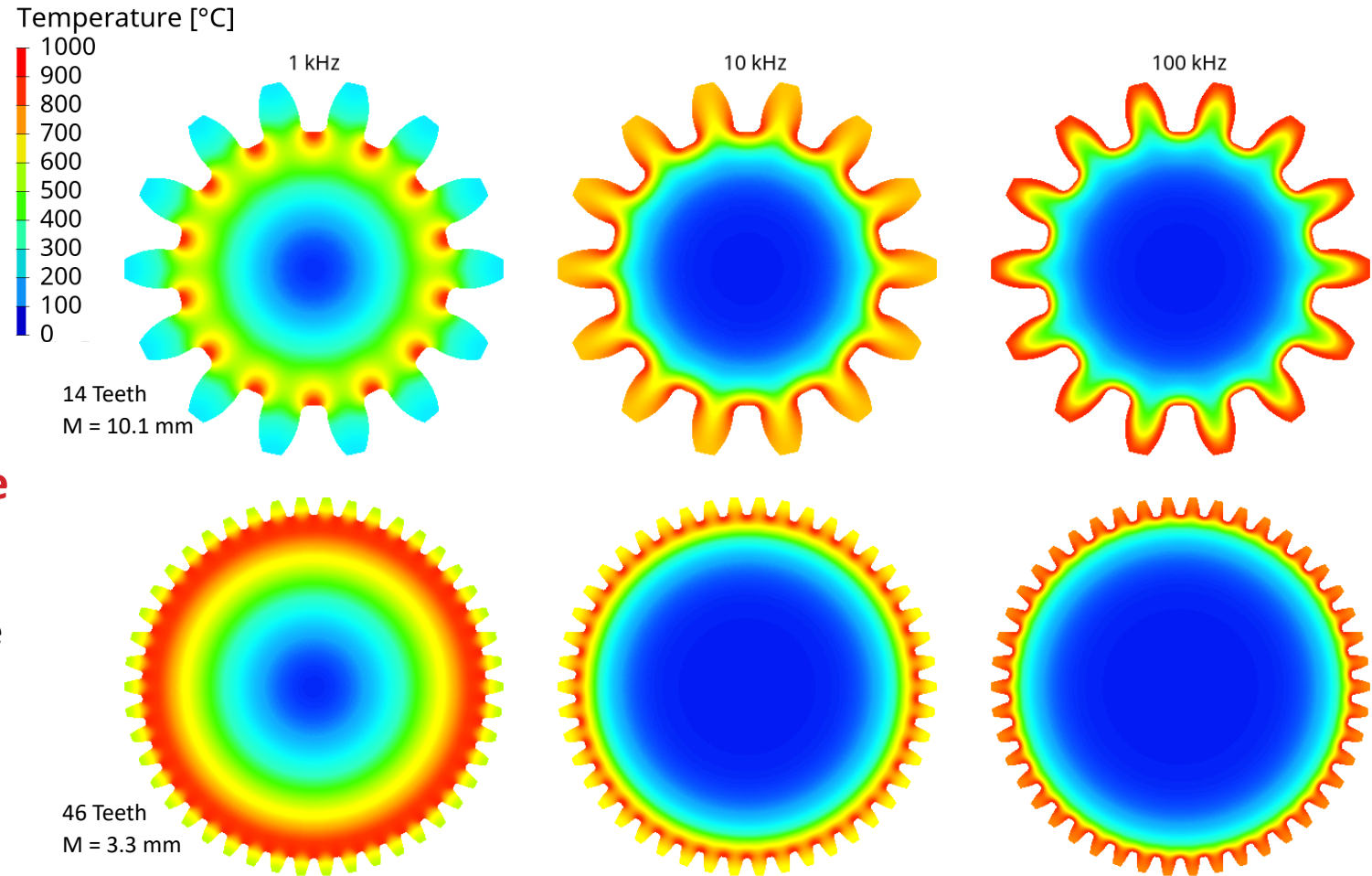
M es el módulo de engranajes en mm
 K un factor dependiendo de la
 geometría del engranaje y el material.

Gear Heating: Temperature Results

- The results show lower frequency results in more root heating than tooth heating, while higher frequency results in higher tooth heating
- The results also show the geometry has a great effect on current density distribution and final temperature
- In practice, it is common to use dual frequencies and other parameter control to achieve the desired results

Calentamiento de engranajes: resultados de temperatura

- Los resultados muestran que una frecuencia más baja da como resultado un mayor calentamiento en la base del engrane que el calentamiento de los dientes, mientras que una mayor frecuencia da como resultado un mayor calentamiento de los dientes. Los resultados también muestran que la geometría tiene un gran efecto en la distribución de la densidad de corriente y la temperatura final. En la práctica, es común utilizar frecuencias duales y otros controles de parámetros para lograr los resultados deseados.

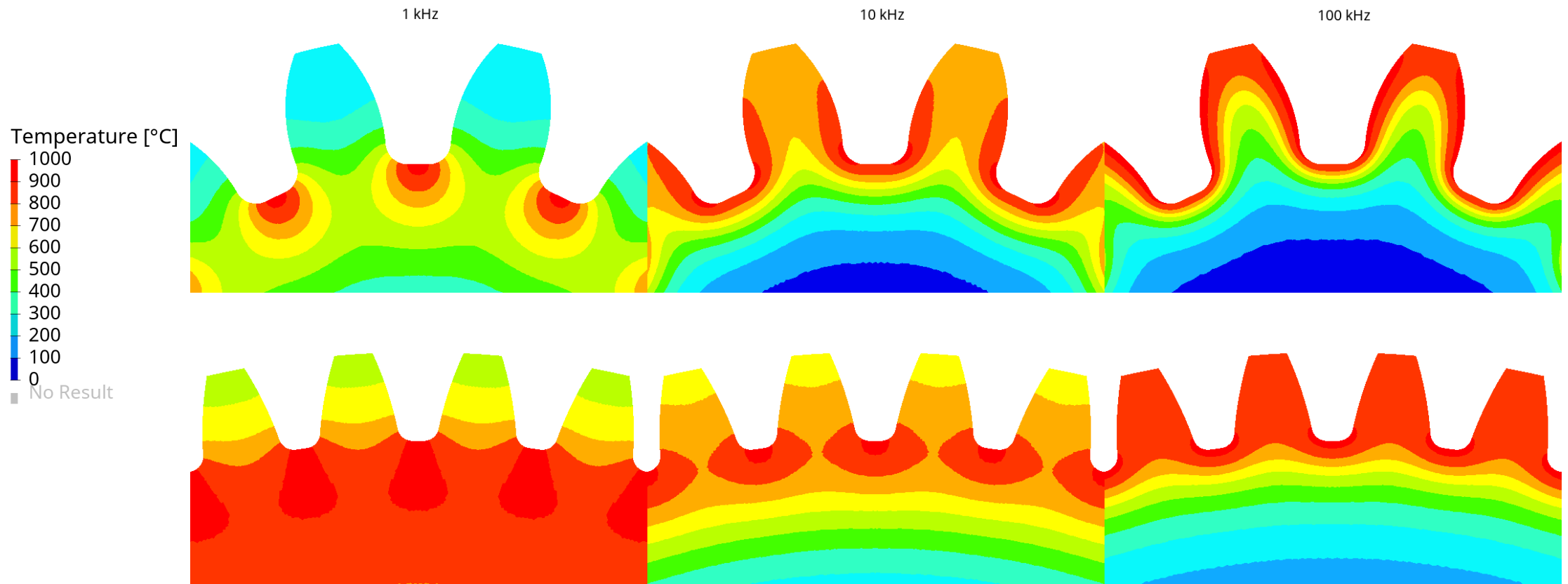


Gear Heating: Zoomed Temperature

- The pictures show zoomed in gear temperature

Calentamiento de engranajes: temperatura amplificada

- Las imágenes muestran una temperatura amplificada

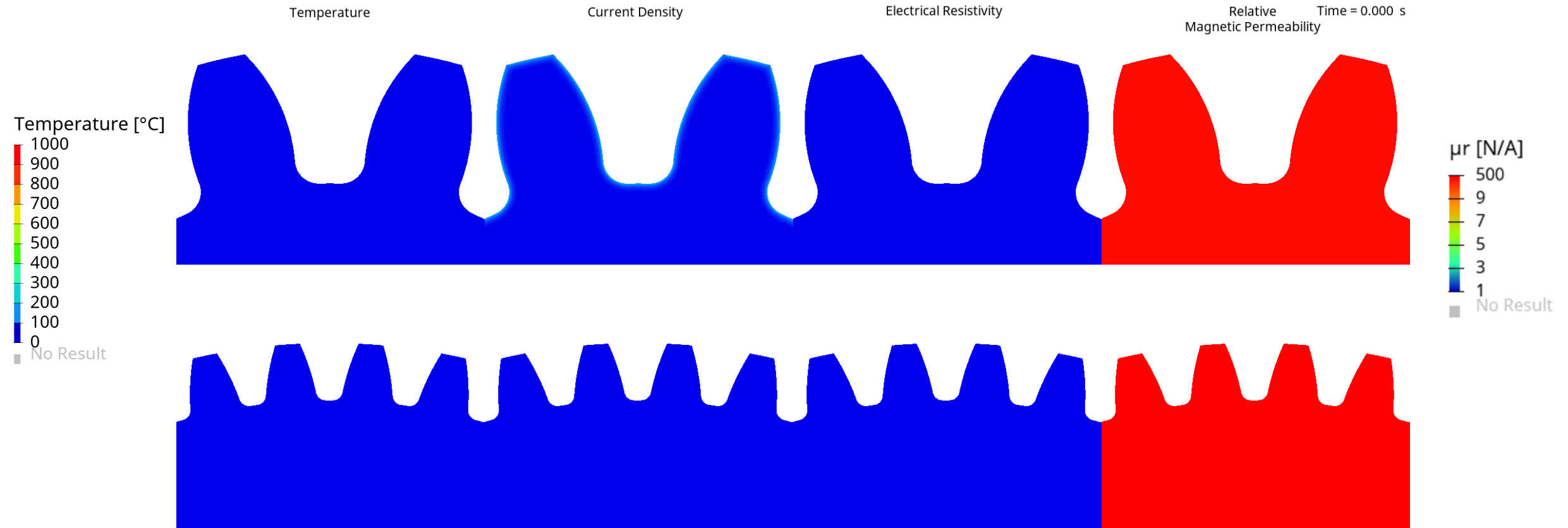


Parameter Change During Heat Cycle

- The results show how parameters change during the heat cycle for the 10 kHz example

Cambio de parámetros durante el ciclo de calor

- Los resultados muestran cómo cambian los parámetros durante el ciclo de calor para el ejemplo de 10 kHz



Example: Hairpin Coil

- The coil in the picture is built in two sections connected in series (same current).
- One section has concentrator, and the other section does not have concentrator
- The section with the heats the steel sheet more efficiently and rapidly than the section without the concentrator

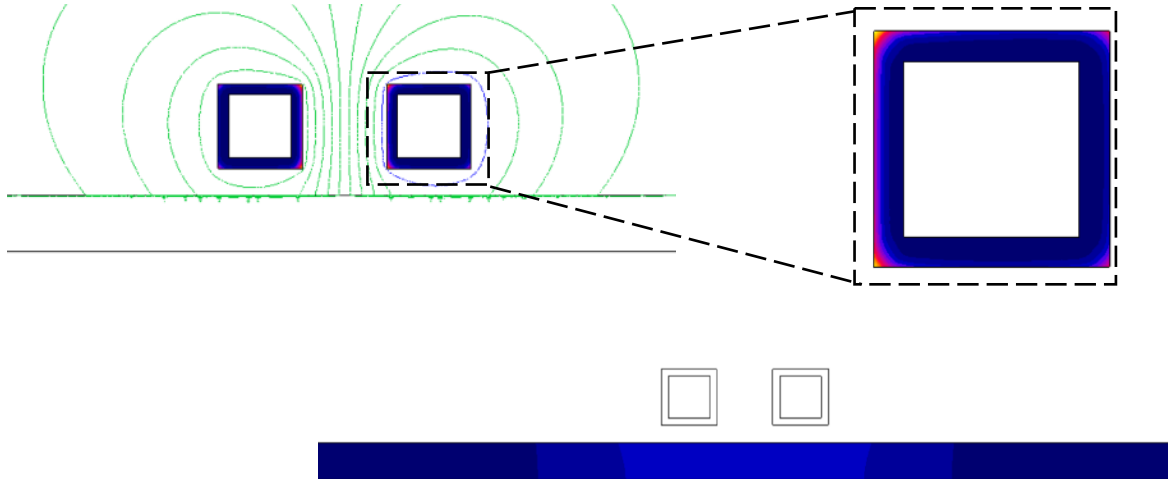
Ejemplo: bobina tipo Hairpin

- La bobina en la imagen está construida en dos secciones conectadas en serie (misma corriente). Una sección tiene concentrador y la otra sección no tiene concentrador
La sección con el calienta la chapa de acero de manera más eficiente y rápida que la sección sin el concentrador



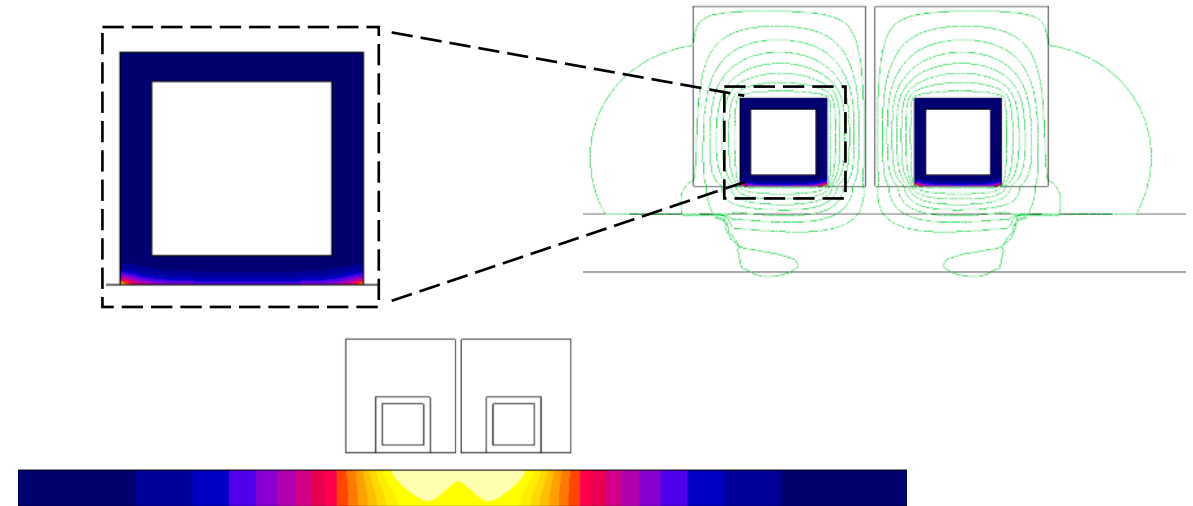
Hairpin Coil: 2D Simulation Results (Static)

- Concentrator creates a better path for the magnetic field
- This magnetic field forces current to flow on the face of the coil closer to the steel
- This shorted coupling gap allows for a greater temperature in the steel when using the same current



Bobina Hairpin: resultados de simulación 2D (estáticos)

- El concentrador crea un mejor camino para el campo magnético
 Este campo magnético obliga a la corriente a fluir en la cara de la bobina más cerca del acero.
 Este espacio de acoplamiento corto permite una mayor temperatura en el acero cuando se usa la misma corriente



20°C

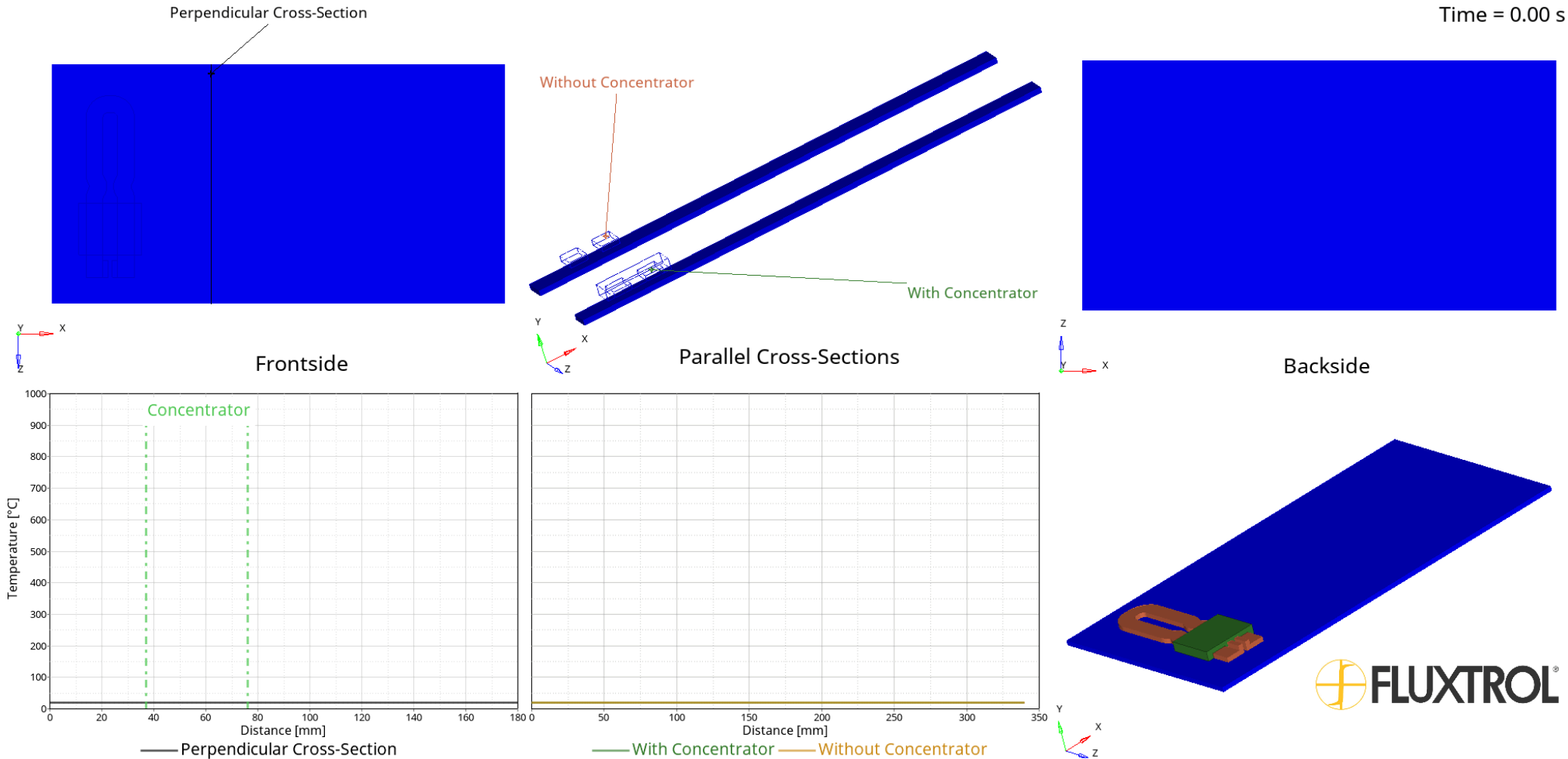
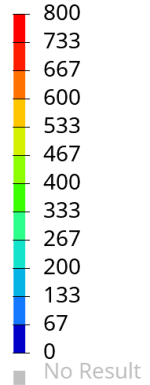
980°C

Hairpin Coil: 3D Simulation Results (Scanning)

Bobina Hairpin: resultados de simulación 3D (escaneo)

Time = 0.00 s

Temperature [°C]

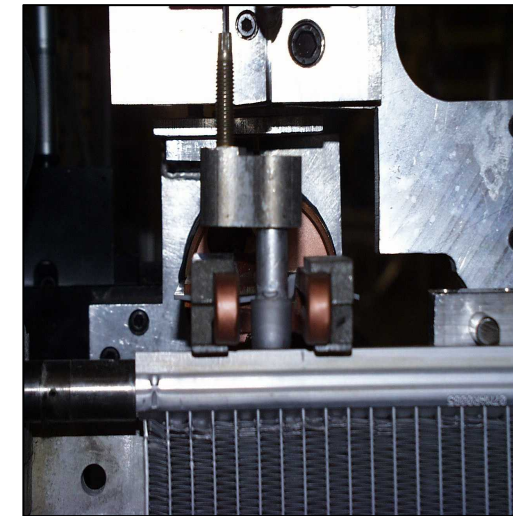
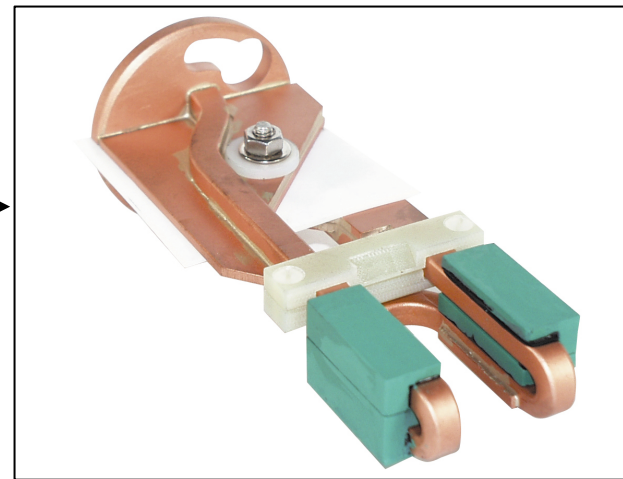
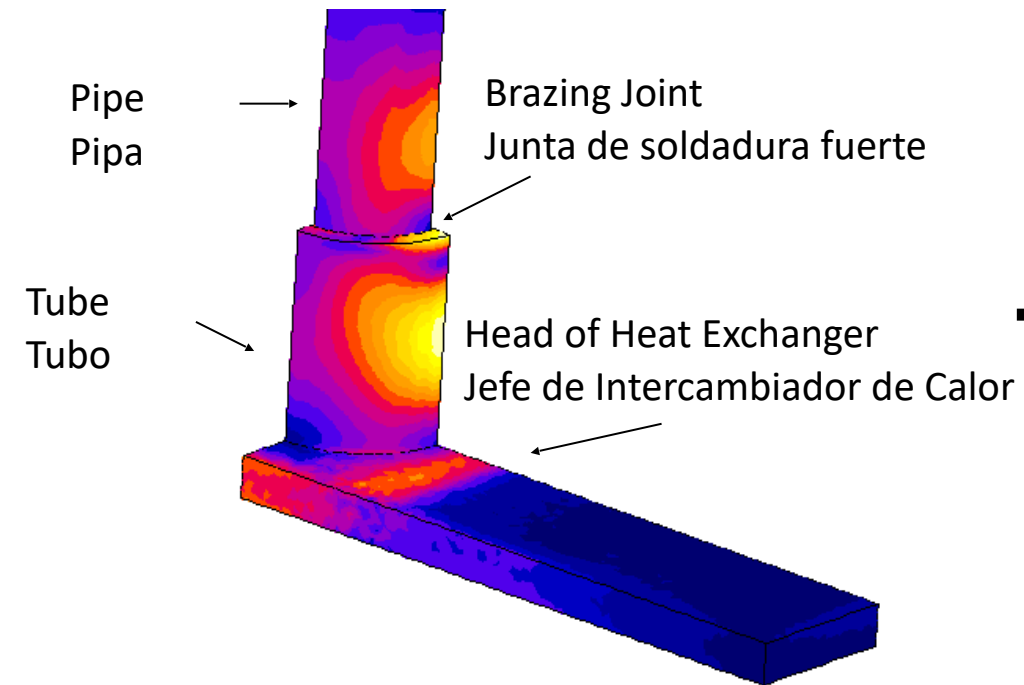


Example: Heat Exchanger Brazing

- Modelling different materials and more complex geometries is possible
- This example shows 3D modelling of induction heating an aluminum heat exchanger for brazing
- The results from the simulation are used to produce a coil and then testing

Ejemplo: soldadura fuerte del intercambiador de calor

- Es posible modelar diferentes materiales y geometrías más complejas
Este ejemplo muestra el modelado 3D del calentamiento por inducción de un intercambiador de calor de aluminio para soldadura fuerte
Los resultados de la simulación se utilizan para producir una bobina para después evaluarla



Conclusions

- Induction is a very versatile technology for heating
- Induction heating requires understanding and development
- Concentrator material is a very useful tool for controlling the heating and can be used to boost efficiency in induction heating applications
- Computer simulation is a powerful tool for understanding induction heating process
- Computer simulation is very useful for investigating different coil design and parameters
- Computer simulation can help reduce development time

Conclusiones

- La inducción es una tecnología muy versátil para el calentamiento
El calentamiento por inducción requiere comprensión y desarrollo
El material concentrador es una herramienta muy útil para controlar el calentamiento y se puede utilizar para aumentar la eficiencia en aplicaciones de calentamiento por inducción
La simulación por computadora es una herramienta poderosa para comprender el proceso de calentamiento por inducción
La simulación por computadora es muy útil para investigar diferentes diseños y parámetros de bobinas.
La simulación por computadora puede ayudar a reducir el tiempo de desarrollo

THANK YOU FOR YOUR TIME / GRACIAS POR SU TIEMPO

- We'd like to acknowledge and thank Fluxtrol Inc. and our colleagues for their help with preparing this presentation.
- Nuestro Agradecimiento y reconocimiento para Fluxtrol Inc. y para nuestros colegas por su ayuda en la elaboración de esta presentación.

Sean Muyskens , smmuyskens@fluxtrol.com

Ricardo Diaz , rjdiaz@fluxtrol.com

