

PARÁMETROS TERMODINÁMICOS DEL  
ENFRIAMIENTO POR CENTRIFUGACIÓN  
PARA EL ACERO AISI D2

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN  
AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Autor: Ever Michel Lobaina Jimenez

Tutor: M.Sc. Gilberto Israel Gurrí Villafruela

HOLGUÍN 2021



## RESUMEN

En la presente investigación se realiza un estudio de los procesos básicos de tratamientos térmicos empleados en los aceros para herramientas, atendiendo de forma particular los diferentes parámetros según las condiciones de enfriamiento que surgen dentro de la cámara de enfriamiento durante el enfrentamiento por centrifugación. Se muestran los resultados del análisis de determinados parámetros termodinámicos en el sistema de enfriamiento por centrifugación del acero para herramienta AISI D2. Para el desarrollo de la investigación se utilizan métodos teóricos como el análisis-síntesis; histórico-lógico; la inducción-deducción; análisis documental; además se muestra el estudio realizado al proceso de enfriamiento de las herramientas empleando el método de elementos finitos (FEM) a través del software CAD SolidWorks 2016, mediante el cual se predicen los resultados de las posibles formaciones estructurales de la realización del análisis térmico del proceso de enfriamiento de las herramientas aplicando el análisis de elementos finitos (FEA) y del comportamiento dinámico del flujo de enfriamiento empleando el módulo de Flow Simulation CFD y MEF.

Dicha investigación responde a las demandas y necesidades sociales económicas y ambientales de la industria en nuestro país.

**Palabras Claves:** parámetros termodinámicos; enfriamiento por centrifugación; tratamiento térmico, acero.



## ABSTRACT

In this research, a study of the basic processes of heat treatments used in tool steels is carried out, paying particular attention to the different parameters according to the cooling conditions that arise within the cooling chamber during the centrifugation confrontation. The results of the analysis of certain thermodynamic parameters in the centrifugal cooling system of AISI D2 tool steel are shown. Theoretical methods such as analysis-synthesis are used for the development of research; historical-logical; induction-deduction; documentary analysis; In addition, the study carried out to the cooling process of the tools is shown using the finite element method (FEM) through the CAD SolidWorks 2016 software, through which the results of the possible structural formations of the thermal analysis of the process are predicted. cooling of the tools applying finite element analysis (FEA) and of the dynamic behavior of the cooling flow using the Flow Simulation CFD and MEF module.

This research responds to the demands and social, economic and environmental needs of the industry in our country.

**Keywords:** thermodynamic parameters; centrifugal cooling; heat treatment, steel.



## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ENFRIAMIENTO POR CENTRIFUGACION Y SUS PARÁMETROS TERMODINÁMICOS</b> .....	6
1.1. Caracterización de la empresa.....	6
1.2. El enfriamiento por centrifugación. Un nuevo método de enfriamiento en los tratamientos térmicos.....	7
1.3. Mecanismo de transferencia de calor. ....	12
1.4. Parámetros termodinámicos del sistema de enfriamiento por centrifugación del acero para herramienta AISI D2 .....	15
1.5. Software CAD para la modelación de las variantes de enfriamiento. ....	21
<b>CAPÍTULO II. PARÁMETROS TERMODINÁMICOS DEL ENFRIAMIENTO POR CENTRIFUGACIÓN</b> . ....	24
2.1. Estudios del fluido durante el proceso del enfriamiento por centrifugación. ...	24
2.2. Determinación de los coeficientes termodinámicos del proceso de enfriamiento por centrifugación.....	31
<b>CONCLUSIONES</b> . ....	35
<b>RECOMENDACIONES</b> . ....	36
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	37



## INTRODUCCIÓN

La presente investigación aborda una temática de gran importancia para el estudio de los procesos básicos de tratamientos térmicos, atendiendo de forma particular los diferentes parámetros según las condiciones de enfriamiento que surgen dentro de la cámara del enfriamiento.

La importancia de este aspecto, supone una comprensión de los fenómenos socioeconómicos, presentes en los proyectos, acciones y procesos dirigidos al desarrollo social, principalmente a escala local y comunitaria.

La motivación principal que lleva a considerar substancial este estudio es la posibilidad de realizar un análisis de las condiciones del enfriamiento que surgen en la cámara del enfriamiento debido a que son totalmente desconocidas, además de los insuficientes antecedentes teóricos que den tratamiento a dicha temática.

Entre los principales referentes teóricos que sustentan la investigación se encuentran los siguientes: Patiño y Rosero, 2016; Castellanos y Montesino, 2007; Martín, 2011; Corace, 2009.

En la Universidad de Holguín se han incursionado estudios relacionados con el tema tales como: Gurri Villafruela G.I, P. R. (2019). Temple por centrifugación para el acero AISI D2 a bajas temperaturas de austenización. Universidad de Holguín. Holguín; Gurri Villafruela G.I. (2014). Influencia del temple por centrifugación sobre la dureza del acero para herramientas D2. Tesis de Maestría, Universidad de Holguín, Ingeniería Mecánica y Viada R.(2020). Análisis de la influencia del enfriamiento en las herramientas para conformar en frío basado en CFD y FEM. Tesis presentada en opción al título de ingeniero mecánico. Universidad de Holguín. Holguín.

El marco teórico del estudio se sustenta por los diferentes procesos básicos de los tratamientos térmicos.

Los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita; la naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero. El temple es el enfriamiento rápido del acero



desde una temperatura elevada. El agua, aceites, soluciones salinas, sales fundidas, aire y otros constituyen medios de enfriamiento empleados en el temple de los aceros (Patiño & Rosero, 2016).

Los sistemas de enfriamientos de los tratamientos térmicos son sistemas complejos. Debido a su complejidad varios investigadores entre ellos, Gurri Villafruela, han introducidos nuevos medios y sistemas de enfriamientos los cuales son nuevos dentro de la teoría de los tratamientos térmicos.

El ingeniero Alaor partiendo de este sistema realizó un estudio comparativo entre la nueva tecnología propuesta por Gurri Villafruela, 2008 y los métodos tradicionales de enfriamiento durante el temple de las herramientas fabricadas de acero AISI D2, o sea, el enfriamiento en aceite, por convección natural, convección forzada laminar y una nueva forma de enfriamiento por centrifugación. Persiguió como objetivo evaluar el comportamiento de sus variables durante este proceso donde arribó a la conclusión de que el sistema de enfriamiento por centrifugación puede sustituir a los aceites industriales (aceites muy costosos para nuestro país) durante el enfriamiento de estos aceros (Viada, 2020).

Para realizar este estudio se emplearon tres ecuaciones fundamentales.

1. Mecanismos de transferencia de calor.
2. Ley de enfriamiento de Newton.
3. Ley de Stefan Boltzmann.

La ciencia de la transferencia de calor complementa los principios primero y segundo de la termodinámica debido a que proporciona reglas experimentales adicionales que se pueden utilizar para establecer la rapidez o la velocidad de la transferencia de energía, o sea que, no sólo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino también trata de predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio bajo ciertas condiciones especificadas. El hecho de que un régimen de transferencia de calor sea el objetivo deseado de un análisis, señala la diferencia entre la transferencia de calor y la termodinámica (Castellanos & Montesino, 2007).



El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, radiación y convección. Todas las formas de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren desde el medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

La conducción de calor puede ser estacionaria o transitoria, siendo estacionaria cuando no existe variación en el campo de temperaturas con el tiempo, o sea, cuando la temperatura de un mismo punto del cuerpo sólido se mantiene constante en todo el intervalo de tiempo, si ocurre lo contrario entonces es transitoria.

La radiación es el único medio de transmisión del calor cuando esta tiene lugar a través del vacío, aire y puede ser muy importante para altas temperaturas. Esta energía se produce por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas y transportadas por ondas electromagnéticas o fotones, por lo que recibe el nombre de radiación electromagnética.

Partiendo de lo antes expuesto la presente investigación muestra el estudio realizado al proceso de tratamiento térmico de las herramientas durante el enfriamiento por centrifugación empleando el método de elementos finitos (FEM), mediante el cual se predicen los resultados del proceso por medio de la realización del análisis térmico, así como, el comportamiento dinámico del flujo de enfriamiento empleando el módulo de Flow Simulation a través del software CAD SolidWorks 2016.

Teniendo en cuenta las particularidades de dicho proceso se identifica el siguiente **problema de investigación**: En la actualidad se desconocen determinados parámetros termodinámicos en el sistema de enfriamiento por centrifugación del acero para herramientas AISI D2.

**Objeto de estudio**: Sistema de enfriamiento por centrifugación.

**Campo de estudio**: Los parámetros termodinámicos del enfriamiento por centrifugación del acero para herramientas AISI D2 empleando CFD y FEM.



**Hipótesis:** Si se determinan los parámetros termodinámicos durante el enfriamiento del acero para herramientas AISI D2 se podrá conocer el comportamiento del sistema de enfriamiento por centrifugación.

**Objetivo general:** Determinar los parámetros termodinámicos del enfriamiento por centrifugación durante el enfriamiento del acero para herramientas AISI D2 para la temperatura de austenización de 1080 °C y frecuencias de rotación de 8,33 s<sup>-1</sup>, 16,67 s<sup>-1</sup> y 25 s<sup>-1</sup>.

**Tareas de investigación:**

1. Fundamentar los referentes teóricos-metodológicos que sustentan el estudio de los sistemas de enfriamientos en los tratamientos térmicos.
2. Determinar los parámetros termodinámicos del sistema de enfriamiento por centrifugación del acero para herramientas AISI D2.
  - Número de Reynolds.
  - Número de Nusselt.
  - Número de Prandtl.
  - Coeficiente de Grossman.
  - Coeficiente de transmisión de calor.
  - Coeficiente de transferencia de calor por convección.
3. Describir la influencia de los coeficientes determinados durante el enfriamiento.

**Métodos teóricos:**

**Histórico – lógico:** fue utilizado para distinguir los antecedentes y fundamentos teóricos de la investigación al encontrarse resultados relevantes a nivel nacional e internacional.

**Análisis – síntesis:** permitió dar cumplimiento a las tareas al seguir la lógica de la investigación.

**Inducción – deducción:** utilizado en la investigación de otros casos de estudios relacionados con el tema, facilita la identificación de aspectos generales que permiten la formulación del análisis teórico.

**Métodos empíricos:**

**Empíricos:**



**Consultas a expertos:** permite que la investigación se sustente, además, en conocimientos de especialistas acerca de la temática de investigación.

**Análisis documental:** utilizado en la búsqueda de información de estudios relacionados con el tema de la investigación, antecedentes y estado actual.

**CFD y MEF:** para simular el enfriamiento de las herramientas de troquelado en frío fabricadas del acero AISI D2.

### **Resultados esperados**

Con la realización de la presente investigación se podrá determinar el comportamiento termodinámico del sistema de enfriamiento por centrifugación de las herramientas de troquelado en frío fabricadas del acero AISI D2.



## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ENFRIAMIENTO POR CENTRIFUGACION Y SUS PARÁMETROS TERMODINÁMICOS.

En el capítulo I se aborda los aspectos conceptuales más importantes asociados al enfriamiento por centrifugación, los mecanismos de transferencia de calor, medios de enfriamientos; así como los diferentes parámetros termodinámicos.

### 1.1. Caracterización de la empresa

En enero del año 2017 se recibe la Resolución No. 118 de fecha 29 de diciembre del 2016 del ministro de las FAR, donde dispone en su resuelvo primero dejar de cumplir las misión y funciones en tiempo de paz y que las reparaciones del material de guerra que se hacían en la misma, se realicen en lo adelante en la Empresa Militar Industrial “Desembarco del Granma” subordinado a la Unión de Industrias Militares.

Desde esta fecha hasta el mes de Agosto de ese propio año, se realizaron todas las actividades previstas para el cumplimiento de los establecido en dicha resolución; creándose por la Resolución 12 del 22 de Junio del 2017 del Director General EMI “Desembarco del Granma” la Unidad Empresarial de Base de Aguas Claras, con domicilio Legal en Calle 15 No.3, entre 12 y 24 Aguas Claras, Holguín, donde se fusionan las UM 2847 (Taller Integral Logística EO), UM 1008 (Unidad Técnica de Combustible) y parte de la plantilla de la UM 2966 (Taller Integral Ingeniería), efectuándose el traspaso oficial el 24 de Agosto del 2017, presidido por el Vice Ministro General de Cuerpo Ejército Ramón Espinosa Martín.

En el año 2018 según en la Resolución No. 24 del 23 de marzo del 2018 del ministro de las Fuerzas Armadas Revolucionarias, se establece el traspaso de los Talleres Integrales de las Regiones Militares a la EMI “Desembarco del Granma”, los cuales se recibieron y han sido atendidos en su capacitación y funcionamiento por la Dirección de la UEB “Aguas Claras”.

La Empresa Militar Industrial “Aseguramiento Técnico a las Territorial de Oriente”, integrada a la OSDE Unión de Industria Militar, con domicilio legal Calle 15 No.3, entre 12 y 24 Aguas Claras, provincia de Holguín, tiene el siguiente **objeto social:**



1. Comprobación, mantenimiento, restablecimiento de parámetros, reparación, modernización, y comercialización de medios de transporte y blindados.
2. Desactivación de la técnica de transporte y equipos blindados, comercializando las partes, piezas, agregados y materias primas provenientes de esta.
3. Fabricación y comercialización de producciones varias para las ramas automotrices, mecánica, química y la industria en general.
4. Comercialización de productos, recursos de los inventarios propios y los excedentes de su proceso productivo, además los productos por otras UEB de la EMI DG y de otras entidades de la UIM y la economía.
5. Servicios de investigación-desarrollo solicitados por sus clientes en el marco de las actividades autorizadas.

#### **De carácter específico**

1. Organizar, planificar y ejecutar el proceso de aseguramiento técnico hasta su comercialización y entrega al cliente final, tanto en sus talleres como en la sede del cliente.
2. Responder por la calidad de las producciones y servicios, garantizando el nivel de competitividad y presencia en el escenario económico.
3. Por los motivos argumentados anteriormente, se desarrollaron las siguientes propuestas en aras de aportar y resolver con soluciones de ingeniería un problema técnico con repercusión social, económica y de la seguridad nacional.

#### **1.2. El enfriamiento por centrifugación. Un nuevo método de enfriamiento en los tratamientos térmicos.**

El tratamiento térmico se define como el modo de mejorar la resistencia, ductilidad, dureza y algunas otras propiedades de los metales, a aquellos procesos que involucran temperatura, es decir, es la operación de calentamiento o enfriamiento de un metal en su estado sólido a temperaturas y condiciones determinadas para mejorar sus propiedades mecánicas (Becerra; Aguilar; Bernardino & Santana, 2021).

Es por ello que el tratamiento térmico involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios estructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas, teniendo en cuenta el aspecto anterior



podemos concluir que el objetivo de los tratamientos térmicos es proporcionar a los materiales propiedades específicas adecuadas para su conformación o uso final. Esto no modifica la composición química de los materiales, pero si otros factores tales como los constituyentes estructurales y la granulometría, y como consecuencia las propiedades mecánicas.

Se pueden realizar Tratamientos Térmicos sobre una parte o la totalidad de la pieza en uno o varios pasos de la secuencia de manufactura. En algunos casos, el tratamiento se aplica antes del proceso de formado (recocido para ablandar el metal y ayudar a formarlo más fácilmente mientras se encuentra caliente). En otros casos, se usa para aliviar los efectos del endurecimiento por deformación. Finalmente, se puede realizar al final de la secuencia de manufactura para lograr resistencia y dureza (Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”, 2008).

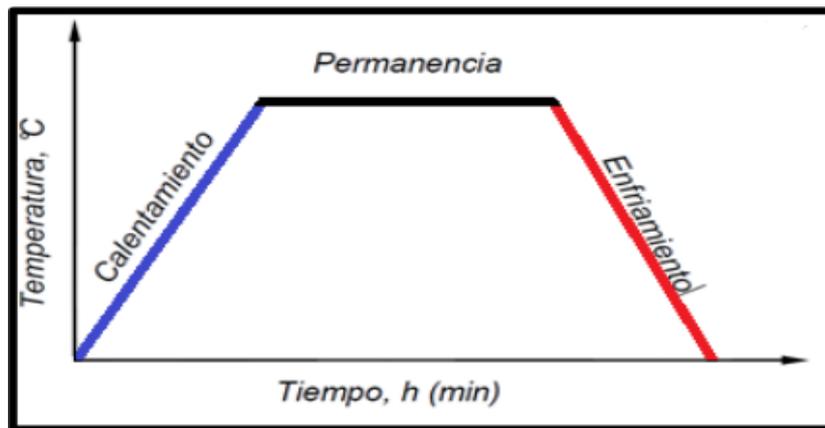
### **Etapas del tratamiento térmico**

Un tratamiento térmico se determina en tres etapas fundamentales, el calentamiento hasta la temperatura fijada, calentamiento hasta la temperatura fijada, permanencia a la temperatura fijada y enfriamiento.

1. **Calentamiento hasta la temperatura fijada:** La elevación de temperatura debe ser uniforme en la pieza.
2. **Permanencia a la temperatura fijada:** Su fin es la completa transformación del constituyente estructural de partida. Puede considerarse suficiente una permanencia de unos 2 minutos por milímetro de espesor.
3. **Enfriamiento:** Este enfriamiento tiene que ser rigurosamente controlado en función del tipo de tratamiento que se realice.



**Figura 1.** Representación de un tratamiento térmico.



**Fuente:** Mejía. A. (2016). Diseño y construcción de una máquina de ensayo jominy de templabilidad para la carrera de ingeniería en mecatrónica de la universidad técnica del norte.

### **Tipos de tratamientos térmicos**

Existen varios tipos de tratamientos térmicos entre los fundamentales podemos mencionar: Recocido, Temple y Revenido. Los mismos poseen características fundamentales entre las que podemos mencionar.

**Recocido:** Es un tratamiento térmico que normalmente consiste en calentar un material metálico a temperatura elevada durante largo tiempo, con objeto de bajar la densidad de dislocaciones y, de esta manera, impartir ductilidad.

El recocido se realiza principalmente para.

- Alterar la estructura del material para obtener las propiedades mecánicas deseadas, ablandando el metal y mejorando su maquinabilidad.
- Recristalizar los metales trabajados en frío.
- Para aliviar los esfuerzos residuales.

Las operaciones de Recocido se ejecutan algunas veces con el único propósito de aliviar los esfuerzos residuales en la pieza de trabajo causadas por los procesos de formado previo. Este tratamiento es conocido como recocido para alivio de esfuerzos, este ayuda a reducir la distorsión y las variaciones dimensionales que pueden resultar de otra manera en las partes que fueron sometidas a esfuerzos. Se debe tener en cuenta que el recocido no proporciona generalmente las características más adecuadas para la utilización del acero.



Por lo general, al material se le realiza un tratamiento posterior con el objetivo de obtener las características óptimas deseadas.

**Temple:** Este un tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la dureza y resistencia mecánica del material, transformando toda la masa en austenita con el calentamiento y después, por medio de un enfriamiento brusco (con aceites, agua o salmuera), se convierte en martensita, que es el constituyente duro típico de los aceros templados. Es importante la fase de enfriamiento y la velocidad alta del mismo, además, la temperatura para el calentamiento óptimo debe ser siempre superior a la crítica para poder obtener de esta forma la martensita. Existen varios tipos de temple, clasificados en función del resultado que se quiera obtener y en función de la propiedad que presentan casi todos los aceros.

**Revenido:** El Revenido es un tratamiento complementario del temple. Después del temple, los aceros suelen quedar demasiados duros y frágiles para los usos a los cuales están destinados. Lo anterior se puede corregir con el proceso de revenido, que disminuye la dureza y la fragilidad excesiva, sin perder demasiada tenacidad. Durante el revenido, se forma una mezcla íntima de ferrita y cementita a partir de la martensita. Este consiste en calentar el acero, (después de haberle realizado un temple o un normalizado) a una temperatura inferior al punto crítico (o temperatura de recristalización), seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretende resultados altos en tenacidad, o lentos, cuando se pretende reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones. Con la realización de este proceso no se eliminan los efectos del temple, solo se modifican, ya que se consigue disminuir la dureza y tensiones internas para lograr de esta manera aumentar la tenacidad (Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”,2008).

Mediante la utilización de diferentes medios, se ha logrado la variación de la velocidad de enfriamiento, los que han evolucionado en la medida en que se desarrolla la ciencia y la técnica, en 1999 Caballero y Figueroa realizaron un estudio donde exponen los medios esenciales de enfriamiento para el temple:

**Agua:** Debe evitarse que el agua se caliente durante el temple, debido a que puede prolongarse la primera etapa del enfriamiento. El agua enfría muy



rápidamente la superficie, con lo que se forma una corteza muy dura y se crean tensiones internas peligrosas que pueden deformar o romper las piezas.

**Soluciones salinas:** Añadiendo al agua una determinada cantidad de sales de temple, el enfriamiento es más rápido y por lo tanto más energético, debido no solo al mayor calor específico de las soluciones respecto al agua pura, sino también porque debido a la evaporación, las soluciones salinas cristalizan y sus cristales, dada las altas temperaturas estallan rompiendo el velo de vapor que circunda la pieza.

**Aceites:** Los aceites animales y vegetales con el uso continuo a determinada temperatura se descomponen, espesan y se vuelven gomosos dando temple bastante irregulares. Además, son caros y de olor desagradable. Los mejores aceites para el temple son los minerales obtenidos por destilación fraccionada del petróleo. El aceite caliente tiene más poder refrigerante (30 – 40 °C) que el frío, por ser más fluido.

Este tipo de temple produce deformaciones y tensiones internas notablemente inferiores a los del agua y soluciones salinas. Un buen aceite de temple debe poseer las propiedades siguientes:

- Volatilidad no muy elevada.
- Temperatura de inflamación y combustión lo más elevada posible.
- Gran resistencia a la oxidación.

**Sales fundidas:** Están constituidas por cantidades variables de sodio, potasio, bario, etc., en forma de cianuros y sus componentes. Son utilizados como medios de enfriamiento y sustituyen con ventaja al aceite y al plomo fundido.

Las sales se emplean en un intervalo de temperaturas entre 150 - 600°C. Se utilizan para enfriar la pieza durante el temple y para calentar durante el revenido. También presentan muy alta temperatura de transición. Con respecto a la severidad de temple, se comportan muy semejante al aceite pudiendo considerarse los efectos equivalentes. La agitación aumenta la severidad de temple por la difusión del calor.

**Gases:** Para muchos aceros basta enfriar al aire tranquilo para que se forme martensita. Aunque este tipo de enfriamiento es el que provoca menos



distorsiones, también como contrapartida produce cierta oxidación superficial en lugar de aire pueden usarse gases protectores o inertes.

Para obtener los resultados esperados después del temple, es indispensable emplear un medio de enfriamiento apropiado. Además del agua, aceites, sales y metales fundidos, en la actualidad la tendencia mundial es la de emplear soluciones acuosas con diferentes compuestos orgánicos, soluciones de aceites con diferentes aditivos y también emplear procedimientos de temple más eficaces mediante transformaciones a los métodos comúnmente empleados.

### **1.3. Mecanismo de transferencia de calor.**

Cuando existe un desnivel de temperaturas en un sistema o cuando dos sistemas a diferentes temperaturas se ponen en contacto se transfiere energía. El proceso mediante el cual tiene lugar este transporte de energía se conoce como transmisión de calor. Lo que transmite calor no puede ser medido ni observable directamente; pero sus efectos, preferentemente variaciones de energía interna, permiten su medida.

De acuerdo a los conceptos de la termodinámica, siempre que existe una diferencia de temperatura en el universo, la transferencia de calor se realiza desde los cuerpos de temperatura más elevada a los cuerpos más fríos, esta energía transmitida se denomina calor. Las leyes de la Termodinámica tratan de la transferencia de energía, pero siempre se refieren a sistemas que están en equilibrio, y solo pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para cambiar un sistema de un estado de equilibrio a otro (Castellanos & Montesino, 2007). Por ello podemos decir que la transferencia de calor se refiere al intercambio de energía entre cuerpos que se encuentran a diferente temperatura en un sistema determinado.

A través de la transferencia de calor, se complementan los principios termodinámicos, los mismos proporcionan métodos de análisis que permiten predecir la velocidad de transferencia térmica. Por ello es necesario considerar para realizar un análisis completo de la transferencia de calor tres mecanismos diferentes: **conducción, convección y radiación**. No obstante, es necesario considerar que en la mayoría de los casos el calor se transfiere de forma simultánea en varias de estas formas.



Según el autor Domingo (2011) se denomina mecanismo de transferencia de calor por conducción a la “energía calorífica que se transmite durante el contacto directo entre cuerpos (o parte de los mismos) a distintas temperaturas y tiene lugar mediante choques o acoplamientos entre las moléculas del sistema”. (p. II). La conducción del calor se clasifica en estacionarias o transitorias.

Por otra parte, se conoce como mecanismo de transferencia de calor por convección.

Modos de transporte energético debido al movimiento de un fluido, gas o líquido alrededor o a través de una superficie, la velocidad del fluido está directamente relacionada con la transferencia de calor. Existen dos tipos de transferencia de calor por convección que dependen de la naturaleza del movimiento del fluido y se denominan: convección natural y convección forzada. (Larco & Sarmiento, 2014, p.3).

Existen dos tipos de convección:

**Convección natural:** Ocurre cuando la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a fuerzas ascensionales, el fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna fuerza motriz exterior.

**Convección forzada:** La misma tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido con una velocidad ( $v$ ), sobre una superficie que se encuentra a una temperatura  $T_s$  mayor o menor que la del fluido  $T_f$ , como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

Independiente de que la convección sea natural o forzada, la cantidad de calor transmitido  $Q_c$ , se puede escribir (Ley de enfriamiento de Newton).

$$Q_c = hA (T_s - T_f)$$



Donde:  $h$  = Coeficiente de transferencia del calor por convección en la interface gas – sólido ( $W/m^2 \cdot K$ ).

$A$  = Área superficial en contacto con el fluido ( $m^2$ ).

**Radiación:** Es la propagación del calor sin la intervención de partículas materiales y debida a la propagación de ondas electromagnéticas, si solo hubiese conducción y convección, un cuerpo colocado en el vacío estaría siempre a la misma temperatura. Todo cuerpo emite hacia el espacio energía en forma de ondas electromagnéticas que supone una pérdida de energía y por consiguiente su temperatura disminuye, los cuerpos que le rodean también emiten radiación y parte de ella la absorbe el cuerpo inicial de modo que se establece un balance de energía entre ellos.

Un cuerpo negro es un emisor y absorbedor perfecto de radiación. A una temperatura y longitud de onda específica ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro. Además, absorbe toda la radiación incidente sin importar su longitud de onda ni dirección y es un emisor difuso (Andrade & Masabanda, 2012, p.12).

Un cuerpo negro, emitirá energía a una rapidez proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Cuando dos cuerpos intercambian calor por radiación, el intercambio de calor neto es entonces proporcional a las diferencias en  $T^4$ .

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4)$$

Donde:

$\sigma$  - es la constante de proporcionalidad y se le llama constante de Stefan-Boltzmann con el valor de  $5.669 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$  (Castellanos & Montesino, 2007).

Es importante destacar que, al producirse transmisión de calor entre dos cuerpos, generalmente coexisten las tres formas de calor antes citadas, lo que ocurre es que alguna de ellas prevalece sobre las demás.



#### **1.4. Parámetros termodinámicos del sistema de enfriamiento por centrifugación del acero para herramienta AISI D2.**

El AISI D2 es uno de los aceros trabajados en frío más utilizados, con alto contenido de carbono y de cromo. La disolución de los elementos de aleación y la precipitación de los carburos dan como resultado su alta resistencia mecánica al desgaste y dureza. Las propiedades están determinadas principalmente por los elementos de aleación, el tamaño de grano de austenita, la dispersión de la martensita, la densidad de dislocaciones y las segregaciones. La correlación predominante entre las segregaciones y la tenacidad implica su cantidad, tipo, tamaño, morfología, estabilidad y distribución espacial.

El acero puede tener diferentes performances en servicio según el tamaño, la morfología y la distribución de los carburos eutécticos, que dependen en gran medida de las condiciones de trabajo en caliente, la temperatura del medio, y el tiempo entre cada ciclo de forja C.A. & McQueen (como se citó en Becerra & Morales, 2019).

El acero para herramientas AISI D2, muestra una ultra alta resistencia y excelente resistencia al desgaste; sin embargo, experimenta una disminución de su tenacidad en el servicio, la descomposición de la austenita retenida en ferrita y cementita durante el proceso de revenido  $\approx 773$  K ( $\approx 500^\circ\text{C}$ ) está relacionado con la pérdida de tenacidad de esta aleación Nanesa & Jahazi (como se citó en Becerra & Morales, 2019).

Según Uddeholm Sleipner, Sverker, Borobeva G.A & Skladnova E.E (como se citó en Viada, 2020) el acero D2 es un acero de alta templabilidad diseñado para el conformado en frío que contiene en su composición química un alto contenido de carbono y de cromo además es aleado con molibdeno y vanadio y se caracteriza por:

- Alta resistencia al desgaste.
- Alta resistencia a la compresión.
- Alta templabilidad.
- Alta estabilidad dimensional durante el temple.
- Buena estabilidad frente al revenido.
- Buena tenacidad.



- Buen acabado superficial.
- Alto límite de rotura a la flexión.

Tabla 1. Composición química del acero AISI D2 y sus equivalencias internacionales. (Llave de los aceros,2004)

Acero		Composición Química en %								
Marca	Norma Internacional	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	Fe
D2	AISI / SAE	1,45	0,15	0,15	Hasta 0,03	Hasta 0,03	11,0	0,4	0.15	~85
1.2379	DIN									
X155CrMo12.1	JIS									
SKD 11	GOST									
X12M (X12Φ)		1,65	0,35	0,4			12,5	0,6	0.30	
<b>Temperatura de los puntos críticos:</b> $A_{C1} = 830$ ; $A_{C3}(A_{Cm}) = 855$ ; $A_{r1} = 750$ ; $M_i = 230$										

El acero para herramientas AISI D2 es ampliamente utilizado en la industria de fabricación de moldes y como herramientas de corte, donde se requiere una ultra alta resistencia mecánica, alta resistencia al desgaste y buena tenacidad; por otro lado, el tratamiento térmico convencional (T.T.C), consiste en una austenización + enfriamiento a temperatura ambiente (o en aceite) + revenido, siendo este el principal proceso utilizado para esta aleación. La microestructura de la aleación tratada con T.T.C se compone de agujas de martensita, una variedad de carburos y de austenita retenida.

A pesar de las ventajas y características antes mencionadas del acero para herramienta AISI D2, la presente investigación se basa en determinar los diferentes parámetros termodinámicos del nuevo sistema de enfriamiento por centrifugación, teniendo en cuenta que son insuficientes o casi nulos los estudios relacionados con este tema.

El enfriamiento por centrifugación consiste en someter el acero austenizado a un enfriamiento forzado utilizando el efecto del intercambio de calor convectivo generado en una cámara de enfriamiento bajo la influencia de la centrifugación.

A partir del estudio elaborado por el ingeniero Alaor Viada en el año 2020 en opción al título de ingeniero mecánico donde tuvo como tema “Análisis de la influencia del enfriamiento en las herramientas para conformar en frío basado en CFD Y FEM” se realizó un análisis comparativo de las formas tradicionales de



enfriamiento y el nuevo método por centrifugación para determinar las variables de velocidad del enfriamiento y el nivel de tensiones en el acero AISI D2, por medio de las herramientas CFD y FEM. En la actualidad se desconocía el comportamiento del proceso de enfriamiento por centrifugación durante el temple de las herramientas del acero para conformar en frío AISI D2. Al culminar su trabajo de investigación según los resultados obtenidos se puede concluir que el enfriamiento por centrifugación puede sustituir a los medios tradicionales de enfriamiento, obteniéndose menores tiempos de enfriamiento y menores niveles tensionales y de deformación lo que garantiza un alto nivel de calidad de las herramientas.

1. De las variantes estudiadas los menores tiempos de enfriamientos se obtuvieron durante el enfriamiento en aceite y por centrifugación con valores entre 220 s y 233 s.
2. Los mayores niveles de tensiones térmicas y de desplazamientos obtenidos se observan durante el enfriamiento en aceite siendo estos de  $8,776 \cdot 10^7$  MPa y  $8,451 \cdot 10^3$  mm y los menores durante el enfriamiento por centrifugación con valores de  $7,107 \cdot 10^6$  MPa y  $4,038 \cdot 10^2$  mm.

A partir de esta investigación se logrará determinar otros parámetros termodinámicos que aún se desconocen e influyen en el sistema de enfriamiento por centrifugación.

#### - **Coefficiente de transferencia de calor por convección**

El coeficiente de transferencia de calor depende del tipo de flujo de las propiedades termofísicas del fluido y de la geometría del sistema. Su valor no es constante debido a que las condiciones del flujo varían de punto en punto sobre la superficie, pero en los cálculos de aplicación de ingeniería se usa el valor del coeficiente de convección promedio. El análisis matemático de la convección es complejo en la mayoría de problemas de interés práctico se los estudia experimentalmente, obteniéndose resultados a través de ecuaciones empíricas en función de números adimensionales (Andrade & Masabanda, 2012, p.6).

#### - **Número de Nusselt**

El número de Nusselt es un número adimensional que se usa para describir la relación de la energía térmica que se convence al fluido con respecto a la energía



térmica conducida dentro del fluido. El número de Nusselt es igual al gradiente de temperatura adimensional en la superficie y proporciona una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie.

$$N_u = \frac{hD}{k}$$

Donde:

k - es la conductividad térmica del fluido.

D - es la distancia característica.

h - es el coeficiente de transferencia de calor por convección; (W/m<sup>2</sup>·K).

Cuando se desarrolla un flujo turbulento durante el enfriamiento el número de Nusselt es  $N_u = f(Re, Pr, L/D)$  de aquí que:

Para un flujo turbulento interno completamente desarrollado se parte de las siguientes consideraciones

Si,  $0,5 \leq Pr \leq 2000$  ;  $3000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$  se aplica Gnielinski (1976)

$$N_{uD} = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12,7 \cdot (f/8)^{0,5} (Pr^{2/3}-1)} ; f = (0,79 \ln Re - 1,64)^2$$

Si  $0,7 \leq Pr \leq 16700$  ;  $Re \geq 10000$  ;  $L/D \geq 10$  se aplica la correlación de Dittus – Boelter (1930) para cuando existe un calentamiento del fluido.

$$N_{uD} = 0,023 Re_D^{0,8} Pr^n \quad \text{con } n=0,4; \text{ para el calentamiento } (T_s > T_m)$$

#### - Número de Prandtl

Se define como la relación de difusividad impulso a la difusividad térmica. La difusividad del momento o como se le llama normalmente viscosidad cinemática, nos dice la resistencia del material a los flujos de corte (diferentes capas de flujo viajan con diferentes velocidades debido, por ejemplo, a diferentes velocidades de paredes adyacentes) en relación con la densidad.

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{C_p \cdot \mu}{k_f}$$

Donde:

V - es la difusividad del momento (viscosidad cinemática); (m<sup>2</sup>/s).

a - es la difusividad térmica; (m<sup>2</sup>/s).

Cp - es el calor específico; (J/kg·K).



$\mu$  - es la viscosidad dinámica; (N·s/m<sup>2</sup>).

$k$  - es la conductividad térmica; (W/m·K).

En comparación al número de Reynolds el número de Prandtl no depende de la geometría de un objeto involucrado en el problema, sino que depende únicamente del fluido y del estado del fluido. Estos valores se encuentran en tablas de propiedades junto con otras propiedades como la viscosidad y la conductividad térmica.

### - Número de Reynolds

Para convección forzada en un flujo interno el número de Reynolds se define en función del diámetro del tubo y de la velocidad media del fluido sobre la sección transversal del tubo.

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{4m}{\pi D \mu}; m = \rho u_m A_c$$

Donde:

$\rho$  – densidad del fluido; kg/m<sup>3</sup>.

$u_m$  – velocidad media del fluido; m<sup>3</sup>.

$D$  - dimensión característica (diámetro de la centrífuga); m.

$\mu$  – viscosidad dinámica del fluido; Pa·s

### - Coeficiente de Grossman

El coeficiente de Grossman caracteriza la severidad del enfriamiento lo cual muestra la capacidad del medio de enfriamiento para extraer el calor desde un cuerpo caliente, lo cual puede ser expresado en términos de los valores de “H”. El factor de severidad del enfriamiento de Grossman “H” está basado en la Ley de Newton del enfriamiento (Bozidar Liscić, et al.2010):

Coeficiente de Grossman

$$H = \frac{h}{2k}$$

Coeficiente de transmisión de calor

$$dQ = \alpha \cdot A(T_s - T_\infty) \cdot dt$$

Para un cilindro:

$$dQ = \frac{\lambda}{r} \cdot A(T_c - T_s) \cdot dt$$



Donde:

$Q$  – es el calor transferido desde la superficie del cuerpo hacia el ambiente; (J).

$\alpha$  - es el coeficiente de transferencia de calor; ( $W/m^2 \cdot K$ ).

$A$  - es el área superficial; ( $m^2$ ).

$T_s$  – es la temperatura superficial del cuerpo; (K).

$T^\infty$  - es la temperatura ambiente; (K).

$T_c$  - es la temperatura en el centro del cilindro; (K).

$r$  – es el radio del cilindro; (m).

$d$  - es el diámetro del cilindro; (m).

$\lambda$  – es la conductividad térmica; ( $W/m \cdot K$ ).

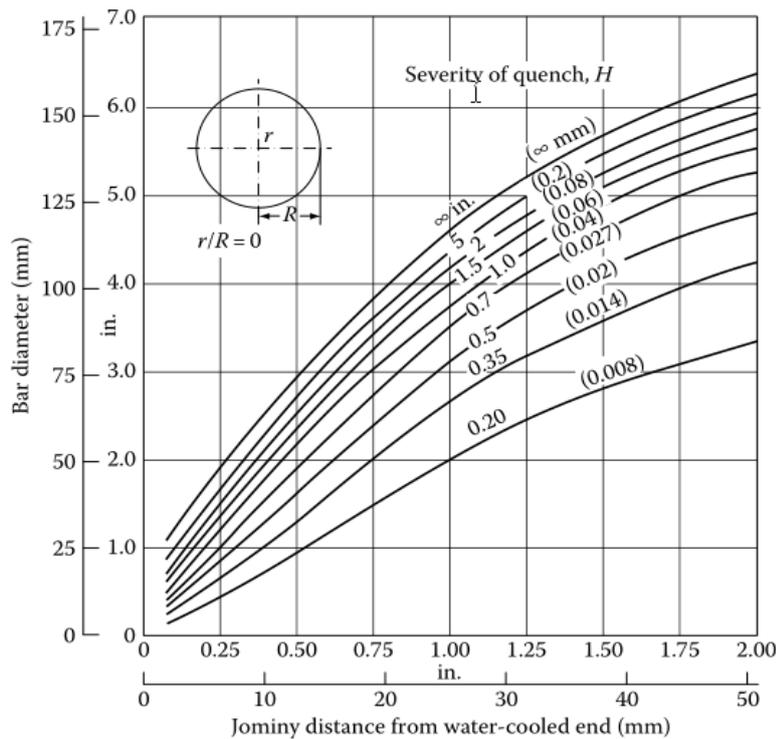
$t$  – es el tiempo; (s).

Si consideramos el valor de  $\lambda$  constante (no dependiente de la temperatura y de las posibles transformaciones estructurales), entonces es posible por medio del uso del valor de “h” definir (como primera aproximación) la capacidad del medio de enfriamiento, siempre que el cuerpo este axialmente simétrico.

Hasta el momento se han determinado algunos valores de “H” para determinados medios de enfriamiento y grados de agitación, tales como para el agua, el aceite y algunas sales, lo cual ha servido para demostrar que los grados de agitación no son uniformes y no están definidos de formas precisas e incluso para grados comparables de agitación existen diferencias sustanciales entre los valores correspondientes de “H”.

Existen además diferentes métodos de cómo evaluar los valores de “H” de un determinado medio de enfriamiento. Uno de los más simples es utilizando las tablas de valores recomendados, donde como ya se mencionó los grados de agitación no están definidos de forma muy precisa y por medio del uso de los diagramas de Lamont, Figura 2, el cual es válido para el centro de una barra cilíndrica de forma tal que  $r/R=0$ , donde  $r$  – es el radio de la parte no templada de la sección transversal de la barra y  $R$  – es el radio de la barra.





**Figura 2.** Diagrama de Lamont para el centro de una barra redonda ( $r/R=0$ ).

### 1.5. Software CAD para la modelación de las variantes de enfriamiento.

En el mercado laboral competitivo de hoy en día, los profesionales de tecnología CAD no solo realizan diseños (elaboran simulaciones, innovaciones, visualizaciones y además se comunican) para impulsar nuevas ideas y sus carreras. SOLIDWORKS proporciona un software potente, atractivo y práctico para entender y desarrollar diseños para el mundo real. El software 3D integrado, el plan de estudio y las lecciones facilitan el aprendizaje y la enseñanza del desarrollo de los diseños, y hacen que sea emocionante utilizarlo (SolidWorks Corporation Dassault Systemes, 2016).

SOLIDWORKS ofrece un amplio conjunto de herramientas probadas (diseño de ingeniería, simulación mecánica y de flujo, diseño sustentable, documentación eléctrica y visualización) en un paquete de software integrado y fácil de comprender, (SolidWorks Corporation Dassault Systemes, 2016).

#### 1.5.1 Módulo de Flow Simulation

La dinámica de fluidos de ingeniería (IFD) es una nueva variedad de software de dinámica de fluido computacional (CFD) que permite a los ingenieros mecánicos



simular el funcionamiento de aplicaciones de transferencia de calor y flujo de fluidos con potentes herramientas en 3D intuitiva y fácil de utilizar. La IFD se rige por criterios y objetivos de ingeniería que proporcionan a los ingenieros de producto la percepción técnica necesaria para responder a las cuestiones que surgen en el proceso de desarrollo del producto, (SolidWorks Corporation Dassault Systemes, 2018).

SolidWorks® Flow Simulation está basado en los mismos criterios matemáticos que el software de dinámica de fluido computacional (CFD) tradicional, aunque son las ventajas que agilizan y facilitan su uso y que no implican renunciar a una solución sólida y extraordinariamente precisa las que lo diferencian del resto. Diseñado para abordar los retos de ingeniería de CFD, SOLIDWORKS Flow Simulation permite a los ingenieros aprovechar la integración con CAD, las funciones de mallado geométrico avanzado, la convergencia de soluciones y la determinación automática de regímenes de flujo, sin renunciar a la facilidad de uso ni a la precisión. El software SOLIDWORKS Flow Simulation elimina la complejidad del análisis de fluidos y permite a los ingenieros simular fácilmente el flujo de fluidos, la transferencia de calor y las fuerzas de fluidos para poder investigar el impacto que tendría el flujo de líquido o gas en el rendimiento del producto, (SolidWorks Corporation Dassault Systemes, 2018).

### **1.5.2 Módulo de Simulation**

SOLIDWORKS Simulation es un sistema de análisis de diseño que está completamente integrado con SOLIDWORKS. SOLIDWORKS Simulation ofrece soluciones de simulación para análisis estáticos lineales y no lineales, de frecuencia, de pandeo, térmicos, de fatiga, de recipiente a presión, de caída, dinámicos lineales y no lineales, y de optimización, (SolidWorks Corporation, 2016).

Alimentado por programas de resolución de problemas rápidos y precisos (solvers), SOLIDWORKS Simulation le permite resolver grandes problemas de forma intuitiva mientras diseña. SOLIDWORKS Simulation viene en dos paquetes: SOLIDWORKS Simulation Professional y SOLIDWORKS Simulation Premium para satisfacer sus necesidades de análisis, (SolidWorks Corporation, 2016).



SOLIDWORKS Simulation reduce el tiempo de salida al mercado ahorrando tiempo y esfuerzo en la búsqueda de resultados de diseño óptimos.

El software utiliza el Método de elementos finitos (FEM). El FEM es una técnica numérica para analizar diseños de ingeniería. El FEM está aceptado como el método de análisis estándar debido a su generalidad y compatibilidad para ser implementado en computadoras. El FEM divide el modelo en numerosas piezas pequeñas de formas simples llamadas "elementos", que reemplazan eficazmente un problema complejo por muchos problemas simples que deben ser resueltos de manera simultánea, (SolidWorks Corporation, 2016).

Los elementos comparten puntos comunes denominados "nodos". El proceso de división del modelo en pequeñas piezas se denomina mallado.

El comportamiento de cada elemento es bien conocido bajo todas las situaciones de soporte y carga posibles. El método de elemento finito utiliza elementos con formas diferentes.

La respuesta en un elemento, en cualquier momento, se interpola desde la respuesta en los nodos del elemento. Cada nodo está descrito en detalle por un cierto número de parámetros, según el tipo de análisis o del elemento utilizado. Por ejemplo, la temperatura de un nodo describe por completo su respuesta en el análisis térmico. Para el análisis estructural, la respuesta de un nodo está descrita, por lo general, por tres traslaciones y tres rotaciones. Se denominan grados de libertad (GDL). El análisis que utiliza FEM se denomina Análisis de elementos finitos (FEA), (SolidWorks Corporation, 2016).

El software formula las ecuaciones que rigen el comportamiento de cada elemento teniendo en cuenta su conectividad con los demás elementos. Estas ecuaciones hacen referencia a la respuesta de cargas, restricciones y propiedades del material conocidas.



## CAPÍTULO II. PARÁMETROS TERMODINÁMICOS DEL ENFRIAMIENTO POR CENTRIFUGACIÓN.

### 2.1. Estudios del fluido durante el proceso del enfriamiento por centrifugación.

La determinación de los parámetros termodinámicos del enfriamiento por centrifugación se realizará mediante el empleo de las herramientas CAD y FEM del software de diseño SolidWorks 2016. Para estos estudios se seleccionará una de las tecnologías de tratamientos térmicos empleadas durante el proceso de enfriamiento por centrifugación al acero para herramientas AISI D2, tomando como base para este estudio la temperatura de austenización más elevada (1 080 °C) y las diferentes frecuencias de rotación empleadas durante el proceso de experimentación (500 r/min (8,33 s<sup>-1</sup>); 1 000 r/min (16,67 s<sup>-1</sup>) y 1 500 r/min (25 s<sup>-1</sup>)).

El estudio se realizó por medio de la modelación del proceso de enfriamiento, empleando para ello el módulo de “Flow Simulation” donde se introdujeron los siguientes parámetros de entrada:

Temperatura del fluido: 27 °C

Presión atmosférica estática: 101 321,32 Pa

Temperatura de las piezas: 1 080 °C

Frecuencia de rotación: 8,33 s<sup>-1</sup>; 16,67 s<sup>-1</sup>; 25 s<sup>-1</sup>

#### 2.1.1 Resultados del comportamiento del estudio para la determinación de los parámetros termodinámicos.

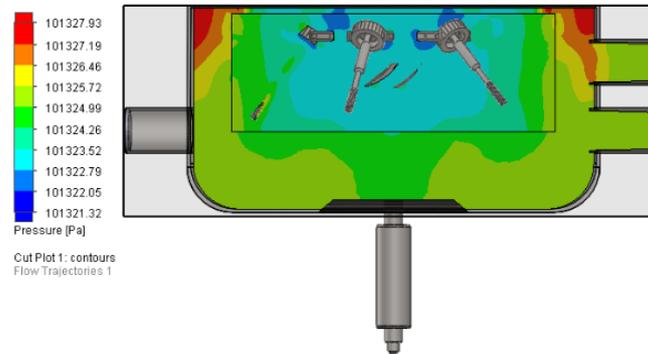
Los estudios se realizaron con el objetivo de determinar el comportamiento de la temperatura del fluido dentro de la cámara de enfriamiento, su trayectoria, velocidad, presión durante el proceso de enfriamiento y la densidad del fluido.

#### 2.1.2. Estudios del fluido para las frecuencias de rotación de 500 r/min (8,33 s<sup>-1</sup>).

##### Estudio 1. Estudio de presión del fluido a frecuencias de rotación de 500 r/min (8,33 s<sup>-1</sup>).



En la figura 2.1 se muestra el comportamiento de la presión del fluido dentro de la cámara de enfriamiento donde se puede apreciar que la zona de mayor presión (101 327,93 Pa) predomina en los extremos de la parte superior de la cámara y alrededor de las piezas enfriadas se observa un ligero descenso de la misma igual a 101 322,90 Pa .



**Figura 2.1.** Modelo de comportamiento de la presión a 1 080 °C y 500 r/min (8,33 s<sup>-1</sup>).

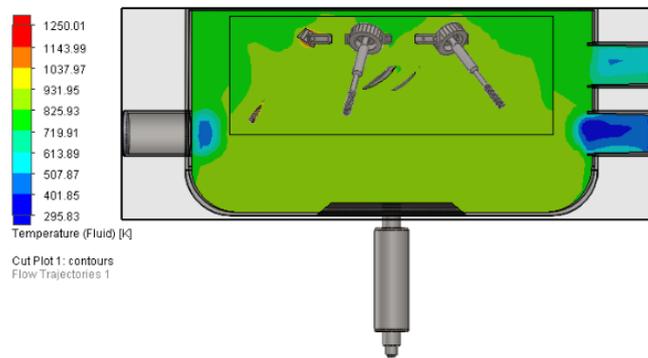
## **Estudio 2. Estudio de temperatura del fluido a frecuencias de rotación de 500 r/min (8,33 s<sup>-1</sup>).**

En la figura 2.2 se puede apreciar que, en el contorno cerrado de la cámara de enfriamiento, cuando no existe entrada de aire forzado y una vez que ocurre el proceso de intercambio de calor entre las superficies de las piezas y el fluido, la temperatura de este alrededor de las piezas permanece casi invariante, con un valor igual a 878,94 K (605,79 °C), observándose un descenso en los extremos superiores de la cámara igual a 772,92 K (499,77 °C), lo que nos demuestra que el flujo de aire caliente asciende, y conjuntamente con el aumento de la presión en la zona superior de la cámara, hace posible que cuando el fluido se encuentre a una temperatura media de 560,88 K (287,73 °C) se abra la válvula de salida hacia el tanque de evacuación de los gases calientes y comience la entrada de aire a temperatura ambiente por la válvula de entrada hacia la cámara de enfriamiento.

El flujo de calor superficial de las piezas hacia el medio de enfriamiento (fluido de aire en movimiento) es de 57 222,25 W/m<sup>2</sup> y el coeficiente de transferencia de calor medio es igual 28,82 W/m<sup>2</sup>·K, lo que desarrolla un flujo de calor



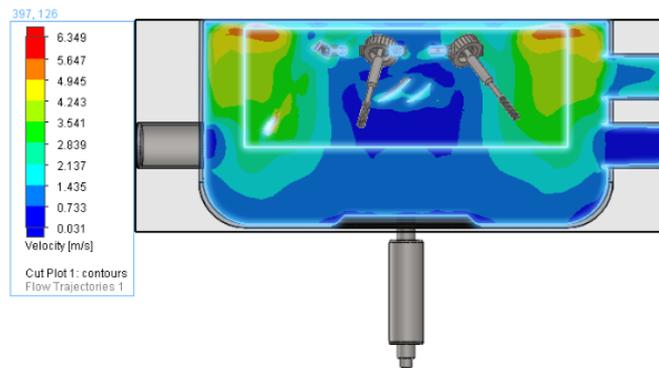
superficial por convección promedio de  $30\,547,84\text{ W/m}^2$  y por conducción promedio de  $707\,434,40\text{ W/m}^2$ .



**Figura 2.2.** Modelo de comportamiento de la temperatura a  $1\,080\text{ °C}$  y  $500\text{ r/min}$  ( $8,33\text{ s}^{-1}$ )

### **Estudio 3. Estudio de la velocidad y densidad del fluido a frecuencias de rotación de $500\text{ r/min}$ ( $8,33\text{ s}^{-1}$ ).**

La figura 2.3 muestra el estudio del comportamiento de la velocidad del fluido dentro de la cámara de enfriamiento tomando en consideración la presión desarrollada y la temperatura alcanzada dentro de la misma, donde se pudo determinar que la velocidad media del movimiento del fluido fue de  $5,26\text{ m/s}$  y desarrolla una densidad igual a  $0,32\text{ kg/m}^3$ .



**Figura 2.3.** Modelo del comportamiento de la velocidad del fluido a  $1\,080\text{ °C}$  y  $500\text{ r/min}$  ( $8,33\text{ s}^{-1}$ )

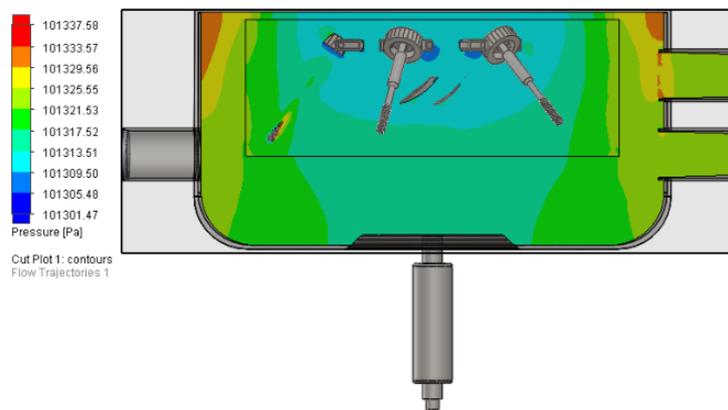
### **2.1.3. Estudios del fluido para las frecuencias de rotación de $1\,000\text{ r/min}$ ( $16,67\text{ s}^{-1}$ ).**

El comportamiento de los parámetros de presión, temperatura, velocidad y densidad del fluido para los niveles de frecuencias de rotación de  $16,67\text{ s}^{-1}$  se muestran a continuación.



### Estudio 1. Estudio de presión del fluido a frecuencias de rotación de 1 000 r/min (16,67 s<sup>-1</sup>).

En la figura 2.4 se muestra el comportamiento de la presión del fluido dentro de la cámara de enfriamiento donde se puede apreciar que existe una disminución de la presión en el sistema con respecto a las frecuencias de rotación de 8,33 s<sup>-1</sup> a una misma temperatura; la zona de mayor presión (101 323,54 Pa) predomina en una zona muy limitada (pequeña) en los extremos de la parte superior de la cámara y alrededor de las piezas enfriadas se observa una disminución de la misma igual a 101 319,52 Pa.



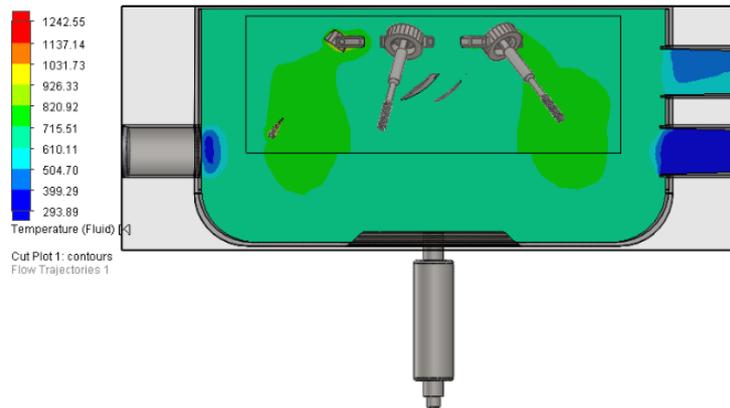
**Figura 2.4.** Modelo de comportamiento de la presión a 1 080 °C y 1 000 r/min (16,67 s<sup>-1</sup>).

### Estudio 2. Estudio de temperatura del fluido a frecuencias de rotación de 1 000 r/min (16,67 s<sup>-1</sup>).

En la figura 2.5 se observa que el comportamiento de la temperatura del fluido alrededor de las piezas es superior al resto del sistema, con un valor igual a 768,21 K (495,06 °C), observándose también que en el resto del volumen de la cámara esta se mantiene constante con un valor igual a 662,81 K (389,66 °C), lo que nos demuestra que existe una mejor condición termodinámica para el desarrollo del enfriamiento.

El flujo de calor superficial de las piezas hacia el medio de enfriamiento (fluido de aire en movimiento) es de 107 299,68 W/m<sup>2</sup> y el coeficiente de transferencia de calor medio es igual 56,34 W/m<sup>2</sup>·K, lo que desarrolla un flujo de calor superficial por convección promedio de 59 717,52 W/m<sup>2</sup> y por conducción promedio de 1 267 156,74 W/m<sup>2</sup>.

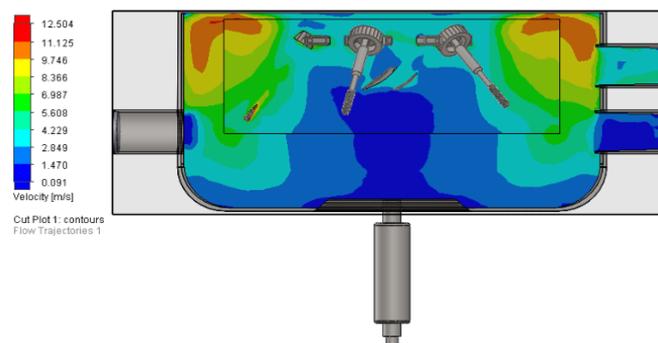




**Figura 2.5.** Modelo de comportamiento de la temperatura a 1 080 °C y 1 000 r/min ( $16,67 \text{ s}^{-1}$ ).

### **Estudio 3. Estudio de la velocidad y densidad del fluido a frecuencias de rotación de 1 000 r/min ( $16,67 \text{ s}^{-1}$ ).**

En la figura 2.6 se muestra el estudio del comportamiento de la velocidad del fluido dentro de la cámara de enfriamiento tomando en consideración la presión desarrollada y la temperatura alcanzada dentro de la misma, donde se determinó que la velocidad media del movimiento del fluido fue de 10,52 m/s con una densidad del fluido igual a  $0,37 \text{ kg/m}^3$ . Es necesario destacar que a estos niveles de frecuencias de rotación se obtiene una mayor velocidad de movimiento del fluido dentro de la cámara, con respecto al alcanzado con 500 r/min ( $8,33 \text{ s}^{-1}$ ), lo que mejora el proceso de enfriamiento.



**Figura 2.6.** Modelo de comportamiento de la velocidad y densidad del fluido a 1 080 °C y 1 000 r/min ( $16,67 \text{ s}^{-1}$ ).

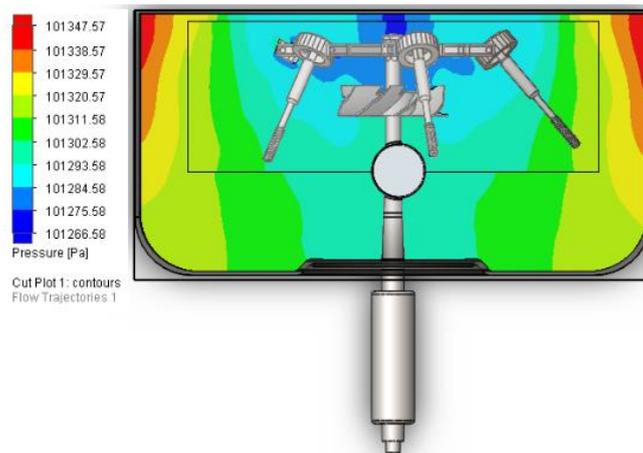
#### **2.1.4. Estudios del fluido para las frecuencias de rotación de 1 500 r/min ( $25 \text{ s}^{-1}$ ).**

El comportamiento de los parámetros de presión, temperatura, velocidad y densidad del fluido para los niveles de frecuencias de rotación de  $25 \text{ s}^{-1}$  se muestran a continuación.



### Estudio 1. Estudio de presión del fluido a frecuencias de rotación de 1 500 r/min (16,67 s<sup>-1</sup>).

En la figura 2.7 se muestra el comportamiento de la presión del fluido dentro de la cámara de enfriamiento donde se puede apreciar que existe una disminución de la presión en el sistema con respecto a las frecuencias de rotación de 8,33 s<sup>-1</sup> y 16,67 s<sup>-1</sup> a una misma temperatura; la zona de mayor presión (101 349,57 Pa) predomina en una zona muy limitada (pequeña) en los extremos de la parte superior de la cámara y alrededor de las piezas enfriadas se percibe una diferencia de presión en diferentes zonas de la cámara, en las cercanías de las piezas se pueden observar en la zona central una presión media igual a 101 298,08 Pa, en la zona intermedia igual a 101 311,57 Pa y en la zona externa de la cámara de 101 329,57 Pa, lo que muestra la presencia de una heterogeneidad durante el movimiento del fluido y una presión promedio para el sistema de 101 291,23 Pa.



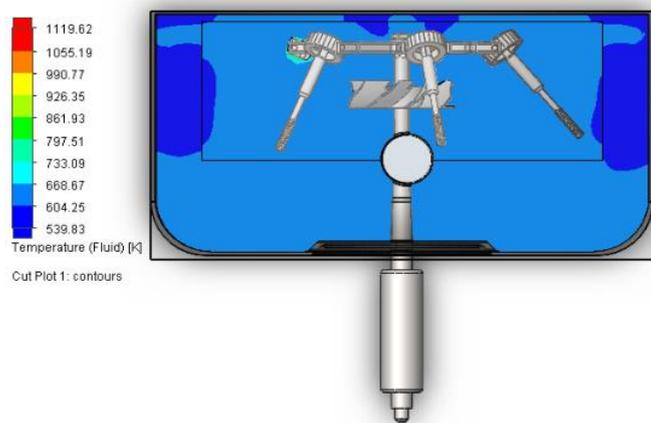
**Figura 2.7.** Modelo de comportamiento de la presión a 1 080 °C y 1 500 r/min (25 s<sup>-1</sup>).

### Estudio 2. Estudio de temperatura del fluido a frecuencias de rotación de 1 500 r/min (25 s<sup>-1</sup>).

En la figura 2.8 se observa que el comportamiento de la temperatura del fluido a estos niveles de frecuencias de rotación es prácticamente invariable, con un valor promedio igual a 604,25 K (331,10 °C), lo que muestra que existe una mayor uniformidad de la temperatura termodinámica para el desarrollo del enfriamiento.



El flujo de calor superficial de las piezas hacia el medio de enfriamiento (fluido de aire en movimiento) es de  $141\,160,28\text{ W/m}^2$  y el coeficiente de transferencia de calor promedio igual a  $76,41\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , lo que desarrolla un flujo de calor superficial por convección promedio de  $81\,000,06\text{ W/m}^2$  y por conducción promedio de  $1\,607\,618,59\text{ W/m}^2$ .

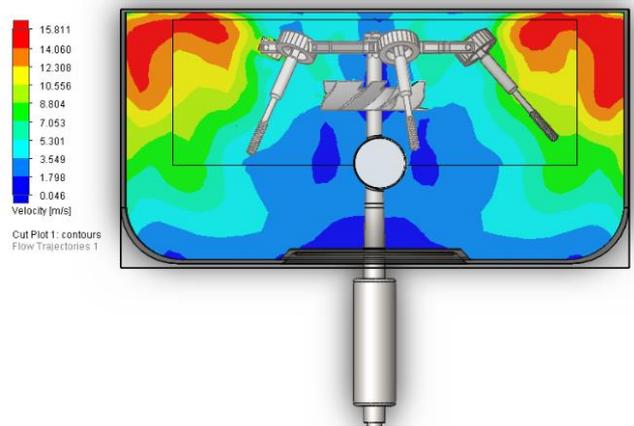


**Figura 2.8.** Modelo de comportamiento de la temperatura a  $1\,080\text{ }^\circ\text{C}$  y  $1\,500\text{ r/min}$  ( $25\text{ s}^{-1}$ ).

### **Estudio 3. Estudio de la velocidad y densidad del fluido a frecuencias de rotación de $1\,500\text{ r/min}$ ( $25\text{ s}^{-1}$ ).**

En la figura 2.9 se muestra el estudio del comportamiento de la velocidad del fluido dentro de la cámara de enfriamiento tomando en consideración la presión desarrollada y la temperatura alcanzada dentro de la misma, donde se determinó que la velocidad media del movimiento del fluido fue de  $15,78\text{ m/s}$  con una densidad del fluido igual a  $0,41\text{ kg/m}^3$ . Es necesario destacar que a estos niveles de frecuencias de rotación se obtiene una mayor velocidad de movimiento del fluido dentro de la cámara, con respecto al alcanzado con  $500\text{ r/min}$  ( $8,33\text{ s}^{-1}$ ) y  $1\,000\text{ r/min}$  ( $16,67\text{ s}^{-1}$ ).





**Figura 2.9.** Modelo de comportamiento de la velocidad y densidad del fluido a 1 080 °C y 1 500 r/min (25 s<sup>-1</sup>).

En la tabla 2.1 se muestra el resumen del comportamiento de los parámetros del enfriamiento estudiados.

Tabla 2.1 Comportamiento de la presión, temperatura, velocidad y densidad del enfriamiento por centrifugación.

Parámetros del estudio	Frecuencias de rotación, s <sup>-1</sup>		
	8,33	16,67	25
Densidad desarrollada por el fluido, Kg/m <sup>3</sup>	0,32	0,37	0,41
Presión, Pa	101 327,93	101 323,54	101 291,23
Temperatura, °C	605,79	495,06	331,10
Velocidad media del fluido, m/s	5,26	10,52	15,78
Coefficiente de transferencia de calor, W/m <sup>2</sup> ·K	28,82	56,34	76,41
Flujo de calor superficial de las piezas, W/m <sup>2</sup>	57 222,25	107 299,68	141 160,284
Flujo de calor superficial por convección, W/m <sup>2</sup>	30 547,84	59 717,52	81 000,06
Flujo de calor superficial por conducción, W/m <sup>2</sup>	707 434,40	1 267 156,74	1 607 618,59

## 2.2. Determinación de los coeficientes termodinámicos del proceso de enfriamiento por centrifugación.

### - Número de Reynolds

Para una frecuencia de rotación de 500 r/min (8,33 s<sup>-1</sup>)

$$\rho = 0,323 \text{ kg/m}^3 \quad D = 0,274 \text{ m}$$

$$u_m = 5,26 \text{ m/s} \quad \mu = 51,2 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s} = \text{kg/m} \cdot \text{s}$$

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{4m}{\pi D \mu}; \quad m = \rho u_m A_c \quad Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}}$$



$R_{eD} = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{0,323 \cdot 5,26 \cdot 0,274}{51,2 \cdot 10^{-6}} = 9092,19 > 4000$  Lo que demuestra que existe un flujo turbulento

Para una frecuencia de rotación de 1000 r/min ( $16,67 \text{ s}^{-1}$ )

$$\rho = 0,37 \text{ kg/m}^3$$

$$u_m = 10,52 \text{ m/s}$$

$$R_{eD} = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{0,37 \cdot 10,52 \cdot 0,274}{51,2 \cdot 10^{-6}} = 20830,42 > 4000 \text{ flujo turbulento}$$

Para una frecuencia de rotación de 1500 r/min ( $25 \text{ s}^{-1}$ )

$$\rho = 0,41 \text{ kg/m}^3$$

$$u_m = 15,78 \text{ m/s}$$

$$R_{eD} = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{0,41 \cdot 15,78 \cdot 0,274}{51,2 \cdot 10^{-6}} = 34\,623,53 > 4000 \text{ flujo turbulento}$$

#### - Número de Prandtl

$$P_r = \frac{v}{a} = \frac{C_p \cdot \mu}{k_f}$$

$$C_p = 1\,197 \text{ J/kg K} \quad P_r = 0,722$$

$$k_f = 0,08 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

#### - Número de Nusselt

Para la frecuencia de rotación de 500 r/min ( $8,33 \text{ s}^{-1}$ )

Tal y como  $0,5 \leq P_r \leq 2\,000$  ;  $3\,000 \leq R_e \leq 5 \cdot 10^6$  se aplica Gnielinski (1976)

$$N_{uD} = \frac{(f/8)(Re-1000)P_r}{1+12,7 \cdot (f/8)^{0,5} (P_r^{2/3}-1)} ; f = (0,79 \ln R_e - 1,64)^2$$

$$f = (0,79 \ln 9092,19 - 1,64)^2 = 30,83$$

$$N_{uD} = \frac{(3,85)(9\,092-1\,000) \cdot 0,722}{1+12,7 \cdot (3,85)^{0,5} (0,722^{2/3}-1)} = \frac{22\,493,33}{1+12,7(1,96) \cdot (0,82-1)} = \frac{22\,493,33}{-3,48} = -6,46$$

Tal y como se cumple que:

$0,7 \leq P_r \leq 16\,700$  ;  $R_e \geq 10\,000$  ;  $L/D \geq 10$  para las frecuencias de rotación de  $16,67 \text{ s}^{-1}$  y  $25 \text{ s}^{-1}$

$$L = 95,62 \text{ mm} = 0,09562 \text{ m} ; D = 10 \text{ mm} = 0,010 \text{ m} ; L/D = 9,562 \geq 10$$

Se aplica la correlación de Dittus – Boelter (1930) para flujo turbulento interno completamente desarrollado, donde:



$$N_{uD} = 0,023 Re_D^{0,8} Pr^n \quad \text{con } n=0,4; \text{ para el calentamiento } (T_s > T_m)$$

Para una frecuencia de rotación de 1 000 r/min (16,67 s<sup>-1</sup>)

$$N_{uD} = 0,023 \cdot 20\,830,42^{0,8} \cdot 0,722^{0,4} = 56,55$$

Para una frecuencia de rotación de 1 500 r/min (25 s<sup>-1</sup>)

$$N_{uD} = 0,023 \cdot 34\,623,53^{0,8} \cdot 0,722^{0,4} = 86,42$$

#### - Coeficiente de Grossman

Para las frecuencias de rotación de 500 r/min

$$\lambda = 28,25 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

$$A = 2\pi r h + 2\pi r^2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,005 \cdot 0,09562 + 2 \cdot 3,14 \cdot (0,005)^2 = 0,00315 \text{ m}^2$$

$$dQ = \frac{\lambda}{r} \cdot A(T_c - T_s) \cdot dt$$

$$T_s = 30 \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15 = 303,15 \text{ K} \quad r = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$$

$$T_c = 1080 \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15 = 1\,353,15 \text{ K} \quad t = 220 \text{ s}$$

$$dQ = \frac{28,25}{0,005} \cdot 0,00315 \cdot (1\,353,15 - 303,15) \cdot 220 = 4\,111\,222,5 \text{ J}$$

$$H = \frac{h}{2k} = \frac{28,82}{2 \cdot 28,25} = 0,51$$

Para las frecuencias de rotación de 1 000 r/min

$$dQ = \frac{28,25}{0,005} \cdot 0,00315 \cdot (1\,353,15 - 303,15) \cdot 245 = 4\,578\,406,875 \text{ J}$$

$$H = \frac{h}{2k} = \frac{56,34}{2 \cdot 28,25} = 0,997 \approx 1$$

Para las frecuencias de rotación de 1 500 r/min

$$dQ = \frac{28,25}{0,005} \cdot 0,00315 \cdot (1\,353,15 - 303,15) \cdot 225 = 4\,204\,659,375 \text{ J}$$

$$H = \frac{h}{2k} = \frac{76,41}{2 \cdot 28,25} = 1,352$$

#### - Coeficiente de transferencia de calor por convección

Tabla 2.2. Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección durante el proceso de enfriamiento por centrifugación.



Frecuencias de rotación de 500 r/min (8,33 s <sup>-1</sup> )	Frecuencias de rotación de 1 000 r/min (16,67s <sup>-1</sup> )	Frecuencias de rotación de 1 500 r/min (25 s <sup>-1</sup> )
28,82 W/m <sup>2</sup> ·K	56,34 W/m <sup>2</sup> ·K	76,41 W/m <sup>2</sup> ·K

Los resultados de los estudios realizados se muestran a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 2.3. Resumen de los parámetros termodinámicos determinados durante el enfriamiento por centrifugación.

Parámetros	Frecuencias de rotación, s <sup>-1</sup>		
	8,33	16,67	25
Número de Reynolds (Re)	9 092,19	20 830,42	34 623,53
Número de Prandtl (Pr)	0,722	0,722	0,722
Número de Nusselt (Nu)	29,65	56,55	86,42
Coefficiente de Transferencia de calor, W/m <sup>2</sup> ·K	28,82	56,34	76,41
Coefficiente de transmisión de calor, J	4 111 222,5	4 578 406,875	4 204 659,375
Numero de Grossman (H)	0,51	1	1,352

Según los resultados obtenidos de los estudios realizados podemos concluir que el proceso de enfriamiento por centrifugación se produce por medio del movimiento turbulento del fluido dentro de la cámara, como lo indica el número de Reynolds; que en la medida que aumentan las frecuencias de rotación del proceso, el movimiento del fluido se intensifica, lo que conlleva a un notable aumento del proceso de transferencia de calor por convección hasta alcanzar un valor máximo de 76,41 W/m<sup>2</sup>·K a 25 s<sup>-1</sup> y al mismo tiempo se observa un aumento de la intensidad del enfriamiento, como los indica el número de Grossman, el comportamiento de la temperatura durante el proceso y de la presión.



## CONCLUSIONES.

1. Se determinaron los parámetros termodinámicos que se desarrollan durante el proceso de enfriamiento por centrifugación.
2. Se demostró que el enfriamiento por centrifugación en todos sus niveles de frecuencias de rotación ocurre básicamente mediante el proceso de transferencia de calor por convección por medio del movimiento turbulento del fluido dentro de la cámara.
3. Al aumentar los niveles de frecuencias de rotación, se intensifica el proceso de enfriamiento, observándose los resultados más apropiados a  $25 \text{ s}^{-1}$ , dadas la distribución más uniforme de la temperatura durante el proceso de enfriamiento y al comportamiento del proceso de transferencia de calor.



## RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda determinar los parámetros termodinámicos para las temperaturas de austenización de 980 °C y 1 050 °C a las frecuencias experimentales de rotación de 8,33 s<sup>-1</sup>, 16,67 s<sup>-1</sup> y 25 s<sup>-1</sup>.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, A. y Narváez, M. (2012). Diseño y Contrucción de un Equipo para el Análisis de Transferencia de Calor por Radiación y Convección Combinadas para el Laboratorio de Transferencia de Calor.(Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Mecánico).Quito,Ecuador. Recuperado de <https://1library.co/document/yd75pmyl-construccion-analisis-transferencia-radiacion-conveccion-combinadas-laboratorio-transferencia.html>.
2. Ávila, J. y Ruiz, J.(2019). Efecto de la temperatura en austenización simple y doble del tratamiento térmico convencional del acero para herramientas AISI D2 sobre la microestructura, dureza y tenacidad.(Tesis en Opción al Título de Ingeniero de Materiales).Trujillo, Perú. Recuperado de [http://www.dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/15351/Becerra a%20Avila%2c%20Jorge%20Gerardo%3b%20Morales%20Ruiz%2c%20 Jefferson.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/15351/Becerra%20Avila%2c%20Jorge%20Gerardo%3b%20Morales%20Ruiz%2c%20Jefferson.pdf?sequence=1&isAllowed=y) .
3. Becerra, M. at et.al.(2021).Tratamientos Térmicos.TEPEXI,8(15).41-44. Recuperado de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/issue/archive>.
4. Bozidar Lisci'c, Hans M. Tensi at et.al. (2010). Quenching Theory and Technology, 2da. Edition, by Taylor and Francis Group, LLC. ISBN 978-0-8493-9279-5. Pag.328.
5. Castellanos, J., Montesino, M. (2007). Métodos Fundamentales de Análisis de los Procesos de Transmisión de Calor. Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente. Cienfuegos. Cuba: Editorial de Universidad de Cienfuegos.
6. Corace, J. (2009). Unidad V: Mecanismos de Transferencia de Calor. Física II. Recuperado de <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica2/U05.pdf>.
7. C.WEGST, M.WEGST. Key to Steels Database. s.l. : Verlag Stahleisen mbH, Dusseldorf, 2004. ISBN 3-922599-20-6. Llave de los aceros
8. Escuela Colombiana de Ingeniería. (2008). Tratamientos Térmicos. Recuperado de <https://docplayer.es/39777234-Tratamientos-termicos-protocolo-curso-de-materiales.html> .



9. Gustavo, G. (2015). Propuesta para el Diseño y Construcción de un Horno de Revenido de Baja Temperatura (Hasta 300 °C) para el Relevado de Esfuerzos. Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales). Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18549/25-1-16831.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
10. Jorge, M. (2016). Diseño y Construcción de una Máquina de Ensayo Jominy de Templabilidad para la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte. (Trabajo de Grado Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Mecatrónica). Ibarra, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/5359>.
11. Martín, A. (2011). Apuntes de Transmisión de Calor. Departamento de Física e Instalaciones. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de <http://oa.upm.es/6935/1/amd-apuntes-transmision-calor.pdf>.
12. Patiño, H; Rosero, B. (2016). Tratamiento térmico de temple, influencia del medio de enfriamiento. Ciencia e Ingeniería, 8(1). 52-58. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Hernan-Patino-Duque/publication/320295979\\_Tratamiento\\_termico\\_de\\_temple\\_influencia\\_del\\_medio\\_de\\_enfriamiento/links/59dc2421aca2728e20183ccf/Tratamiento-termico-de-temple-influencia-del-medio-de-enfriamiento.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Hernan-Patino-Duque/publication/320295979_Tratamiento_termico_de_temple_influencia_del_medio_de_enfriamiento/links/59dc2421aca2728e20183ccf/Tratamiento-termico-de-temple-influencia-del-medio-de-enfriamiento.pdf?origin=publication_detail).
13. Ruperto, J. y Sebastián, B. (2014). Diseño y Construcción de un Equipo Didáctico de Convección Forzada con Sistema de Control Centralizado para el Laboratorio de Transferencia de Calor. Quito, Ecuador. (Tesis en Opción al Título de Ingeniero Mecánico). Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7489/1/CD-5607.pdf>.
14. SolidWorks Corporation. (2016). Introduction to Simulation.
15. Solidworks Corporation. (2016). Solidworks Simulation Professional. (D. Systemes, Ed.) USA.
16. SolidWorks Corporation Dassault Systèmes. (2016). Diseño Innovador para el Diseño y Desarrollo de Productos.



17. SolidWorks Corporation Dassault Systèmes. (2018). Por qué Solidworks Flow Simulation es la Opción Perfecta para los Ingenieros de Product.
18. Villafruela, G. (2014). Influencia del temple por centrifugación sobre la dureza del acero para herramientas D2. (Tesis de Maestría). Universidad de Holguín, Holguín.
19. Villafruela, G. (2019). Temple por centrifugación para el acero AISI D2 a bajas temperaturas de austenización. Universidad de Holguín, Holguín.
20. Viada, R. (2020). Análisis de la influencia del enfriamiento en las herramientas para conformar en frío basado en CFD y FEM. (Tesis presentada en opción al título de ingeniero mecánico). Universidad de Holguín, Holguín.

