

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA UNIDAD DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA

Proyecto de Investigación y Desarrollo previo a la Obtención de Grado de Magister en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN SECADOR CILÍNDRICO ROTATIVO DE LA INDUSTRIA PAPELERA

Autores:

Jorge Antonio Pérez Torres Jhison Enrique Romero Romero

Director:

Paúl Bolívar Torres Jara

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN SECADOR CILÍNDRICO ROTATIVO DE LA INDUSTRIA PAPELERA

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN SECADOR CILÍNDRICO ROTATIVO DE LA INDUSTRIA PAPELERA

Autores:

JORGE ANTONIO PÉREZ TORRES

Ingeniero Mecánico Magister en Gerencia Empresarial con Mención en Marketing Egresado de la Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería Unidad de Posgrados Universidad Politécnica Salesiana

JHISON ENRIQUE ROMERO ROMERO

Ingeniero en Informática Magister en Educación Superior Egresado de la Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería Unidad de Posgrados Universidad Politécnica Salesiana

Dirigido por:

PAÚL BOLÍVAR TORRES JARA Ingeniero Mecánico Magister en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Mecánica



Unidad de Posgrados

Cuenca - Ecuador

2017

	Datos de catalogación bibliográfica	
PÉREZ-TORRES, Antonio & ROMERO-ROMERO, Jhison E.		
SIMULACIÓN COMPUTACIONAL TRANSFERENCIA DE CALOR DE U DE LA INDUSTRIA PAPELERA	DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y N SECADOR CILÍNDRICO ROTATIVO	
Universidad Politécnica Salesiana, Cuenc UNIDAD DE POSTGRADOS	ea – Ecuador 2017	
Formato 170 x 240	Pág. 126	

Breve reseña de los autores e información de contacto: Autores:



Jorge Antonio Pérez Torres

Ingeniero Mecánico Magister en Gerencia Empresarial con Mención en Marketing Egresado de la Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería – Unidad de Posgrados Universidad Politécnica Salesiana jperezt@ups.edu.ec



Jhison Enrique Romero Romero

Ingeniero en Informática Magister en Educación Superior Egresado de la Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería – Unidad de Posgrados Universidad Politécnica Salesiana jromeror@ups.edu.ec





Paúl Bolívar Torres Jara

Ingeniero Mecánico - Universidad Politécnica Salesiana Magister en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Mecánica Universidad de Santiago de Chile ptorresj@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. Se permite la libre distribución de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación de los autores.

DERECHOS RESERVADOS

© 2017 Universidad Politécnica Salesiana CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

PÉREZ-TORRES, Antonio & ROMERO-ROMERO, Jhison E. "SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN SECADOR CILÍNDRICO ROTATIVO DE LA INDUSTRIA PAPELERA"

IMPRESO EN ECUADOR - PRINTED IN ECUADOR

ÍNDICE GENERAL

Índice General	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	ix
Dedicatoria	xi
Prefacio	xiii
Prólogo	XV
Agradecimiento	. xvii
Capítulo 1: Planteamiento del Problema	19
1.1. Antecedentes	19
1.2. Justificación	20
1.3. Situación Actual del Problema	22
1.4. Definición de los límites de interés de la propuesta	24
Capítulo 2: Bases Teóricas	25
2.1. Bases teóricas de Esfuerzo-Deformación	25
2.1.1. Principios básicos de la resistencia de materiales	26
2.1.2. Concepto de Esfuerzo-Deformación por carga axial	27
2.1.3. Prueba para determinar resistencia, rigidez y ductilidad	30
2.1.4. Leyes de esfuerzos	31
2.1.5. Teorías de falla bajo cargas estáticas	33
2.1.6. Diseño con factores de carga y resistencia (LRFD) y diseño por esfuerzo permisible (ASD)	34
2.2. Bases teóricas de mecánica de fluidos	35
2.2.1. Ecuación diferencial de la cantidad de movimiento, Navier- Stokes	36

2.3. Bases teóricas de transferencia de calor	37
2.3.1. Sistemas, contornos y entorno	38
2.3.2. Modos de transferencia de calor	40
2.4. Bases teóricas de Modelamiento y Simulación	43
2.4.1. La teoría de la simulación y el modelado	44
2.4.2. Ejecución de un proceso de simulación	46
2.4.3. Modelado	48
2.5. Método de los elementos finitos	49
2.5.1. Los elementos finitos como herramienta de análisis	50
2.5.2. Descripción matemática del MEF	54
2.5.3. El MEF en la práctica	54
2.5.4. Etapas básicas en la utilización del método de elementos finitos	55
2.5.5. Criterios de convergencia en el MEF	56
Capítulo 3: Diseño e Implementación	57
3.1. Fase del Pre - Proceso	57
3.1.1. Definición y aplicación del método	58
3.1.2. Establecer la geometría, condiciones de contorno y especificaciones de operación y funcionamiento.	61
3.1.3. Modelo discreto, tipo y forma de la malla	66
3.2. Fase del Proceso - Desarrollo del modelo matemático	75
2.2.1 The set of the second of the distance is the second state of the second s	
3.2.1. Teoria de la energía de distorsion para materiales ductiles	76
 3.2.1. Teoría de la energía de distorsion para materiales ductiles 3.2.2. Modelo matemático en mecánica de fluidos para el vapor - Ecuaciones de Navier-Stokes (N-S) 	76 78
 3.2.1. Teoría de la energía de distorsion para materiales ductiles 3.2.2. Modelo matemático en mecánica de fluidos para el vapor - Ecuaciones de Navier-Stokes (N-S) 3.2.3. Modelo matemático de balance de energía y transferencia de calor 	76 78 79
 3.2.1. Teoría de la energía de distorsion para materiales ductiles 3.2.2. Modelo matemático en mecánica de fluidos para el vapor - Ecuaciones de Navier-Stokes (N-S) 3.2.3. Modelo matemático de balance de energía y transferencia de calor Capítulo 4: Validación de la Propuesta 	76 78 79 83
 3.2.1. Teoría de la energía de distorsion para materiales ductiles 3.2.2. Modelo matemático en mecánica de fluidos para el vapor - Ecuaciones de Navier-Stokes (N-S)	76 78 79 83 83
 3.2.1. Teoría de la energía de distorsion para materiales ductiles 3.2.2. Modelo matemático en mecánica de fluidos para el vapor - Ecuaciones de Navier-Stokes (N-S)	76 78 79 83 83 84

4.2.2. Esfuerzos de Von-Mises - Equivalent (von Mises)	85
4.2.3. Deformación Elástica Equivalente - Equivalent Elastic Stra	<i>in</i> 87
4.2.4. Vector Principal de Esfuerzos - Vector principal stress	88
4.3. Análisis Térmico	88
4.3.1. Transferencia de calor - Temperature	89
4.3.2. Flujo de calor - Total Heat Flux	90
4.4. Análisis del Fluido	91
4.4.1. Viscosidad - Eddy Viscosity	91
4.4.2. Distribución de la temperatura en el fluido - Temperature	92
4.4.3. Presión del Fluido - Pressure	93
4.5. Análisis de convergencia	93
4.6. Validación del proceso de simulación	96
4.6.1. Validación 1 – Vista lateral	97
4.6.2. Validación 2 – Tapa del cilindro	98
4.6.3. Validación 3 – Entrada del vapor	99
4.6.4. Validación 4 – Entrada del vapor	100
4.7. Cálculo de factor de servicio según método ASD	101

Conclusiones	103
Recomendaciones	105
Glosario de Términos	106
Anexos	107
Bibliografía	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Sección de secado – Industria Papelera19
Figura 2.	Esquema para la producción de papel21
Figura 3.	Eje del secador cilíndrico21
Figura 4.	Secador Cilíndrico vistas laterales de los soportes
Figura 5.	Ruptura en los ejes del secador cilíndrico23
Figura 6.	Barra sometida a una fuerza axial de tracción29
Figura 7.	Curva resultante del esfuerzo y la deformación unitaria30
Figura 8.	Componentes de esfuerzo en coordenadas cartesianas
Figura 9.	Fuerzas que actúan sobre una partícula infinitesimal de fluido37
Figura 10.	Sistema, contorno y entorno
Figura 11.	Transferencia de calor por conducción de calor a través de una pared plana41
Figura 12.	Transferencia de calor por conducción de calor a través de una pared plana42
Figura 13.	Proceso de discretización
Figura 14.	Elemento Finito Lineal
Figura 15.	Elemento Finito Bidimensional
Figura 16.	Elemento Finito Tridimensional a) hexaedro b) tetraedro
Figura 17.	Ejemplos de discretización
Figura 18.	Cilindro con malla y detalle de un elemento con sus nodos
Figura 19.	Diagrama del proceso de aplicación del MEF57
Figura 20.	Región sometida a tensión plana dividida en elementos finitos, coordenadas nodales y desplazamientos de los nodos
Figura 21.	Plano del secador cilíndrico de la industria papelera61

Figura 22.	Plano del secador cilíndrico de la industria papelera	62
Figura 23.	Secador cilíndrico rotativo con sus respectivas tapas	64
Figura 24.	Cuerpo unificado del secador cilíndrico rotativo	64
Figura 25.	Secador cilíndrico rotativo simplificadas las geometrías y exteriores (65
Figura 26.	Sección angular del secador cilíndrico rotativo incluido el vapor de agua	65
Figura 27.	Geometría del vapor (cavidad interna del cuerpo cilindro)	66
Figura 28.	Ejemplo de Mallado a) Ajustado al cuerpo b) Coordenadas cartesianas cilíndricas	0 67
Figura 29.	Sección angular del secador cilíndrico rotativo importado	68
Figura 30.	Sección angular con la herramienta match control	68
Figura 31.	Condiciones iniciales de los contactos del eje geometría del secador cilíndrico	6 9
Figura 32.	Condiciones de frontera del eje de giro y velocidad de rotación	69
Figura 33.	Condiciones de frontera para la presión Interna	70
Figura 34.	Condiciones de frontera por convección	70
Figura 35.	Características del Malladado Grueso del cilindro	72
Figura 36.	Características del Malladado Fino del cilindro	72
Figura 37.	Malladado fino con acercamiento del secador cilíndrico	73
Figura 38.	Características del Malladado Grueso del vapor	74
Figura 39.	Características del malladado fino del vapor	74
Figura 40.	Malladado fino con acercamiento del del Vapor	75
Figura 41.	Energía de distorsión	76
Figura 42.	Deformación del cilindro – Vista 3D	84
Figura 43.	Deformación del cilindro – Vista 2D	85
Figura 44.	Esfuerzo de Von Mises del cilindro – Vista 3D	86
Figura 45. _{vi}	Acercamiento del eje– Vista 3D	86

Figura 46.	Esfuerzo de Von Mises vista frontal – Vista 2D	86
Figura 47.	Deformación elástica del cilindro– Vista 2D	87
Figura 48.	Deformación elástica del cilindro – Vista 3D	87
Figura 49.	Vector principal de esfuerzo malla gruesa – Vista 3D	88
Figura 50.	Vector principal de esfuerzo malla fina – Vista 3D	88
Figura 51.	Distribución Temperatura en el cilindro - Vista 3D	89
Figura 52.	Distribución Temperatura en el cilindro - Vista 2D	90
Figura 53.	Flujo del Calor en el cilindro – 3D	90
Figura 54.	Flujo del Calor en el cilindro – 3D	91
Figura 55.	Distribución Temperatura en el cilindro - Vista 2D	92
Figura 56.	Distribución de la temperatura el flujo del vapor – 2D	92
Figura 57.	Capa limite vista superior y en 3D	93
Figura 58.	Presión del vapor al interior del cilindro	93
Figura 59.	Convergencia malla fina 9000 iteraciones	94
Figura 60.	Convergencia malla fina con 500 iteraciones	94
Figura 61.	Convergencia de la Deformación Total	95
Figura 62.	Cámara Termográfica Testo 882	96
Figura 63.	Imagen Rea Vista lateral del cilindro	97
Figura 64.	Imágenes cámara Termográfica vs Simulación Ansys – Vista Lateral	97
Figura 65.	Imagen Rea Vista lateral del cilindro	98
Figura 66.	Imágenes de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – Tapa del cilindro	98
Figura 67.	Imagen Real Vista lateral de la entrada del vapor	99
Figura 68.	Imágenes de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – entrada del vapor10	00
Figura 69.	Imagen Real entrada del vapor210	00

Figura 70.	Imágenes de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – entrada del	
	<i>vapor2</i> 1	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficiente de conductividad térmica k de algunos materiales.	41
Tabla 2. Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección h	43
Tabla 3. Características físicas del secador cilíndrico rotativo	61
Tabla 4. Especificaciones del material	62
Tabla 5. Características del vapor	63
Tabla 6. Datos estadísticos del mallado grueso de la geometría del cilindro	72
Tabla 7. Datos estadísticos del mallado fino de la geometría del cilindro	73
Tabla 8. Datos estadísticos del mallado grueso del vapor	74
Tabla 9. Datos estadísticos del mallado fino del vapor	75
Tabla 10. Datos de la deformación del cilindro	84
Tabla 11. Datos del Esfuerzo de Von Mises del cilindro	85
Tabla 12. Datos de la deformación elástica del cilindro	87
Tabla 13. Datos de la distribución de temperatura	89
Tabla 14. Datos del flujo del calor	90
Tabla 15. Viscosidad del flujo del vapor	91
Tabla 16. Deformación Total, nodos y número de elementos para la convergencia.	95
Tabla 17. Características de la cámara termográfica	96
Tabla 18. Comparación de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – Vista Lateral	98
Tabla 19. Comparación de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – Tapa del cilindro	99
Tabla 20. Comparación de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – entrada del vapor	.100
Tabla 21. Comparación de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – entrada del vapor 2	.101

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación va dedicado a mi madre Ana Lucía quien ha sido un pilar fundamental en mi desarrollo tanto personal como profesional, también lo dedico a mi esposa Priscila y mis hijos Cisne y Toño quiénes me han apoyado de manera incondicional en el transcurso de esta maestría

Toño Pérez

Este trabajo de investigación se lo dedico a quiénes supieron guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento, MI FAMILIA.

Jhison Romero

PREFACIO

El método de elementos finitos (MEF) se ha convertido en la actualidad en una herramienta numérica indispensable, no sólo en el área de la ingeniería de diseño; si no también en muchas otras áreas de las ciencias en general. Los sistemas computacionales basados en esta técnica numérica son usados de manera frecuente en investigación y en la solución de innumerables problemas relacionadas con procesos mecánicos de medios continuos, en múltiples aplicaciones como el campo estructural, térmico, dinámica de fluidos, etc.

Este método es el motor principal que conduce esta investigación, la cual surgió de la necesidad por ahondar sobre los procesos de esfuerzo – deformación y transferencia de calor que se dan en los cilindros rotativos del proceso de secado de la industria papelera, la cual incluye procesos de producción, que van desde la producción de la materia prima hasta el proceso de embalaje y cortado del papel, atravesando por procesos como el prensado y el secado.

El presente trabajo investigativo asume el reto que radica en la necesidad de realizar una simulación computacional de esfuerzo-deformación y transferencia de calor de un secador cilíndrico rotativo de la industria papelera por medio de la simulación computarizada con herramientas CAD (*Computer Aided Desing*) – CAE (*Computer Aided Engineering*), de Esfuerzo-Deformación y Transferencia de Calor, que permitan establecer las condiciones óptimas de funcionamiento del proceso de secado, y establecer posibles zonas críticas, precisando los valores de las propiedades que se ingresan en el proceso de simulación.

Cabe puntualizar que este proyecto ha sido apoyado con los fondos de la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca, bajo la dirección del Magister Paúl Bolívar Torres Jara, investigador de la Institución.

Finalmente acotaremos que el trabajo será desarrollado en el software *ANSYS 17.0 Academic* 17.0; los resultados del mismo, y el procedimiento empleado serán base para futuras investigaciones en el campo del análisis estructural, transferencia de calor de equipos mecánicos sometidos a rotación.

PRÓLOGO

En este trabajo investigativo se abarca el tema "Simulación computacional de esfuerzo-deformación y transferencia de calor de un secador cilíndrico rotativo de la industria papelera", donde encontrará información actualizada sobre los principios básicos del esfuerzo deformación, transferencia de calor, procesos de modelado y simulación y análisis de convergencia.

Otro aspecto relevante en la presente investigación es la asimilación del conocimiento del Método de los Elementos Finitos, en el proceso simulación del secador cilíndrico rotativo, donde se describe cada una de las fases como lo son el pre proceso, proceso y post proceso.

La descripción de las fases implica documentar los pasos que se siguen para la construcción de los elementos, su simplificación, asignación de las condiciones de frontera y la generación de la malla y su posterior refinamiento, hasta ajustarla para que resuelva el problema de simulación planteado.

Otro aspecto que considerar en la descripción de las fases es el establecimiento del modelo matemático que se ajusta a las condiciones de funcionamiento del secador cilíndrico rotativo, considerando la teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles, análisis diferencial de la cantidad de movimiento del vapor mediante el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes, balance de energía y transferencia de calor.

Posteriormente se simula realizando actividades de forma iterativa y refinando el mallado hasta determinar resultados óptimos con la ayuda del módulo *Workbeanch*, del *ANSYS 17.0 Academic*, que soporta esta actividad, y finalmente el post-procesamiento permite el análisis de los resultados, para una posterior validación tomando datos del equipo real mediante una cámara termográfica de propiedad de la universidad.

Las conclusiones que se presentan al final son la recopilación de los resultados obtenidos, dejando abierta la posibilidad de futuras investigaciones en el campo del análisis estructural y trasferencia de calor en equipos sometidos a rotación.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo es el resultado del esfuerzo conjunto de quienes al final suscriben, pero junto a nosotros hubo un contingente de personas que apoyaron cada una de nuestras actividades. Es Por ello que agradecemos a nuestro director, Ing. Paúl Bolívar Torres Jara, Mgs. Quien con su ayuda desinteresada, nos brindó información relevante, de cómo organizar los procesos investigativos de este trabajo que ha finalizado llenando todas nuestras expectativas.

A nuestras familias y amigos quienes a lo largo de toda el proceso han apoyado y motivado los procesos de formación nuestra y siempre han creído en nosotros y sin dudar de nuestras habilidades. A nuestros docentes a quienes les debemos gran parte de los conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza; finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa Universidad representada por sus directivos la cual abrió las puertas y ha hecho posible este proceso de mejoramiento académico.

Jorge Antonio y Jhison Enrique

CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

La producción de papel atraviesa por diversos procesos, desde el procesamiento de la madera, obtención de la pasta (producción de celulosa), prensado, fase de secado, recubrimiento, calandria, proceso del tambor enrollador, la cortadora de rollos y finalmente el embalaje e identificación de los rodillos cortados a un determinado formato.

De esta serie de procesos, en la sección de prensas se recibe la hoja de papel donde se realiza la eliminación del agua en su gran mayoría. La hoja de papel, todavía con un alto contenido de agua, atraviesa una serie de grandes rodillos de acero que la comprimen, expulsando así una mayor cantidad de agua. La hoja de papel se sujeta a modo de "sándwich" entre capas de filtro absorbente al pasar por entre los rodillos. El fieltro actúa como un papel secante en la absorción de agua, mientras que unas cajas de vacío extraen el agua de los filtros antes de volver a encontrarse con la hoja de papel. Al final de la sección de prensado, el grado de sequedad se sitúa sobre el 40-50%. La hoja de papel ya puede sostenerse por sí misma.

Posteriormente se pasa a la sección de secado, donde es necesario fijar el grado final de humedad eliminando el sobrante de agua por evaporación. La sección de secado consta de una serie de cilindros calentados mediante vapor sobre los que pasa la hoja de papel (Figura 1).





Fuente: Tomado de https://goo.gl/ebKmA3

Los cilindros se disponen de modo que contactan primero con un lado del papel y luego con el otro para garantizar su homogénea deshidratación. La hoja de papel puede apoyarse durante esta fase o bien soportarse por sí misma, en función del diseño del equipamiento. El apoyo mejora el contacto y la transferencia de calor, al tiempo que facilita una alta velocidad operacional.

En la actualidad la industria papelera debe centrarse en la eficiencia de procesos, la fiabilidad de las máquinas y en todos los factores que afectan a la productividad y la rentabilidad.

1.2. Justificación

El sector industrial como generador de empleo y fuente de divisas está en permanente crecimiento volviéndose cada vez más competitivo, debido a este desarrollo es necesario el uso de herramientas que faciliten mediante el análisis de problemas reales la toma de decisiones al personal encargado de las áreas de ingeniería.

En general, en la fabricación de papel existen las siguientes partes (Chu, Forbes, Backstrom, Gheorghe & Chu, 2011):

- 1. Cajón de entrada: La pasta acuosa que contiene las fibras cae sobre una tela móvil donde se produce la formación de la hoja por el entrecruzamiento de las fibras.
- 2. Tela: El exceso de agua de la pasta acuosa se elimina a través de la tela por gravedad y vacío.
- 3. Prensas Secadoras: La hoja de papel pasa por prensas que por presión y succión eliminan parte del agua.
- 4. Cilindros Secadores: La hoja de papel húmeda pasa por distintos grupos de cilindros secadores que por calor la secan.
- 5. Monolúcido: Es un cilindro de gran diámetro cuya función es la de entregar una cara del papel más lisa y brillante.
- 6. Prensa Encoladora: El papel recibe un baño de almidón con el cual se sella la superficie de éste.
- 7. Lisa: Son rodillos de acero por los cuales pasa el papel proporcionándole tersura y un espesor homogéneo al ancho.

8. Bobinadora: El papel se enrolla en el pope de la máquina para luego ser bobinado y/o cortado a las medidas requeridas.





Fuente: (Chu et al, 2011).

Una de las áreas críticas que se presenta en el sector de la industria papelera, como se mencionó en los antecedentes es en el proceso de secado del papel, puntualmente los fallos que se evidencian en los cilindros rotativos (Figura 3), estos fallos pueden suscitarse debido a las cargas cíclicas a las cuales está sometido el equipo durante su funcionamiento, o debido a las condiciones de temperatura, es por esto que, se pretende desarrollar un análisis de esfuerzo – deformación y transferencia de calor permitiéndose así identificar las condiciones reales de funcionamiento de dichos equipos.





Fuente: Los Autores.

Entonces, el problema de estudio de la presente investigación, radica en "La necesidad de realizar una simulación computacional de esfuerzo-deformación y transferencia de calor de un secador cilíndrico rotativo de la industria papelera por medio de la simulación computarizada con herramientas CAD (*Computer Aided Desing*) – CAE (*Computer Aided Engineering*), de Esfuerzo-Deformación y Transferencia de Calor".

Se acota también que existe la factibilidad económica que permite financiar la movilidad hacia la industria papelera, para el establecimiento de las condiciones iniciales y las pruebas finales de la aplicación informática con el fin de proponer mejorías, en este mismo orden es factible operacionalmente, pues se cuenta con los conocimientos necesarios para el desarrollo del proceso de modelamiento y simulación del problema propuesto, así como un ambiente propicio para llevar a cabo el proyecto de investigación; finalmente, existe la factibilidad tecnológica pues la Universidad Politécnica Salesiana cuenta con las licencias del software *ANSYS 17.0 Academic*¹, donde se ejecutará el Pre Proceso, Proceso y Post Proceso de la simulación computarizada.

Posterior al proceso de simulación computarizada, se desarrollará la validación de los datos tomados del software, comparándolos con los datos extraídos del equipo en funcionamiento en la planta papelera.

1.3. Situación Actual del Problema

La industria papelera tiene varios años de funcionamiento en el Ecuador una de las primeras plantas se implementó en el año 1961 con la empresa Papelera Nacional S.A. en la ciudad de Guayaquil; actualmente este sector industrial se ha instalado en diferentes ciudades del país. En la ciudad de Cuenca que es donde se desarrolla el presente proyecto de investigación la industria papelera tiene sus inicios en 1989, con una planta destinada a producir y comercializar papel *kraft, liner* y corrugados medios.

En este sector industrial, el área de secadores (Figura 4) es considerada crítica y debido a las condiciones de funcionamiento se genera un entorno agresivo para los componentes de este tipo de equipos debido a las altas temperaturas y esfuerzos que generan desalineación y la expansión axial resultado de la variación de la velocidad del equipo.

¹ ANSYS es el líder mundial en procesos de simulación de ingeniería, es un ecosistema de programas CAE para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos (FEA).

Figura 4. Secador Cilíndrico vistas laterales de los soportes



a) Ingreso del Vapor



b) Soporte de Giro

Fuente: Los autores

El tipo de secador utilizado en la industria local es del tipo cilíndrico rotativo que utiliza vapor como fuente de calor, que mediante un proceso de transferencia de calor permite el secado del papel; estos secadores son considerados equipos robustos por sus dimensiones, sin embargo, se han presentado varios casos de la ruptura del eje (Figura 5), esta fractura deriva en la disminución de la productividad, así como la erogación de dinero en actividades de mantenimiento.

Figura 5. Ruptura en los ejes del secador cilíndrico





Fuente: Los Autores.

Sobre la base de estos antecedentes, es necesario realizar un análisis de los componentes del equipo en esta sección, puntualizándolo en la incidencia de la transferencia de calor y el esfuerzo-deformación que se dan en el secador cilíndrico rotativo.

1.4. Definición de los límites de interés de la propuesta

El alcance del presente proyecto se centra en:

- Realizar el pre-proceso de la simulación, definiendo y simplificando la geometría del equipo, así como indicando las condiciones de operación y funcionamiento, estableciendo puntos críticos para desarrollar el mallado inicial su refinamiento y relevancia con la ayuda de herramientas informáticas CAD – CAE.
- Identificar las ecuaciones de esfuerzo-deformación, balance de energía y transferencia de calor que intervienen en el análisis numérico del secador cilíndrico rotativo.
- Establecer el modelo matemático que se ajusta a las condiciones de funcionamiento del secador cilíndrico rotativo, considerando la teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles, análisis diferencial de la cantidad de movimiento del vapor mediante el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes y el balance de energía y transferencia de calor.
- Establecer el tipo de simulación que se va a realizar, bien sea permanente o trascendente.
- Simular por medio del método de elementos finitos (MEF) o FEA (*Finite Element Analisis*), sobre la base de las condiciones de operación y funcionamiento que consideran las cargas de esfuerzo-deformación y temperaturas debido a la transferencia de calor; realizando actividades de forma iterativa y refinando el mallado hasta determinar resultados óptimos con la ayuda del software ANSYS Workbeanch² que soporta esta actividad.
- Realizar el post-procesamiento en ANSYS *Workbeanch CFX*³. Analizar los resultados obtenidos, para una posterior validación tomando datos del equipo real mediante una cámara termográfica.

² Es una plataforma de software desde donde se crean los proyectos de análisis CAE en diferentes disciplinas, *Workbench* despliega gráficamente el intento de la simulación en ingeniería y se establecen las relaciones entre fenómenos físicos y sus módulos incluyendo multi física.

³ Ansys CFX se integra con la plataforma *Ansys Workbench* de forma bidireccional para compartir información de modelado y mallas.

CAPÍTULO 2 BASES TEÓRICAS

2.1. Bases teóricas de Esfuerzo-Deformación

Las propiedades mecánicas de un material permite diferenciarlo de otro ya sea por su composición, estructura o comportamiento cuando se encuentra expuesto a efectos físicos o químicos, las propiedades trabajan en dichos materiales de acuerdo a las necesidades en donde se enfoca a cabalidad, la exigencia creada.

Los materiales, cuando prestan servicio, están sometidos a fuerzas o cargas (Salazar Trujillo, 2007:92). Por esta razón es necesario conocer las características del material y el diseño de la pieza de tal manera que cualquier deformación resultante no sea excesiva y no se produzca la rotura. Así tenemos que:

El comportamiento mecánico o las propiedades mecánicas de un material reflejan la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material, o sea, su deformación. Algunas de las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia, la dureza, la ductilidad y la rigidez (Callister, 2007:114).

La mecánica de materiales es una rama de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a varios tipos de carga. De forma más general se comprende que este análisis lleva a determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones producidos por cargas en un cuerpo (Fitzgerald, 2007). Se puede sintetizar entonces que la mecánica de materiales se encarga del estudio de las deformaciones unitarias y desplazamientos que se dan en las estructuras y sus componentes debido a las cargas que actúan sobre ellas.

El tener certeza para identificar los valores de estas magnitudes para todos los valores de carga, incluso hasta la carga de falla, nos conlleva a tener un panorama completo del comportamiento mecánico de un cuerpo, y este conocimiento es fundamental para interpretar el diseño confiable de cualquier estructura. La respuesta de los materiales a las fuerzas aplicadas depende de (Pinto Ramírez, 2015):

- 1. Tipo de enlace.
- 2. Disposición estructural de los átomos o moléculas.
- 3. Tipo y número de imperfecciones, que están siempre presentes en los sólidos, excepto en raras circunstancias.

Aunque, se conoce la complejidad de los materiales que se utilizan en procesos de ingeniería, todos los materiales impuestos a cargas considerando el proceso mecánico que ocurre durante su deformación bajo las fuerzas aplicadas, se clasifican en tres:

- 1. Materiales Elásticos (los cristales iónicos y covalentes).
- 2. Materiales Elastoplásticos (los metales estructurales).
- 3. Materiales Viscoelásticos (los plásticos, los vidrios).

En este mismo contexto, los tipos básicos de deformación de los materiales como respuesta a las fuerzas aplicadas son tres: Elástico, plástico y viscoso

2.1.1. Principios básicos de la resistencia de materiales

Como lo mencionan los estudiosos de la resistencia de materiales (Badiola, 2004; Salazar Trujillo, 2007 y Imaz Gutiérrez, 2013), esta introduce hipótesis simplificativas, y a más de eso, ya se establecen algunas cuando se asume que el material de los sólidos elásticos tiene propiedades de homogeneidad, continuidad e isotropía.

Estas hipótesis se establecen y afianzan en el estudio del comportamiento de los materiales ante determinado tipo de solicitación.

En Resistencia de Materiales existen tres principios generales: el principio de rigidez relativa de los sistemas elásticos, el principio de superposición de efectos y el principio de Saint-Venant (Imaz Gutiérrez, 2013). Sin embargo, hay que mencionar que los principios son (Perelli Botello, 2017):

- a. Los materiales se consideran homogéneos (idénticas propiedades en todos los puntos): No se consideran las variaciones de composición que de punto a punto de los mismos tienen los materiales reales. El acero es un material altamente homogéneo; en cambio, la madera, el hormigón y la piedra son bastante heterogéneos. Sin embargo, los experimentos demuestran que los cálculos basados en esta hipótesis son satisfactorios
- b. Los materiales se consideran continuos: No se toma en cuenta en los análisis las discontinuidades o poros que presentan los materiales. El comportamiento real de los materiales cumple con esta hipótesis aun cuando pueda detectarse la presencia de poros o se considere la discontinuidad de la estructura de la materia, compuesta por átomos que no están en contacto rígido entre sí, ya que existen espacios entre ellos y fuerzas que los mantienen vinculados, formando una red ordenada.

- c. Los materiales se consideran isótropos: En los análisis generales no se tienen en cuenta las diferencias de propiedades en distintas direcciones del material. Esto significa que admitimos que el material mantiene idénticas propiedades en todas las direcciones.
- d. No se tienen en cuenta las fuerzas internas de tipo interatómico existentes en los materiales. Se consideran solamente los esfuerzos causadas por la aplicación de fuerzas externas. Las fuerzas interiores entre las partículas del material, cuyas distancias varían, se oponen al cambio de la forma y dimensiones del cuerpo sometido a cargas. Al hablar de fuerzas interiores no consideramos las fuerzas moleculares que existen en un sólido no sometido a cargas.
- e. Principio de superposición: los efectos de un sistema de fuerzas sobre un elemento son iguales a la suma de los efectos individuales de cada una de las fuerzas. Los desplazamientos de los puntos de aplicación de las fuerzas son pequeños en comparación con las dimensiones del sólido. Los desplazamientos que acompañan a las deformaciones del sólido dependen linealmente de las cargas. Estos sólidos se denominan "sólidos linealmente deformables".
- f. Principio de Saint Venant: Cuando a un elemento estructural se le aplica una fuerza, los esfuerzos que esta causa en puntos suficientemente alejados de ella, no dependen de la forma concreta en que la carga es aplicada.

Este principio establece que el valor de las fuerzas interiores en los puntos de un sólido, situados suficientemente lejos de los lugares de aplicación de las cargas, depende muy poco del modo concreto de aplicación de las mismas. Merced a este principio en muchos casos podremos sustituir un sistema de fuerzas por otro estáticamente equivalente, lo que puede conducir a la simplificación del cálculo.

g. Las cargas son estáticas o cuasi-estáticas: Las cargas se dicen que son estáticas cuando demoran un tiempo infinito en aplicarse, mientras que se denominan cuasi-estáticas cuando el tiempo de aplicación es suficientemente prolongado. Las cargas que se aplican en un tiempo muy reducido se denominan dinámicas, y las solicitaciones internas que producen son sensiblemente mayores que si fuesen estáticas o cuasi-estáticas.

2.1.2. Concepto de Esfuerzo-Deformación por carga axial

Cualquier fuerza externa que se aplique sobre una material causa deformación, la cual se define como el cambio de longitud a lo largo de la línea de acción de la fuerza

(Carmona, 2011). Para estudiar la reacción de los materiales a las fuerzas externas que se aplican, se utiliza el concepto de esfuerzo.

El esfuerzo: Posee las mismas unidades de la presión, es decir, unidades de fuerza por unidad de área. En el sistema métrico, el esfuerzo se mide en Pascales (N/m^2) . En el sistema inglés, en psi (lb/in^2) . En aplicaciones de ingeniería, es muy común expresar el esfuerzo en unidades de Kg /cm² (Vinnakota, 2006).

En este mismo contexto las fuerzas internas de un elemento están ubicadas dentro del material por lo que se distribuyen en toda el área; justamente se denomina esfuerzo a la fuerza por unidad de área, la cual se denota con la letra griega sigma (σ) y es un parámetro que permite comparar la resistencia de dos materiales, ya que establece una base común de referencia.

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{1}$$

Dónde:

- $P \equiv$ Fuerza axial;
- $A \equiv$ Área de la sección transversal

Deformación: La resistencia del material no es el único parámetro que debe utilizarse al diseñar o analizar una estructura; controlar las deformaciones para que la estructura cumpla con el propósito para el cual se diseñó tiene la misma o mayor importancia. El análisis de las deformaciones se relaciona con los cambios en la forma de la estructura que generan las cargas aplicadas (Vinnakota, 2006).

Una barra sometida a una fuerza axial de tracción aumentará su longitud inicial; se puede observar que, bajo la misma carga, pero con una longitud mayor este aumento o alargamiento se incrementará también. Por ello definir la deformación (ϵ) como el cociente entre el alargamiento δ y la longitud inicial L, indica que sobre la barra la deformación es la misma porque si aumenta L también aumentaría δ . Matemáticamente la deformación sería:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \tag{2}$$

Dónde:

- $\varepsilon \equiv$ Deformación unitaria
- $\delta \equiv$ Deformación Total
- $L \equiv$ Longitud Inicial





Fuente: (Carmona, 2011).

Deformación Simple: Se refiere a los cambios en las dimensiones de un miembro estructural cuando se encuentra sometido a cargas externas. Estas deformaciones serán analizadas en elementos estructurales cargados axialmente, por lo que entre las cargas a estudiar estarán las de tensión o compresión.

Deformación unitaria: Todo miembro sometido a cargas externas se deforma debido a la acción de fuerzas. La deformación unitaria, se puede definir como la relación existente entre la deformación total y la longitud inicial del elemento, la cual permitirá determinar la deformación del elemento sometido a esfuerzos de tensión o compresión axial.

Ahora bien, es necesario considerar que, para desarrollar un proceso de análisis y diseño más avanzado, con el objetivo de definir finalmente las dimensiones y el tipo de material del cual deberán hacerse los elementos estructurales, se hace necesario considerar las deformaciones que tendrán los elementos y la resistencia de los diferentes tipos de materiales (Beer, Russell Johnston, Dewolf & Mazurek, 2013).

Es entonces indispensable proceder a considerar las características de resistencia (oposición a la rotura) y rigidez (oposición a las deformaciones) que tendrán los diferentes elementos estructurales.

En otros términos, antes de construir una estructura es necesario saber la resistencia que tendrá y las deformaciones que sufrirá. Lo anterior es apenas obvio si consideramos que cualquier estructura debe satisfacer unas exigencias mínimas de seguridad (resistencia) y de funcionalidad y estética (mínimas deformaciones) (Salazar Trujillo, 2007).

2.1.3. Prueba para determinar resistencia, rigidez y ductilidad

El diseño de elementos estructurales implica determinar mediante la prueba de tensión la resistencia, rigidez, ductilidad, y tenacidad del material; esta prueba consiste en someter a una fuerza axial una probeta en una máquina de ensayos hasta que se produzca la fractura, en la prueba registra simultáneamente la fuerza aplicada y el alargamiento producido, valores que derivan en una curva denominada diagrama esfuerzo-deformación. Estos diagramas son similares si se trata del mismo material y de manera general permite agrupar los materiales dentro de dos categorías con propiedades afines que se denominan materiales dúctiles y materiales frágiles. Los diagramas de materiales dúctiles se caracterizan por ser capaces de resistir grandes deformaciones antes de la rotura, mientras que los frágiles presentan un alargamiento bajo cuando llegan al punto de rotura (Vinnakota, 2006).

Diagrama Esfuerzo-Deformación: El diagrama resultante graficado con los valores del esfuerzo y la correspondiente deformación unitaria en la probeta (Figura 7), calculado a partir de los datos de un ensayo de tracción se representan:



Figura 7. Curva resultante del esfuerzo y la deformación unitaria

Fuente: (Vinnakota,2006)
Las zonas del diagrama de esfuerzo-deformación según (McCormac y Csernak, 2012) se detallan a continuación:

- a) Límite de proporcionalidad: Se observa que va desde el origen O hasta el punto llamado límite de proporcionalidad, es un segmento de recta rectilíneo, de donde se deduce la tan conocida relación de proporcionalidad entre la tensión y la deformación enunciada en el año 1678 por Robert Hooke. Cabe resaltar que, más allá la deformación deja de ser proporcional a la tensión.
- b) **Límite de elasticidad o limite elástico:** Es la tensión más allá del cual el material no recupera totalmente su forma original al ser descargado, sino que queda con una deformación residual llamada deformación permanente.
- c) **Punto de fluencia:** Es aquel donde en el aparece un considerable alargamiento o fluencia del material sin el correspondiente aumento de carga que, incluso, puede disminuir mientras dura la fluencia. Sin embargo, el fenómeno de la fluencia es característico del acero al carbono, mientras que hay otros tipos de aceros, aleaciones y otros metales y materiales diversos, en los que no se manifiesta.
- d) **Esfuerzo máximo:** Es la máxima ordenada en la curva esfuerzo-deformación.
- e) **Esfuerzo de Rotura:** Verdadero esfuerzo generado en un material durante la rotura.

Para entender a la perfección el comportamiento de la curva Esfuerzo-Deformación unitaria, se debe tener claro los conceptos que hacen referencia a las propiedades mecánicas de los materiales que describen como se comporta un material cuando se le aplican fuerzas externas, y a las diferentes clases de estas mismas a las cuales pueden ser sometidos (Perelli Botello, 2017).

2.1.4. Leyes de esfuerzos

Al trabajar en la obtención de los esfuerzos, es necesario identificar las leyes que se deben seguir, de esta forma se describen las siguientes (Perelli Botello, 2017):

a) Momentos flectores

- En tramos no cargados, la ley de momentos flectores es lineal.
- En las rótulas, el momento flector es nulo.

- En puntos donde hay aplicada una carga puntual no paralela a la directriz, aparece un pico en la ley de momentos flectores.
- En las secciones donde existe un momento exterior aplicado, aparece un salto en la ley de momentos flectores de igual valor al del momento exterior aplicado.
- Cuando hay una carga uniformemente repartida no paralela a la directriz, la ley de momentos flectores es parabólica de segundo grado en el tramo donde actúa dicha carga.

b) Esfuerzos Cortantes por flexión

- Para obtener la ley de esfuerzos cortantes, se proyectan las cargas exteriores y las reacciones en sentido perpendicular a la directriz, en cada barra de la estructura.
- Ley de cortantes = Pendiente de la ley de momentos flectores.

$$Q = \frac{-dMf}{ds} \tag{3}$$

- En secciones donde hay aplicada una carga puntual perpendicular a la directriz, aparece un salto en la ley de cortantes de igual valor.
- En los tramos donde existe una carga uniformemente repartida en sentido perpendicular a la directriz, la ley de esfuerzos cortantes es lineal.
- En los apoyos, el valor de la ley de cortantes es igual a la proyección de la reacción en sentido perpendicular a la directriz.
- Si existe un momento exterior aplicado, la ley de cortantes no varía en dicho punto.
- Si hay un cambio de dirección en la estructura, se produce un salto en la ley de cortantes de valor igual al cambio de la proyectada en sentido perpendicular a la directriz.

c) Axiales

- Para obtener la ley de esfuerzos axiles, se proyectan las cargas exteriores y las reacciones sobre la directriz de cada barra.
- Cuando hay una carga puntual aplicada en una sección, se produce en dicha sección un salto en la ley de axiales de igual valor a la proyección de la carga sobre la directriz.

- Si hay una carga exterior uniformemente repartida en sentido de la directriz, la ley de axiales es lineal.
- Si hay un cambio de dirección en la estructura, se produce un salto en la ley de axiales de igual magnitud que el cambio de la proyectada sobre la directriz.

2.1.5. Teorías de falla bajo cargas estáticas

La falla es la pérdida de función de un elemento tanto por deformación (fluencia) como por separación de sus partes (fractura). Los mecanismos de falla dependen de la estructura microscópica del material y de la forma de sus enlaces atómicos. Para predecir la falla de materiales bajo cargas estáticas (se considera carga estática a aquella que no varía su magnitud ni dirección en el tiempo) y poder hacer diseños de elementos de máquinas confiables se han desarrollado varias teorías para grupos de materiales, basándose en observaciones experimentales (Budynas & Nisbett, 2012).

Las teorías de falla se dividen en dos grupos, para materiales dúctiles y materiales frágiles, con respecto al trabajo de investigación, se consideran las teorías de fallas referentes a los materiales dúctiles, las cuales son:

- Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo (Teoría de Tresca)
- Teoría de la Energía de Distorsión (Teoría de Von Mises)
- Teoría de la Fricción Interna (Coulomb-Mohr Ductil)

Para el proceso investigativo, del presente proyecto de maestría, se considera el estudio de la Teoría de Von Mises, también conocida como teoría de la energía de distorsión.

2.1.5.1. Teoría de la energía de distorsión de Von Mises

Propuesta por R. Von Mises al observar que los materiales bajo esfuerzos hidrostáticos soportan esfuerzos mucho mayores que sus esfuerzos de fluencia bajo otros estados de carga (Shigley, Mischke, Bocanegra & Correa, 1990). La teoría establece:

"La falla se producirá cuando la energía de distorsión por unidad de volumen debida a los esfuerzos máximos absolutos en el punto crítico sea igual o mayor a la energía de distorsión por unidad de volumen de una probeta en el ensayo de tensión en el momento de producirse la fluencia" (Shigley, Mischke, Bocanegra, & Correa, 1990:316).

El principio de la máxima energía de distorsión, la formuló en un principio Maxwell en 1865 y más tarde también fue mencionado por Huber en 1904. No obstante, el trabajo Richard Von Mises (1913) dio notoriedad al criterio; a esta teoría también se la conoce como:

- Teoría de fallo elástico basada en la tensión de Von Mises
- Teoría de Maxwell-Huber-Hencky-Von Mises.

2.1.5.2. Tensión de Von Mises

Al hablar de la tensión de *Von Mises*, se hace referencia a una magnitud física proporcional a la energía de distorsión o deformación. Esta teoría está basada en los estudios realizados por Von Mises a una esfera maciza, idealmente homogénea e isótropa e hidrostáticamente comprimida y realizándole así el estudio de los esfuerzos que actuaban sobre ésta, que lo conllevaría posteriormente a plantear las ecuaciones (Badiola, 2004).

La energía de deformación se compone de la energía de deformación (cambio de volumen) y de la distorsión. La falla ocurre si la energía de distorsión por volumen unitario excede la correspondencia a una prueba de tensión unitaria en la falla. Los esfuerzos principales se componen de esfuerzos que producen cambio de volumen y cambio de distorsión (Budynas & Nisbett, 2012).

2.1.6. Diseño con factores de carga y resistencia (LRFD) y diseño por esfuerzo permisible (ASD)

Existen dos métodos aceptables para diseñar elementos de acero estructural; el primero es el diseño con factores de carga y resistencia (LRFD) por sus siglas en inglés y el diseño por esfuerzos permisibles (ASD) por sus siglas en inglés, los dos procedimientos se fundamentan en los principios del diseño de estados límite, el cual proporciona las condiciones de frontera de la utilidad estructural; estado límite se subdivide en los de resistencia y los de servicio (McCormac y Csernak, 2012). Las principales diferencias entre el método LRFD y ASD son:

- Método que se utiliza para calcular las cargas de diseño y uso de los factores de resistencia (φ) en el método LRFD.
- Factores de seguridad (Ω) en el método ASD.

2.1.6.1. Combinaciones de carga para el método (LRFD).

Con este método se forman posibles cargas de servicio y cada una se multiplica por un factor de carga mayor a 1; la combinación lineal resultante de las cargas de servicio multiplicado por su factor de carga se llama carga factorizada, los valores mayores se utilizan para calcular momentos, esfuerzos cortantes y otras fuerzas en la estructura, estos valores no deben ser mayores que la resistencia nominal multiplicada por los factores de resistencia (ϕ), los factores de seguridad han sido incorporados en los factores de carga. (McCormac y Csernak, 2012).

$$(\phi)(Rn) \ge Ru \tag{4}$$

Dónde:

- Φ = Factor de resistencia o reducción
- Rn = Resistencia nominal
- Ru = Fuerza factorizada

2.1.6.2. Combinaciones de carga para el método (ASD)

Con este método las cargas de servicio se acumulan para diversas combinaciones factibles y los valores mayores se utilizan para calcular las fuerzas en los miembros, estas fuerzas totales no deben ser mayores que las resistencias nominales divididas por factores de seguridad apropiados (Ω). (McCormac y Csernak, 2012).

$$\frac{Rn}{\Omega} = Ra \tag{5}$$

Dónde:

- Rn = Resistencia nominal
- Ω = Factor de seguridad
- Ra = Mayor fuerza calculada.

2.2. Bases teóricas de mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos es la rama de la física comprendida dentro de la mecánica de medios continuos que estudia el movimiento de los fluidos (gases y líquidos) así como las fuerzas que lo provocan (Mott, 1996). La característica fundamental que define a los fluidos es su incapacidad para resistir esfuerzos cortantes (lo que provoca que carezcan de forma definida). También estudia las interacciones entre el fluido y el contorno que lo limita.

2.2.1. Ecuación diferencial de la cantidad de movimiento, Navier-Stokes

Es una ecuación vectorial, la cual nos proporciona tres ecuaciones escalares. Estas ecuaciones de componentes ayudan a determinar los campos de velocidad y de presión, sin embargo, existe una dificultad ya que se deben usar las componentes de esfuerzo para determinar las fuerzas requeridas en la ecuación de la cantidad de movimiento (Fox, McDonald, Cázares & Callejas, 1995).

Estos componentes son nueve, que actúan en un punto particular en el flujo de fluido. Tienen una forma de elementos rectangulares en dos y tres dimensiones figura 8. (Potter, Wiggert & Ramadan, 2015).



Figura 8. Componentes de esfuerzo en coordenadas cartesianas

Fuente: (Potter, Wiggert & Ramadan, 2015).

Los esfuerzos pueden ser normales o cortantes, depende si es tangencial o perpendicular a una cara, al ser nueve los componentes y tratando de deducir la ecuación diferencial de la cantidad de movimiento, considere las fuerzas que actúan en la partícula infinitesimal de fluido (Figura 9), se muestran solo las fuerzas que actúan solo en las caras positivas (Bursztyna, Oteroa & Quinterosa, 2008).

Basado en la formulación general, menciona Batchelor (2000), que las ecuaciones de Navier-Stokes (N-S) modelan el comportamiento de cualquier tipo de fluido mediante la conservación de 3 cantidades, a saber: masa, cantidad de movimiento y energía. A comienzos de la era de la computación estos modelos no podían ser utilizados en simulaciones, dados su alta complejidad computacional, en su lugar se utilizaron modelos de flujo potencial y posteriormente descripciones Eulerianas. Conforme la tecnología de las computadoras fue evolucionando, estos modelos comenzaron a utilizarse cada vez con más frecuencia hasta resultar natural hoy en día simular

complejos sistemas en donde los fluidos son resueltos por una formulación de Navier-Stokes (N-S)



Figura 9. Fuerzas que actúan sobre una partícula infinitesimal de fluido

Las ecuaciones de N-S conforman un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDE) no lineales, es por ello que (a excepción de casos muy simples) no se tienen soluciones analíticas conocidas. La necesidad de una resolución numérica resulta evidente, luego grandes esfuerzos se han (aún continúan y continuarán) realizado con el objetivo de mejorar las soluciones obtenidas tanto en tiempo como en precisión.

Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido. Haciendo esto se obtiene la llamada formulación integral de las ecuaciones. Para llegar a su formulación diferencial se manipulan aplicando ciertas consideraciones, principalmente aquella en la que los esfuerzos tangenciales guardan una relación lineal con el gradiente de velocidad (ley de viscosidad de Newton), obteniendo de esta manera la formulación diferencial que generalmente es más útil para la resolución de los problemas que se plantean en la mecánica de fluidos (Potter, Wiggert & Ramadan, 2015).

2.3. Bases teóricas de transferencia de calor

La transferencia de calor se fundamenta en la termodinámica, la misma que estudia los procesos en los cuales la energía se puede transferir entre un sistema y su entorno en forma de calor o de trabajo; para que se dé una transferencia de calor entre dos

Fuente: (Potter, Wiggert & Ramadan, 2015).

sistemas necesariamente debe de existir una diferencia de temperatura entre ellos, la cual finaliza cuando se alcanza el equilibrio térmico, es decir, cuando se igualan las temperaturas este fenómeno es conocido como el Principio Cero de la Termodinámica. Por otra parte, el Segundo Principio establece que el flujo de calor se da únicamente desde el sistema de mayor temperatura hacia el sistema de menor temperatura es decir toma el sentido de las temperaturas en forma decreciente; finalmente el Primer Principio establece la cantidad de energía calorífica que han intercambiado dos sistemas durante un proceso termodinámico (Fernández & Corrochano, 2014 y Montes, 2015).

2.3.1. Sistemas, contornos y entorno

Sistema es la parte del universo físico el cual estará sometido a experimentación; el sistema físico se separa del resto del universo a través de una superficie ya sea física o imaginaria la cual se denomina contorno (Figura 10). El ambiente exterior que está colindando e interacciona con el sistema se denomina entorno.



Figura 10. Sistema, contorno y entorno

Si se altera el contorno, el sistema también se ve afectado, así como todas las interacciones con el entorno; es muy importante definir si para realizar un estudio será considerado o no el entorno ya que esto modifica los fenómenos que se dará en el sistema. Al conjunto completo del sistema con su entorno se le denomina universo del sistema.

El contorno se clasifica como permeable si puede pasar masa de cualquier componente, semipermeable si pasa masa solo de algún componente e impermeable si no permite pasar masa de ningún componente. El sistema también se lo puede clasificar como deformable si el volumen varía, caso contrario se lo clasifica como 38

Fuente: Los autores

rígido. Si el sistema permite solo una interacción del tipo mecánico con el contorno sin intercambio de calor se lo clasifica como adiabático, caso contrario se lo clasifica como diatérmico. También de acuerdo a las consideraciones del contorno podemos definir a los sistemas como abiertos o cerrados (Nieto Carlier, González Fernández, López Paniagua, Jiménez Álvaro & Rodríguez Marín, 2015).

2.3.1.1. Sistemas Cerrados y Abiertos

Según Nieto Carlier *et al* (2015), los sistemas se pueden clasificar como cerrados o abiertos, dependiendo si se elige para el estudio una masa o un volumen fijo en el universo.

Para complementar la conceptualización de los sistemas abierto y cerrados se cita a Cengel y Boles (2015), quienes indican: Un sistema abierto, o un volumen de control, es una región elegida apropiadamente en el espacio, que por lo general encierra un dispositivo por el cual atraviesa un flujo másico o existe una transferencia de masa. El flujo que pasa por estos dispositivos se estudia mejor si se selecciona la región dentro del dispositivo como el volumen de control. Tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera de un volumen de control.

Un sistema cerrado o masa de control consta de una cantidad fija de masa y ninguna otra puede cruzar su frontera, es decir, ninguna masa puede entrar o salir de este tipo de sistemas. Pero la energía, en forma de calor o trabajo si puede cruzar esta frontera; y el volumen de un sistema cerrado no tiene que ser fijo. Si, como caso especial, incluso se prohíbe que la energía cruce la frontera, entonces se trata de un sistema aislado o adiabático.

En un análisis de ingeniería, el sistema bajo el cual se da va desarrollar un estudio debe ser definido con mucho cuidado. En la mayor parte de los estudios, el sistema analizado es bastante simple y obvio, así que definirlo podría ser una innecesaria. Sin embargo, en otros casos el sistema bajo el cual se desarrolla el estudio podría ser bastante complejo, de modo que su apropiada elección puede simplificar en gran medida el análisis.

2.3.1.2. Propiedades de un sistema

Para describir el estado de un sistema deben identificarse y cuantificarse ciertas características descriptivas del sistema, llamadas propiedades las cuales se defines en forma macroscópica, independientemente de cualquier modelo molecular de la materia (Cengel & Boles, 2015); algunas de estas son presión P, temperatura T, volumen V y masa m, viscosidad, conductividad térmica, módulo de elasticidad, coeficiente de

expansión térmica, etc. Si la propiedad no depende de masa contenida en el sistema se dice que es una propiedad intensiva como la temperatura y presión; por el contrario, las propiedades extensivas son aquellas cuyos valores dependen del tamaño o extensión del sistema por ejemplo el volumen, masa o energía.

En términos matemáticos, una propiedad de un sistema es una función de punto, puesto que su cambio solo depende de los valores que tiene dicha propiedad en el estado inicial de equilibrio en el cual se encuentra el sistema y en el estado final de equilibrio al cual llega después de producirse el cambio. (López Arango, 2008; Jutglar & Galán, 2014 y Cengel & Boles, 2015).

Para el desarrollo del presente proyecto se considera al secador cilíndrico rotativo como un volumen de control con un proceso isotrópico ya que a través del mismo fluye vapor de agua que permite la transferencia de calor al papel en la etapa de secado.

2.3.2. Modos de transferencia de calor

La transferencia de calor tiene un papel trascendental en los problemas de ingeniería, desde los procesos asociados a la generación de energía térmica hasta todos los de transformación en otro tipo de energía; existe tres modos de transmisión de calor: conducción, convección y radiación, los cuales se detallan en lo posterior Existe tres modos de transmisión de calor: conducción, convección y radiación, los cuales se detallan a continuación (Fernández & Corrochano, 2014 y Montes, 2015)

2.3.2.1. Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de energía en sistemas mediante el intercambio de energía cinética por el movimiento de electrones libres o vibración de la red cristalina. Energía térmica entre dos por choques moleculares; la conducción se caracteriza porque se genera dentro de los límites de un cuerpo o en la separación entre dos cuerpos (Montes, 2015).

La transmisión de calor por conducción (Figura 11), es estudiada en forma matemática a través de la Ley de Fourier, la misma que reza que en estado estacionario la velocidad de transmisión de calor o potencia térmica transmitida depende de la diferencia de temperaturas y de la naturaleza del material a través de su coeficiente de conductividad (Fernández & Corrochano, 2014).

Figura 11. Transferencia de calor por conducción de calor a través de una pared plana



Fuente: Cengel (2007)

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla t \tag{6}$$

Dónde:

- \vec{q} = vector de flujo de calor por conducción (W/m)
- k = coeficiente de conductividad térmica del material (W/m K)
- ∇ = operador nabla tridimensional de la variación de temperatura.
- t = campo escalar de temperaturas grados Kelvin (K)

Tabla 1. Coeficiente de	conductividad térmica	k de algunos	materiales.
-------------------------	-----------------------	--------------	-------------

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, k (W/m·K)	MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, k (W/m·K)
Dióxido de Carbono	0.01662	Arena	0.27
Amoníaco	0.02493	Arcilla	1.3
Aire	0.02625	Hielo	1.691
Poliestireno	0.028	Acero	13 37
		Inoxidable	15.57
Fibra de Vidrio	0.038	Fundición	26.6
	0.000	Gris ⁴	2010
Algodón	0.06	Hierro	80.46
Madera de pino	0.11	Aluminio	236
Aceite therminol	0.1358	Oro	317.2
Agua	0.1615	Cobre	401.2
Carbón	0.26	Plata	429

Fuente: Legrand, Ventas Garzón y Rodríguez Aumente (2014)

⁴ Material del secador cilíndrico rotativo especificación según norma ASTM A 48

2.3.2.2. Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de energía basado en el desplazamiento de masa en un fluido debido a la difusión de energía, tanto por el movimiento molecular aleatorio como sobre todo por el movimiento global de masa del fluido (Montes, 2015). Cuando más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección, la convección se produce en el sentido de las temperaturas decrecientes y requiere un soporte físico es decir un fluido el cual no es fijo sino en movimiento (Fernández & Corrochano, 2014).

Las características en la transferencia de calor por convección son las siguientes (Cengel, 2007; Fernández & Corrochano, 2014 y Montes, 2015):

- El proceso real de transmisión de energía es la conducción, pero la energía se desplaza de un punto a otro por el desplazamiento macroscópico del mismo fluido.
- Consiste en un transporte simultáneo de masa y de energía, que precisa de la existencia de un medio fluido. La convección se da únicamente en líquidos y gases.
- Los procesos de convección basan en correlaciones empíricas.

Figura 12. Transferencia de calor por conducción de calor a través de una pared plana



Fuente: Cengel (2007)

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido en la superficie es forzado a circular sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento; en cambio; la convección puede originarse de forma natural si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por la diferencia de densidad debida a la variación de temperatura en ese fluido. Adicionalmente también se considera convección al mecanismo de transferencia de calor que implica un cambio de estado: condensación y ebullición. (Fernández & Corrochano, 2014 y Cengel 2007)

El tratamiento matemático de la convección es de cierta manera complejo por lo que se recurre a fórmulas empíricas derivadas de la experimentación. El flujo de calor por unidad de superficie que se transmite por convección entre una superficie y un fluido a distinta temperatura, es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido, y se expresa por la ley de Newton de enfriamiento. (Cengel, 2007 y Montes, 2015).

$$\vec{q} = h \cdot \Delta t \tag{7}$$

Dónde:

- \vec{q} = flujo de calor por convección (W/m²).
- h = coeficiente de transmisión de calor por convección o coeficiente de película h $(W/m^2 K)$
- Δt = variación de temperatura entre la superficie y el fluido grado Kelvin (K).

 Tabla 2. Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección h.

PROCESO	h (W/m ² ·K)
Convección libre	
Gases	0-25
Líquidos	50-1000
Convección Forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20000
Convección con cambio de fase	
Ebullición y condensación	2500-100000

Fuente: Legrand, Ventas Garzón y Rodríguez Aumente (2014)

2.4. Bases teóricas de Modelamiento y Simulación

La esencia de la simulación consiste en establecer una equivalencia entre dos sistemas, cada uno de los cuales puede existir en realidad o ser abstracto, si el primero resulta

más sencillo para la investigación que el segundo, es posible juzgar sobre las propiedades del segundo sistema al observar el comportamiento del primero, en este caso el sistema empleado para la investigación se denomina modelo (Alberto, Schwer, Cámara & Fumero, 2005).

2.4.1. La teoría de la simulación y el modelado

La teoría de la simulación que podría definirse como un medio que experimenta con un modelo detallado de un sistema real para determinar cómo responderá el sistema a los cambios en su estructura o entorno (Harrell & Tumay, 1998). Así mismo, la simulación permite experimentar con un modelo del sistema para comprender mejor los procesos, con el fin de mejorar la actividad (Harrington & Tumay, 1999).

Es importante destacar en la teoría de la simulación, que pretende imitar el comportamiento del sistema real, evolucionando como el mismo sistema, pero lo más frecuente es estudiar además la evolución del sistema en el tiempo (Fullana & Urquía, 2011). Yendo más técnicamente, la simulación es el artificio contextual que referencia la investigación de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo utilizando modelos.

Según Thomas T. Goldsmith Jr. y Estle Ray Mann, creadores del primer juego electrónico (*video games*), definen la simulación como (FCEN–UBA, 2010):

"Técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos".

Como se ha descrito, la forma más prudente de articular una simulación es la construcción de modelos; normalmente un compendio de la realidad. Los modelos surgen de un análisis de todas las variables que inciden en el sistema y de las relaciones que existen entre ellas, una definición generalizada de modelo, es "una representación simplificada de la realidad, donde aparecen algunas de sus propiedades" (Joly, 1988: 111).

Considerando esta definición, se puede deducir que, la versión de la realidad a través del modelo generado, pretende reproducir ciertas propiedades del objeto o sistema original en otro sistema u objeto de menor complejidad.

En general un modelo puede ser entendido como una representación, bien sea abstracta, análoga, fenomenológica o idealizada, de un objeto que puede ser real o ficticio. En casos de los modelos fenomenológicos requieren el uso formal de herramientas matemáticas y/o computacionales para representar algún sistema y su comportamiento (Latorre Estrada, 1996).

Está claro entonces, que mediante el modelado se busca mejorar el conocimiento y la comprensión de un fenómeno o proceso y ello involucra el estudio de la interacción entre las partes de un sistema y el sistema como un todo. Sobre la base de lo expuesto, se afirma que las teorías están integradas por dos grandes elementos conceptuales no del todo separables (Banks, Carson, Nicol & Nelson, 2010):

- a) Un formalismo, es decir, un aparato matemático con unas reglas operativas para calcular, y;
- b) Una interpretación, es decir, una ontología que cuenta, en correspondencia con el formalismo, cuál es la imagen de los fenómenos, de los procesos y del mundo que la teoría pretende describir o explicar.

Entonces, el modelado permite, al nivel de la teoría, acercar el formalismo científico a su interpretación con el fin de lograr una mejor comprensión, explicación y descripción de los sistemas estudiados

Al considerar que el modelo representa la realidad con una cantidad menor de información, existe entonces un error inherente al proceso de modelización, el cual puede ser reducido, pero no eliminado. La reducción del error se puede hacer por dos opciones (Aponte, Herrera, González & Pleite, 2011):

- 1. Adecuada selección de los componentes sumada a una mayor precisión en la medida, no implica mayor complejidad del modelo.
- 2. Mayor cantidad de componentes (partes e interrelaciones funcionales), implica una mayor complejidad del modelo.

La certidumbre de un modelo, como herramienta de evidencia científica, o bien, como instrumento para tomar decisiones sobre procesos de ingeniería, está ligado al nivel de correspondencia que pueda lograrse, entre el modelo y el sistema real representado; entre el comportamiento observado al operar el modelo y el comportamiento observado de la experimentación sobre el sistema real (González Estrada, 2010).

2.4.2. Ejecución de un proceso de simulación

La ejecución de un proceso de simulación requiere el seguimiento de un proceso secuencial en tres fases (Banks *et al*, 2010):

- 1. Planificación, evaluación previa:
- Formulación del problema: En este paso debe quedar perfectamente establecido el objeto de la simulación. El cliente y el desarrollador deben acordar lo más detalladamente posible los siguientes factores: los resultados que se esperan del simulador, el plan de experimentación, el tiempo disponible, las variables de interés, el tipo de perturbaciones a estudiar, el tratamiento estadístico de los resultados, la complejidad de la interfaz del simulador, etc. Se debe establecer si el simulador será operado por el usuario o si el usuario sólo recibirá los resultados. Finalmente, se debe establecer si el usuario solicita un trabajo de simulación o un trabajo de optimización.
- Definición del sistema: El sistema a simular debe estar perfectamente definido. El cliente y el desarrollador deben acordar dónde estará la frontera del sistema a estudiar y las interacciones con el medioambiente que serán consideradas.
- 2. Diseño y Ejecución:
- Formulación del modelo: Esta etapa es un arte y será discutida más adelante. La
 misma comienza con el desarrollo de un modelo simple que captura los aspectos
 relevantes del sistema real. Los aspectos relevantes del sistema real dependen de la
 formulación del problema; para un ingeniero de seguridad los aspectos relevantes
 de un automóvil son diferentes de los aspectos considerados por un ingeniero
 mecánico para el mismo sistema. Este modelo simple se irá enriqueciendo como
 resultado de varias iteraciones.
- Colección de datos: La naturaleza y cantidad de datos necesarios están determinadas por la formulación del problema y del modelo. Los datos pueden ser provistos por registros históricos, experimentos de laboratorios o mediciones realizadas en el sistema real. Los mismos deberán ser procesados adecuadamente para darles el formato exigido por el modelo.
- Implementación del modelo en la computadora: El modelo es implementado utilizando algún lenguaje de computación. Existen lenguajes específicos de

simulación que facilitan esta tarea; también, existen programas que ya cuentan con modelos implementados para casos especiales.

- Verificación: En esta etapa se comprueba que no se hayan cometidos errores durante la implementación del modelo.
- 3. Medida de logros y mejora continua:
- Validación: En esta etapa se comprueba la exactitud del modelo desarrollado. Esto se lleva a cabo comparando las predicciones del modelo con: mediciones realizadas en el sistema real, datos históricos o datos de sistemas similares. Como resultado de esta etapa puede surgir la necesidad de modificar el modelo o recolectar datos adicionales.
- Diseño de experimentos: En esta etapa se decide las características de los experimentos a realizar: el tiempo de arranque, el tiempo de simulación y el número de simulaciones. No se debe incluir aquí la elaboración del conjunto de alternativas a probar para seleccionar la mejor, la elaboración de esta lista y su manejo es tarea de la optimización y no de la simulación. Debe quedar claro cuando se formula el problema si lo que el cliente desea es un estudio de simulación o de optimización.
- Experimentación: En esta etapa se realizan las simulaciones de acuerdo al diseño previo. Los resultados obtenidos son debidamente recolectados y procesados.
- Interpretación: Se analiza la sensibilidad del modelo con respecto a los parámetros que tienen asociados la mayor incertidumbre. Si es necesario, se deberán recolectar datos adicionales para refinar la estimación de los parámetros críticos.
- Implementación: Conviene acompañar al cliente en la etapa de implementación para evitar el mal manejo del simulador o el mal empleo de los resultados del mismo.
- Documentación: Incluye la elaboración de la documentación técnica y manuales de uso. La documentación técnica debe contar con una descripción detallada del modelo y de los datos; también, se debe incluir la evolución histórica de las distintas etapas del desarrollo. Esta documentación será de utilidad para el posterior perfeccionamiento del simulador.

Considerando las fases del modelo de simulación, es necesario indicar que, la simulación es conveniente cuando:

- No existe una formulación matemática analíticamente resoluble.
- Existe una formulación matemática, pero es difícil obtener una solución analítica.
- No existe el sistema real.
- Los experimentos son imposibles debido a impedimentos económicos, de seguridad, de calidad o éticos.
- El sistema evoluciona muy lentamente o muy rápidamente.

Existen varias aplicaciones científicas de procesos de simulación, entre los cuales se mencionan:

- Simulación de Procesos
 - Procesos de Separación.
 - Reactores Químicos.
 - Intercambiadores de Calor.
 - Equipo auxiliar, bombas, compresores, válvulas.
 - Integración de Energía.
 - Optimización de procesos.
- Dinámica computacional de Fluidos (CFD)
 - Permite obtener:
 - Líneas de corriente.
 - Perfiles de presión y temperatura.
 - Transferencia de momentos, calor y masa.
 - Se basa en:
 - Resolución mediante elemento y volumen finito, tipos de malla.
- Programación matemática y Redes neuronales
- Simulación Molecular

2.4.3. Modelado

Modelado se define como el proceso de construcción de un modelo, no es más que una representación de un objeto, sistema, o idea. Usualmente, su propósito es ayudar explicar, entender o mejorar un sistema (Shannon, Alderete & Pérez, 2003).

El modelado es un arte, que consiste en la habilidad para analizar un problema, resumir sus características esenciales, seleccionar y modificar las suposiciones básicas

que caracterizan al sistema, y luego enriquecer y elaborar el modelo hasta obtener una aproximación útil (Tarifa, 2001). Los pasos sugeridos para este proceso son:

- 1. Establecer una definición clara de los objetivos.
- 2. Analizar el sistema real.
- 3. Dividir el problema del sistema en problemas simples.
- 4. Buscar analogías.
- 5. Considerar un ejemplo numérico específico del problema.
- 6. Determinar las variables de interés.
- 7. Escribir los datos obvios.
- 8. Escribir las ecuaciones teóricas o empíricas que describen los fenómenos presentes y relacionan las variables de interés.
- 9. Si se tiene un modelo manejable, enriquecerlo; sino, simplificarlo.

2.5. Método de los elementos finitos

Los elementos finitos consisten en un método de análisis en ingeniería que permite reproducir virtualmente a un componente o sistema mecánico en situación de trabajo real ofreciendo las ventajas de la reducción de costes, tiempo, equipamiento y accesibilidad necesarios en un análisis real (Jiménez Rodríguez, 2010).

El método de elementos finitos (MEF), se ha desarrollado en todos los campos de la ingeniería, esto se debe a que, un análisis con elementos finitos se aplica a todos los problemas de la industria. Por lo general, el manejo del MEF ha requerido un profundo conocimiento físico-matemático, no obstante, en la actualidad existen una variedad de programas de computadora, junto con las características del hardware, que han puesto al alcance de los usuarios potentes herramientas que se basan en los elementos finitos para procesos de simulación (Catalán-Requena & Sesé, 2016). Los programas disponibles para un análisis usando elementos finitos son fáciles de operar, pero requiere entender la interfaz y la metodología de trabajo, para de esta forma producir resultados de calidad.

En términos matemáticos, el MEF es una técnica numérica para la resolución de problemas descritos como un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales. Utilizando los elementos finitos, se puede analizar cualquier forma, así como, idealizar la geometría y obtener resultados con la precisión deseada (Jiménez Rodríguez, 2010).

Una de las principales ventajas del método de elementos finitos, trabaja con las condiciones de frontera de un cuerpo con configuración irregular, estableciendo sobre la superficie del mismo pequeñas regiones (tantas como sea necesario) para lograr un perfil aproximado del cuerpo; considerando que el valor de la condición de frontera

puede ser diferente entre una y otra región adyacente, con lo que se puede atacar una variedad de problemas reales (Frías Valero, 2004).

El procedimiento básicamente incluye la división del dominio en muchas pequeñas regiones, llamadas "elementos", convenientemente distribuidas, los cuales pueden ser de forma triangular, cuadrilátera, hexaédrico, tetraédrico (Reddy, 1993), como los más comunes, y se usa una interpolación para describir el comportamiento de estos subdominios. Un número satisfactorio de puntos, llamados "nodos", se especifican en cada elemento y a cada uno de ellos le corresponde un valor de la variable o las variables de la ecuación diferencial, que se obtiene interpolando dentro de cada elemento.

El uso del principio variacional o del método de residuos ponderados permite transformar a las ecuaciones diferenciales que gobiernan el dominio, en ecuaciones de elementos finitos, que gobiernan aisladamente a cada uno de los elementos y en general son ecuaciones algebraicas (Lázaro Naranjo, 2004:10)

Las ecuaciones resultantes son convenientemente acopladas, formando un sistema global, el cual puede introducir las condiciones de frontera y las condiciones iniciales, sobre la base de los requerimientos del modelo requerido; finalmente los valores de la variable en los nodos, son determinados de la solución del sistema de ecuaciones algebraicas (De la Figal Costales, 2011).

2.5.1. Los elementos finitos como herramienta de análisis

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física (Frías Valero, 2004).

El MEF está diseñado para el uso en ordenadores, y su objetivo principal es resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Este método es una de las más importantes técnicas de simulación y seguramente la más utilizada en las aplicaciones industriales, y su utilización es extensible a multitud de problemas de física (Rodríguez Rojas, 2005).

Por medio de este método se obtiene una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio sobre el que están trabajan ciertas ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento físico del problema, ésta solución parte de la división en un número elevado de subdominios, que no se intersecan entre sí, los

cuales toman el nombre de "elementos finitos". El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización (Rey Rey, 2013).

Figura 13. Proceso de discretización



Fuente: Rey Rey (2013)

Dentro de cada elemento finito, se consideran una serie de puntos representativos llamados "nodos". Donde se facilitan las siguientes premisas (Frías Valero, 2004):

- Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito.
- Un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos.
- El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama "malla".
- Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos o nodos, que sirven a su vez de base para la discretización del dominio en elementos finitos.

El continuo se divide por puntos, líneas o superficies imaginarias, obteniendo así formas geométricas sencillas. En 1-D los elementos finitos son segmentos de línea (Figura 14).



Fuente: Los autores

En 2-D, los elementos finitos son figuras geométricas con número de lados indiferente, no obstante, por facilidad se usan triángulos y cuadriláteros (Figura 15).

Figura 15. Elemento Finito Bidimensional



En 3-D, los elementos finitos son poliedros, cuyo número de caras puede variar, dependiendo de la geometría del cuerpo, los más usados son los tetraedros y los hexágonos (Figura 16).

Figura 16. Elemento Finito Tridimensional a) hexaedro b) tetraedro



Fuente: Los autores

El MEF de forma sencilla consiste en convertir el sólido en un número finito de partes llamadas elementos, cuyo comportamiento se especifica con un número finito de parámetros. Dichos elementos contienen una serie de puntos interconectados entre sí llamados nodos y al conjunto se le conoce como malla (Rey Rey, 1998).

Según Rodríguez Rojas (2005:29), una región compleja que define un dominio continuo es discretizada en formas geométricas simples llamadas elementos (Figura 17). Las propiedades y las relaciones de gobierno son asumidas sobre estos elementos y expresadas matemáticamente en términos de valores desconocidos en puntos específicos en los elementos, llamados nodos.

Figura 17. Ejemplos de discretización



Fuente: (Rey Rey, 2013)

La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas. De acuerdo con las relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad.





Fuente: (Rodríguez Rojas, 2005)

El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos. Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones (Frías Valero, 2004).

2.5.2. Descripción matemática del MEF

Entre las complejidades del MEF, la descripción matemática se considera la parte más compleja. No obstante y con el afán de no complejizar el presente trabajo investigativo, se van a describir los fundamentos del método, para en lo posterior identificar cómo trabaja con un programa comercial de cálculo por elementos finitos, para este proceso de investigación es ANSYS *Workbeanch*.

Se requiere de cuatro etapas para ejecutar el algoritmo de elementos finitos que resuelve un problema definido mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno, estas etapas son (Moraleda & Villalba, 2016):

- 1. El problema debe reformularse en forma variacional.
- 2. El dominio de variables independientes debe fraccionarse mediante una partición en subdominios o elementos finitos⁵.
- Se obtiene la proyección del problema variacional original sobre el espacio de elementos finitos obtenido de la partición, dando lugar a un sistema con un número de ecuaciones finitas, con un número elevado de ecuaciones e incógnitas.⁶
- 4. Finalmente, el cálculo numérico de la solución del sistema de ecuaciones.

2.5.3. El MEF en la práctica

Como se ha mencionado, la solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

El MEF transforma al problema concreto en términos de ecuaciones diferenciales, a un problema específico de forma matricial proporcionando el resultado correcto para el finito número de puntos, además, interpola inmediatamente la solución con el resto del dominio, consiguiendo como resultando una solución aproximada (Morales & Santiago, 2016). El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina conjunto de nodos. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene al dividir la estructura con

⁵ Asociadas a la partición anterior se construye un espacio vectorial de dimensión finita, llamado espacio de elementos finitos. Siendo la solución numérica aproximada obtenida por elementos finitos una combinación lineal en dicho espacio vectorial.

⁶ El número de incógnitas será igual a la dimensión del espacio vectorial de elementos finitos obtenido y, en general, cuanto mayor será dicha dimensión tanto mejor será la aproximación numérica obtenida

elementos de forma variada, los mismos pueden ser superficies, volúmenes y barras (Jackson, Chusoipin & Green, 2005; Oñate, 2005).

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular, las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa de MEF se dividen en (Jackson *et al*, 2005; Oñate, 2005; Morales & Santiago, 2016):

Pre-proceso: Consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la malla y pre-acondicionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.

Cálculo (o proceso): El resultado del pre-proceso, en un problema simple no dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.

Post-proceso: El cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la discretización, en el post-proceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos y, en ocasiones, se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

2.5.4. Etapas básicas en la utilización del método de elementos finitos

Independientemente de la complejidad del proyecto o del campo de aplicación, los pasos fundamentales en cualquier proyecto de MEF son siempre los mismos, ya sea un análisis estructural, térmico o acústico, es decir, aparte de la naturaleza física del problema a resolver, el análisis mediante el MEF, ejerce los siguientes pasos:

- 1. Definición del problema y su dominio.
- 2. Discretización del dominio.
- 3. Identificación de las variables de estado.
- 4. Formulación del problema.
- 5. Establecimiento de los sistemas de referencia.
- 6. Construcción de las funciones de aproximación de los elementos.
- 7. Determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento.

- 8. Transformación de las coordenadas.
- 9. Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos.
- 10. Introducción de las condiciones de contorno.
- 11. Solución del conjunto de ecuaciones simultáneamente resultantes.
- 12. Interpretación de los resultados.

2.5.5. Criterios de convergencia en el MEF

El método de los elementos finitos, y en concreto el software ANSYS, permite análisis térmicos en estado estable y en estado transitorio, y cuando las propiedades de los materiales dependen de la temperatura, el análisis se denomina no-lineal, también, existen en ANSYS dos métodos de solución de problemas estructurales: el método-h y el método-p (Roa & Garzón, 2002).

El método-p es una excelente manera de resolver problemas con el nivel de precisión que se desee empleando mallados gruesos. El método-h, a diferencia del anterior, no utiliza una malla constante si no una adaptativa, siendo necesario afinar el tamaño de la misma para conseguir una mayor precisión de resultados. Esto hace que la velocidad de resolución del análisis sea menor, ya que el tiempo de resolución es proporcional al número de nodos que se definen (Gómez Vacas, 2017).

CAPÍTULO 3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Para el diseño e implementación de la aplicación del presente trabajo investigativo es necesario establecer las fases del pre proceso, proceso y post proceso. Cada una de estas fases considera un conjunto de pasos a seguir, los mismos que serán descritos a continuación.

El proceso de diseño e implementación del método de elementos finitos dentro del software CAE – CAD, se desarrolla en base al flujo y a las tres fases de simulación; según se indica en la figura 19.





Fuente: Los autores

3.1. Fase del Pre - Proceso

En esta primera etapa se define la geometría del problema a resolver, está geometría se discretiza en pequeñas regiones las cuales en su conjunto forman una malla (*mesh*), en este mismo contexto se definen las condiciones de contorno, las condiciones de valores iniciales y el modelo matemático a emplear.

En este punto se establece que el tipo de simulación será un análisis permanente, ya que no es parte del interés de la investigación el estudio de cambio de fase del fluido,

sino el resultado de temperaturas y esfuerzos que se dan en el secador cilíndrico, de la industria papelera.

3.1.1. Definición y aplicación del método

En la simulación computacional del problema mediante el método de elementos finitos (MEF), todos los pasos referentes a la definición del modelo (previos a la solución de las ecuaciones algebraico-diferenciales) constituyen el pre-proceso.

Dentro del pre-proceso, la generación de la malla es una parte clave ya que para geometrías complejas requiere un tiempo importante y no se trata de una operación trivial. Por otra parte la malla debe estar correctamente diseñada ya que la calidad de los resultados depende de la calidad de aquella.

El ejemplo más utilizado para explicar y comprender el método es el estudio de una rebanada delgada sometida a una tensión plana, dividiendo la región en elementos triangulares como se muestra en la figura 20, entendiendo el MEF desde el punto de vista estructural como una generalización del cálculo matricial de estructuras al análisis de sistemas continuos, siendo un método que nació y evolucionó de aplicaciones a sistemas estructurales (Frías Valero, 2004).

Figura 20. Región sometida a tensión plana dividida en elementos finitos, coordenadas nodales y desplazamientos de los nodos



Fuente: Frías Valero (2004)

Así tenemos que Zienkiewicz et al (2004), definen al elemento finito típico e, definido por sus nodos (*i*, *j*, *m*) y el contorno definido por las líneas rectas que los unen; los desplazamientos u de cualquier punto del elemento se aproximan por un vector columna \vec{u}

$$u \approx \vec{u} = \sum N_i a_i^e = \begin{bmatrix} N_i, N_j, \dots, N_n \end{bmatrix} \begin{cases} a_i \\ a_j \\ \vdots \\ \vdots \end{cases} = N a^e$$
(8)

Donde N son en general funciones de posición dadas y a^e es un vector formado por los desplazamientos nodales del elemento considerado, para el caso de la tensión plana de la figura 19, u son los movimientos horizontal y vertical en un punto cualquiera del elemento y a_i son los desplazamientos del nodo i.

$$u = \begin{cases} u(x, y) \\ v(x, y) \end{cases}, a_i = \begin{cases} u_i \\ v_i \end{cases}$$
(9)

Las funciones $N_i, N_j, ..., N_n$ han de escogerse de manera que al sustituirse en la ecuación (20), se obtienen los desplazamientos nodales, los cuales al conocerse en todos los puntos del elemento, permiten determinar todas las deformaciones ($\boldsymbol{\varepsilon}$) en cualquier punto, y vienen dadas por las relaciones:

$$\varepsilon = Su$$
 (10)

Siendo S un operador lineal adecuado, se sustituye en la ecuación (8) y (10), obteniendo las siguientes expresiones:

$$\varepsilon = Ba$$
 (11)
 $B = SN$ (12)

Suponiendo que el cuerpo está sometido a unas deformaciones iniciales ε_0 debidas a cambios térmicos, cristalizaciones, etc. y que tiene tensiones internas residuales σ_0 la relación entre tensiones y deformaciones en el cuerpo viene dada por

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \tag{13}$$

Siendo D una matriz de elasticidad con las propiedades de los materiales, se define:

$$q^e = \begin{cases} q_i^e \\ q_j^e \\ \dots \end{cases}$$
(14)

Es sabido que las fuerzas que actúan sobre los nodos, son estáticamente equivalentes a las tensiones del contorno y a las fuerzas distribuidas que actúan sobre el elemento. Entonces cada fuerza q_i^e debe tener el mismo número de componentes que el desplazamiento nodal **a**_i correspondiente, y debe ordenarse en las direcciones

adecuadas. En el caso particular de la tensión plana de la figura 16, las fuerzas nodales son:

$$q_i^e = \begin{cases} U_i \\ V_i \end{cases} \tag{15}$$

Si consideramos que las fuerzas distribuidas (**b**) son las que actúan por la unidad de volumen en direcciones correspondientes a los desplazamientos **u** en ese punto, entonces la relación entre las fuerzas nodales y tensiones en el contorno y las fuerzas distribuidas se determina por el método de los trabajos virtuales⁷, cuyo resultado es el siguiente, considerando que el V^e es el volumen del elemento e

$$q^{e} = \int_{V^{e}} B^{T} \sigma. \, dV - \int_{V^{e}} N^{T} b. \, dV \tag{16}$$

Esta expresión es válida con carácter general cualesquiera que sean las relaciones entre tensiones y deformaciones. Si las tensiones siguen una ley lineal como (13), se puede rescribir la ecuación en la forma siguiente:

$$q^{e} = K^{e}a^{e} + f^{e}$$
(17)
$$K^{e} = \int_{V^{e}} B^{T}DB.dV$$
$$f^{e} = \int_{V^{e}} B^{T}\sigma_{0}.dV - \int_{V^{e}} N^{T}b.dV - \int_{V^{e}} B^{T}\varepsilon_{0}.dV$$
(18)

Es necesario acotar que si existiesen fuerzas distribuidas por unidad de superficie (t), habría que añadir un término adicional a las fuerzas nodales del elemento cuyo contorno posee una superficie A^e . El término adicional sería:

$$-\int_{A^e} N^T t. \, dA \tag{19}$$

Es necesario considerar que t tendrá el mismo número de componentes que u para que la expresión anterior tenga validez; una vez obtenidos los desplazamientos nodales por resolución de las ecuaciones, se puede calcular las tensiones en cualquier punto del elemento.

$$\sigma = DBa^e - D\varepsilon_0 + \sigma_0 \tag{20}$$

⁷ El método de los trabajos virtuales es utilizado en resistencia de materiales para el cálculo de desplazamientos reales en estructuras isostáticas e hiperestáticas.

3.1.2. Establecer la geometría, condiciones de contorno y especificaciones de operación y funcionamiento.

Como punto de partida del proceso de simulación, se utilizan los planos proporcionados por la industria papelera que se muestran en figura 21.





Fuente: Archivos de la Industria Papelera

Sobre la base del plano proporcionado, se detallan las principales características del secador cilíndrico rotativo en la tabla 3, y más adelante se muestra un esquema del cilindro simplificado con las condiciones de frontera (Figura 21).

Características	Dimensiones
Diámetro del eje (D1)	198,374 mm
Diámetro del eje (D2)	260,350 mm
Diámetro externo del tambor (D _{Ex})	1523,873 mm
Diámetro interno del tambor (D _{In})	1451,102 mm
Longitud del cilindro (L)	3327,4 mm
Diámetro de entrada de vapor (dv)	114,3 mm

Tabla 3. Características físicas del secador cilíndrico rotativo

Fuente: los autores

Figura 22. Plano del secador cilíndrico de la industria papelera



Fuente: los autores

Se describen en la tabla 4, las propiedades del material con el que está construido el secador cilíndrico rotativo.

Especificación	Datos
Material	ASTM A48 (Fundición Gris)
Esfuerzo Ultimo de tensión	276 MPa
Esfuerzo Ultimo de compresión	1034 MPa
Módulo de Young	1.1 x 10 ⁵ MPa
Módulo de Elasticidad	62.1 - 162 GPa
Coeficiente de Poisson	0.240 - 0.330
Densidad	7150 Kg/m ³

Tabla 4. Especificaciones del material

Fuente: MatWeb (2017)

El proceso de secado se realiza por la transferencia de calor que se da entre el vapor de agua y las paredes del secador cilíndrico rotativo, este calor fluye desde el vapor hacía la superficie interior del cilindro, desde este punto, el calor fluye por el cuerpo del cilindro hacia la superficie exterior, en la tabla 5 se detallan las características del vapor de agua que ingresa en este proceso.

Especificación	Datos
Presión	9.5 Bar
Volumen Específico	0.2047 m ³ /Kg
Energía Interna	2582.05 KJ/Kg
Entalpía	2776 KJ/Kg
Entropía	6.6045 KJ/Kg – k
Temperatura de Saturación	177.65 °С
Densidad	5.64136 Kg/m ³
Calor Específico (Cp)	2602.43 J/Kg – k
Conductividad Térmica	0.029144 W/m - k
Viscosidad	1.5167e-05 Kg/m - s

Tabla 5. Características del vapor

Fuente: Cengel y Boles (2015)

Para iniciar la fase del pre-proceso, es necesario construir la geometría tridimensional, misma que se desarrolla en el programa *Inventor Professional*⁸.

La geometría mantiene las características relevantes del secador rotativo cilíndrico y omite detalles que a nivel de diseño y fabricación son esenciales, sin embargo, para el procesos de simulación no son considerados, como es el caso de las tapas laterales que son ajustadas por tornillos, y a su vez poseen curvaturas externas e internas, estas característica no son consideradas.

El proceso de creación de la geometría siguió una secuencia lógica que se muestran en las figuras detalladas a continuación:

- 1. Se construyó la geometría del cilindro, basada en el plano de la figura 21, pero simplificando características en las tapas.
- 2. La figura 23 muestra la geometría considerando las tapas en forma independiente, se muestra la mitad del cuerpo cilíndrico para que se aprecie la parte interna.

⁸ El software de CAD 3D de Inventor Professional ofrece un conjunto de herramientas fácil de usar para el diseño mecánico 3D, la documentación y la simulación de productos.

Figura 23. Secador cilíndrico rotativo con sus respectivas tapas



Fuente: Los autores

3. Los tornillos que sujetan las tapas no inciden en el proceso de simulación, por lo tanto se procede a simplificar dichos elementos, resultando un cuerpo unificando con las tapas laterales. (Figura 24)





Fuente: Los autores

4. Otro de los aspectos que no incide en el proceso de simulación del secador cilíndrico rotativo son las curvaturas exageradas en las tapas laterales debidas al proceso de fundición, por lo tanto, se simplificaron estas características en la geometría, el resultado se muestra en la figura 25.

Figura 25. Secador cilíndrico rotativo simplificadas las geometrías y exteriores



Fuente: Los autores

5. La figura 26a, muestra una sección angular definida para el cuerpo del cilindro, donde se observan detalles de la superficie interna, así mismo, la figura 26b enseña el mismo sector circular del cilindro y el vapor de agua como un cuerpo de diferente en estructura molecular incluido dentro del cuerpo rígido del secador cilíndrico rotativo, y por ende, rosando la superficie interna del cilindro.

Figura 26. Sección angular del secador cilíndrico rotativo incluido el vapor de agua



Fuente: Los autores

6. En este punto se establece que por cuestiones de transferencia de calor es necesario manejar dos geometrías distintas, la primera es el secador descrito en los pasos anteriores, y el otro cuerpo es el vapor de agua el cual por sus propiedades físicas ocupa la cavidad interna del cilindro, siendo la superficie interna del cilindro la forma externa que adaptara el vapor. La figura 27 muestra un sector circular con los dos cuerpos fusionados.

Figura 27. Geometría del vapor (cavidad interna del cuerpo cilindro)



Fuente: Los autores

3.1.3. Modelo discreto, tipo y forma de la malla

Para generar la malla, el dominio de la geometría simplificada se divide en pequeños subdominios denominados elementos (Figura 18), la geometría de dichos elementos depende de las dimensiones de la geometría simplificada, y las características del problema ya sean en una, dos o tres dimensiones.

Existen en el mercado varios programas comerciales de elementos finitos, los cuales se clasifican en tres categorías (Vergara, 2002).

- a) Número de nodos u orden del polinomio,
- b) Comportamiento mecánico que pude ser: elástico, plástico, térmico elásticos y otros más,
- c) Condiciones de la geometría y cargas: esfuerzos planos, deformaciones planas, axisimétricos

Las características principales de los programas que manejan elementos finitos son: Importar las geometrías, componentes o estructuras a modelar, elaboradas en otros programas CAD/ CAE, y generación de mallas y su refinamiento en forma automática o por mapeo.

El mallado generado puede clasificarse según los ejes coordenados (Baltazar & Eça, 2006), en Mallado ajustado al cuerpo (*body-fitted*), en el cual los puntos del mallado coinciden con la frontera física (figura 27a), y el mallado en coordenadas cartesianas donde las líneas del mallado son paralelas a los ejes cartesianos (figura 27b).
Figura 28. Ejemplo de Mallado a) Ajustado al cuerpo b) Coordenadas cartesianas o cilíndricas





Otra forma de identificar las mallas es con los nombres estructurado y no estructurado, las cuales como su nombre lo indica tiene que ver con la forma en la que los nodos siguen algún orden o ninguno, en el caso de las mallas estructuradas se menciona que los índices i, j, k del sistema de coordenadas cartesianas, y los elementos serán cuadriláteros en el caso del 2D y hexaedros en el caso de 3D; las mallas no estructuradas ofrecen una mayor flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas, la ventaja son los elementos ya sean triángulos (2D) o tetraedros (3D), se generan independientemente de la complejidad del dominio (Neira, 2011).

En el problema específico de estudio, una vez definidas y simplificadas las geometrías del cilindro y la cavidad del vapor, se procede a la generación de las mallas, conociendo que las mallas no estructuradas y ajustadas al cuerpo son las que optimizan recursos informáticos y tiempo de solución del proceso de simulación, con la ayuda de ANSYS 17.0 Academic *Workbeanch CFX* se procede a la creación de las mismas, considerando lo siguiente:

Se define que la primera parte del problema es de tipo estructural, se utiliza el módulo *"Static Structural"*, y dentro de este se realiza la importación de la geometría (archivo. iges) ya desarrollada en *Inventor Professional*.

Al importar la geometría del cilindro (Figura 29), se procede a colocar las condiciones de frontera para el proceso de simulación, condiciones que son tomadas con respecto a al material, contorno y entorno del sistema que se está estudiando.

Para nuestro caso particular estas condiciones de frontera están especificadas en las tablas 3, 4 y 5.

Figura 29. Sección angular del secador cilíndrico rotativo importado



Fuente: Los autores

Y antes de la simulación se utiliza el elemento *match control* (Figura 30), el cual proporciona dos tipos de controles:

Cyclic Match Control: El proceso cíclico consiste en copiar la malla de la primera cara o borde seleccionado en el match control a la segunda cara o borde seleccionado.

Arbitrary Match Control: Esta función permite seleccionar dos caras o aristas en un modelo para crear un match control que, en consecuencia, generará exactamente la misma malla en las dos caras o aristas. Sin embargo, a diferencia de *cyclic match control*, que requieren que se seleccione un sistema de coordenadas con su eje z de rotación alineado con el eje de la geometría de rotación, para *arbitrary match control* los dos sistemas de coordenadas se han de seleccionar.

Figura 30. Sección angular con la herramienta match control



Fuente: Los autores

Es necesario definir las condiciones iniciales, ya que en un análisis transitorio implica cargas que son función del tiempo. El primer paso en la aplicación de las cargas transitorias es establecer las condiciones iniciales (es decir, la condición en el tiempo = 0 para el presente proyecto).

Adicional, hay que establecer las condiciones de frontera, como es el caso de las superficies de contacto del eje con los rodamientos que dan soporte al cilindro (Figura 31), esta característica es *Fixed Rotation* que es una condición límite de rotación fija a las caras, aristas y vértices de un cuerpo. Cuando se aplica una rotación fija a una superficie, la geometría es libre en todas las direcciones de traslación, sin embargo, de forma predeterminada, la rotación de la geometría se fija alrededor de los ejes del sistema de coordenadas correspondiente.

Figura 31. Condiciones iniciales de los contactos del eje geometría del secador cilíndrico



Fuente: Los autores

Otro factor incidente del contorno es la velocidad de rotación en rpm y eje de giro, que se debe establecer con el sistema de coordenadas con su eje z, alineado a la geometría de rotación (Figura 32).



Figura 32. Condiciones de frontera del eje de giro y velocidad de rotación

Fuente: Los autores

Con respecto a la presión interna que ejerce el vapor sobre el cilindro, es necesario definir la ubicación en la cual se aplica esa presión de forma uniforme sobre toda la superficie (Figura 33), esta característica se llama *Pressure* la cual consiste en aplicar una presión constante o una presión que varía en una sola dirección (x, y, o z) a una o

más caras planas o curvas. Un valor positivo para la presión actúa en la cara, comprimiendo el cuerpo sólido.



Figura 33. Condiciones de frontera para la presión Interna

Fuente: Los autores

En cuanto a la transferencia de calor es importante definir las superficies del secador cilíndrico, donde se dará el proceso de convección (figura 34).





Fuente: Los autores

La generación de la malla es el otro proceso importante en el proceso de simulación, *Mesh Controls* es la opción que tiene el software *ANSYS 17.0 Academic Workbeanch*, para proporcionar una densidad de malla acorde a la superficie o volumen de trabajo.

Las áreas donde las tensiones o esfuerzos son de interés requieren una malla relativamente fina en comparación con la necesaria para el desplazamiento o la resolución de no linealidad.

Una malla de buena calidad significa que los criterios de calidad son correctos dentro del rango necesario para poder estudiar la física del modelo, esto puede apreciarse cuando la solución se muestra como una malla independiente y los detalles **70**

importantes de la geometría están bien capturados. Por el contrario, una malla de mala calidad puede provocar dificultades de convergencia, una mala descripción física y soluciones difusas.

Para conseguir una malla acorde al problema de estudio se debe comprobar los criterios de calidad y mejorarla si es necesario pensando en la configuración del modelo y su solución, para poder definir la malla se deben utilizar las diferentes opciones en los controles de mallado.

Los controles de mallado (mesh) son:

Sizing: permite dimensionar el alcance de un tipo de geometría a la vez, es decir, se puede aplicar un *Sizing* a un número de aristas o varias caras, pero no una combinación de aristas y caras. Para definir mejor el tamaño "*Sizing*" se utilizan las siguientes opciones: *Element Size*: debe ser un valor positivo, *Behavior*: suave o duro, dependiendo del tamaño o el número de divisiones que se fija sobre el borde y no puede ser cambiado por el algoritmo de mallado y la probabilidad de un aumento de la insuficiencia de malla.

Contact Sinzing: Crea elementos relativamente del mismo tamaño en las caras de los cuerpos que anteriormente se han definido en contacto ya sean caras de un contacto cara-cara o cara-borde.

Refinement: Los controles de refinamiento especifican el número máximo de opciones de mallado que se aplican a la malla inicial.

Mapped Face Meshing: Esta aplicación de mallado determina un número adecuado de divisiones para las aristas de la cara limítrofe automáticamente.

Match Control: Match control coincide con la malla en dos caras o bordes en un modelo.

Pinch: Al establecer las opciones de *pinch* se puede indicar que malla se aplica para generar automáticamente en los controles de arrastre de acuerdo con su configuración.

Inflation: La inflación es útil para la resolución capa límite, aire electromagnético o resolver las altas concentraciones de tensión para las estructuras.

Al momento de generar la malla, se consideran dos factores, la relevancia y el refinamiento, considerando que la relevancia controla el tamaño de los elementos del mallado, en primera instancia se generan un mallados gruesos (Figura 35)

Figura 35. Características del Malladado Grueso del cilindro



Fuente: Los autores

Las características más relevantes de las cuales se hace referencia cuando se habla de los controles del mallado, se detallan en la tabla 6.

Tabla 6. Datos estadísticos del mallado grueso de la geometría del cilindro

Características	Detalle
Número de Nodos:	4489
Número de Elementos:	2224
Tipo de Función:	ADAPTATIVA
Suavizado:	MEDIO
Grado de Relevancia:	GRUESO

Fuente: Los autores

Por otro lado, el refinamiento consiste en aumentar el grado del polinomio (refinamiento p), es necesario acotar que a mayor relevancia se producen mallados finos (Figura 36), se utiliza mayor tiempo de cálculo y se usan más recursos del sistema informático.





Fuente: Los autores

Se debe considerar que el refinamiento que varía de 0 (grueso) a 3 (profundo), siendo el recomendado 2 para procesos estructurales (Vergara, 2002). Las características esenciales se detallan en la tabla 7, las características más relevantes del mallado fino, se detallan en la tabla 7.

Características	Detalle
Número de Nodos:	215479
Número de Elementos:	145766
Tipo de Función:	ADAPTATIVA
Suavizado:	MEDIO
Grado de Relevancia:	FINO

Tabla 7. Datos estadísticos del mallado fino de la geometría del cilindro

Observando las características de las mallas, se evidencia que el mallado grueso resuelve problemas en menos tiempo, y con menos recursos, debido a que el número de nodos es significativamente menor al mallado fino; sin embargo, el mallado fino garantiza la calidad de los datos de salida, entregando mejores resultados al momento de ejecutar el post-proceso.

Para efectos de mejor consistencia en los datos de salida, se decide trabajar con un mallado de relevancia fina y un grado de refinamiento 2, generando elementos pequeños, para la mejor observación de los mismos se presenta un acercamiento en la figura 37.



Figura 37. Malladado fino con acercamiento del secador cilíndrico

Fuente: Los Autores

Los datos del sector circular de 30°, se generan en la totalidad de los 360°, de esa forma se obtiene la geometría total del cilindro, por lo tanto, los elementos de la malla se incrementan proporcionalmente.

También se considera la geometría del vapor que va a transferir temperatura al cilindro, sobre la cual generan la malla gruesa (Figura 38)



Figura 38. Características del Malladado Grueso del vapor



Las características más relevantes de los controles del mallado grueso, se detallan en la tabla 8.

	Tabla 8. Datos	estadísticos	del mallado	grueso del	vapor
--	----------------	--------------	-------------	------------	-------

Características	Detalle
Número de Nodos:	23065
Número de Elementos:	112614
Tipo de Función:	CURVATURA
Suavizado:	BAJO
Grado de Relevancia:	GRUESO

Fuente: Los autores

En el proceso de simulación del valor dentro del cilindro, se considera una malla fina, para garantizar un mejor resultado en el proceso de simulación, la figura 39 resulta del proceso de refinamiento.



Figura 39. Características del malladado fino del vapor

Fuente: Los autores

Las características más relevantes del mallado fino que se mencionan en los controles del mallado, se detallan en la tabla 9.

Características	Detalle
Número de Nodos:	409069
Número de Elementos:	2294510
Tipo de Función:	ADAPTATIVO
Suavizado:	ALTO
Grado de Relevancia:	FINO

Tabla 9. Datos estadísticos del mallado fino del vapor

Fuente: Los autores

Al igual que con el cuerpo cilíndrico, el sector circular de 30° se extiende a los 360°, para general el cuerpo del vapor que se ubica dentro del cilindro, entonces los elementos de la malla se incrementan proporcionalmente, el tamaño de los elementos es bastante reducido, por lo cual es necesario mirar en detalle su estructura, y visualizar como están distribuidos los elementos (Figura 40).

Figura 40. Malladado fino con acercamiento del del Vapor



Fuente: Los autores

3.2. Fase del Proceso - Desarrollo del modelo matemático

Para resolver el problema del trabajo investigativo es necesario identificar el modelo matemático que se ajusta a las condiciones de funcionamiento del secador cilíndrico rotativo, considerando la teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles, el análisis diferencial de la cantidad de movimiento del vapor mediante el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes y el balance de energía y transferencia de calor.

3.2.1. Teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles

La teoría de la energía de deformación máxima predice que la falla por fluencia ocurre cuando:

La energía de la deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en comprensión del mismo material (Budynas & Nisbett, 2012:212).

La expresión propuesta por Von Mises y Hencky, de acuerdo con este criterio una pieza resistente o elemento estructural falla cuando en alguno de sus puntos la energía de distorsión por unidad de volumen rebasa un cierto umbral:

$$e_{dist} \ge \frac{\sigma_y^2}{2E}$$
 (21)

La teoría de Von Mises dice que la distorsión del elemento es debida a los esfuerzos principales restándoles los esfuerzos hidrostáticos:

$$e_h = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{22}$$

Por lo tanto, la energía de distorsión es la diferencia entre energía total de deformación por unidad de volumen, y la energía de deformación por unidad de volumen debida a los esfuerzos hidrostáticos.

Figura 41. Energía de distorsión



Fuente: Budynas & Nisbett, (2012)

Como el material se encuentra en el rango elástico (ya que la falla se produce al llegar a la zona plástica), la energía total de deformación por unidad de volumen para el elemento es:

$$U = \frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_1 + \frac{1}{2}\sigma_2\varepsilon_2 + \frac{1}{2}\sigma_3\varepsilon_3$$
(23)

Las deformaciones son:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix}$$
(24)

En el momento de reemplazar las deformaciones de la ecuación (24) en la ecuación (23) resulta la energía total de deformación:

$$U = \frac{1}{2E} \left[\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + \sigma_1^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3) \right]$$
(25)

La energía de deformación debida a los esfuerzos hidrostáticos es:

$$U_h = \frac{3(1-2\nu)}{2E} \sigma_h^2 = \frac{3(1-2\nu)}{2E} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}\right)^2 \tag{26}$$

La energía de distorsión es entonces: $U_d = U - U_h$, de esta forma se calcula la energía de distorsión con (26) y (25), así tenemos:

$$U_{d} = U - U_{h} = \frac{1+v}{3E} \cdot \left[\frac{(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2}}{2} \right]$$
(27)
$$U_{d} = \frac{1+v}{3E} \cdot \left[\sigma_{1}^{2} + \sigma_{2}^{2} + \sigma_{3}^{2} - \sigma_{1}\sigma_{2} - \sigma_{2}\sigma_{3} - \sigma_{1}\sigma_{3} \right]$$
(28)

En el ensayo de tensión al producirse la fluencia, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$; $\sigma_1 = S_y$, y entonces la energía de distorsión en la probeta es:

$$U_d = \frac{1+v}{3E} \cdot S_y^2$$
 (29)

Igualando las ecuaciones (28) y (29), se obtiene la tensión de Von Mises que viene dada por:

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma 1 - \sigma 2)^2 + (\sigma 2 - \sigma 3)^2 + (\sigma 1 - \sigma 3)^2}{2}}$$
(30)

La teoría expone que un material dúctil comienza a ceder en una ubicación cuando la tensión de von Mises es igual al límite de tensión. En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión. Sin embargo, el software le permite utilizar el límite de tensión de tracción/ruptura o establecer su propio límite de tensión.

$$\sigma_{\text{vonMises}} \ge \sigma_{\text{Fluencia}}$$
 (31)

El límite elástico es una propiedad dependiente de la temperatura. Este valor especificado del límite elástico debe considerar la temperatura del componente. El factor de seguridad en una ubicación se calcula a partir de:

Factor de seguridad (FDS) =
$$\sigma_{Limit} / \sigma_{vonMises}$$
 (32)

Considerando que el proyecto de investigación utiliza esfuerzos cortantes, Budynas y Nisbett (2012), mencionan que "usando los componentes xyz del esfuerzo tridimensional, el esfuerzo de von Mises puede escribirse como:

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\left(\sigma_x - \sigma_y \right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z \right)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_x \right)^2 + 6 \left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \right) \right]^{1/2}$$
(33)

Y para el esfuerzo plano:

$$\sigma' = \left(\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2\right)^{1/2}$$
(34)

La teoría de la energía de deformación también se denomina: Teoría de von Mises, de la energía cortante y del esfuerzo cortante octaédrico.

3.2.2. Modelo matemático en mecánica de fluidos para el vapor -Ecuaciones de Navier-Stokes (N-S)

En el análisis del presente proyecto se considera el análisis del fluido que circula por el interior del secador cilíndrico rotativo y que transfiere calor a la superficie externa, este fluido es el vapor de agua; debido a esto se utiliza la ecuación de Navier-Stokes que es la base de la mecánica de fluidos y es una ecuación diferencial de segundo orden que relaciona el campo de esfuerzos con la deformación del campo resultante de velocidad variable en el espacio y el tiempo, en esta ecuación se incluye la ley de viscosidad de Stokes y la ley de viscosidad de Newton (Streeter, Wylie & Bedford, 2000).

La ecuación de Navier-Stokes es:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V}$$
(35)

Incluyendo los operadores matemáticos para cada una de las componentes cilíndricas en el cual se desarrolla el presente proyecto, la ecuación (35) se transforma en:

- Para la componente en r:

$$\rho\left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z\frac{\partial u_r}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial (ru_r)}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2}\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2}\right]$$
(36)

- Para la componente en θ :

$$\rho\left(\frac{\partial u_{\theta}}{\partial t} + u_{r}\frac{\partial u_{\theta}}{\partial r} + \frac{u_{\theta}}{r}\frac{\partial u_{\theta}}{\partial \theta} - \frac{u_{r}u_{\theta}}{r} + u_{z}\frac{\partial u_{\theta}}{\partial z}\right) = -\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_{\theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial_{r}}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial(ru_{\theta})}{\partial_{r}}\right) + \frac{1}{r^{2}}\frac{\partial^{2}u_{\theta}}{\partial \theta^{2}} - \frac{2}{r^{2}}\frac{\partial^{2}u_{r}}{\partial \theta^{2}} + \frac{\partial^{2}u_{\theta}}{\partial z^{2}}\right]$$
(37)

- Para la componente en z:

$$\rho\left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r}\frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_z}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right]$$
(38)

Y los componentes del tensor de esfuerzos viscoso en coordenadas cilíndricas son:

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{rr} & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{\theta r} & \tau_{\theta \theta} & \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} & \tau_{z\theta} & \tau_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\mu \frac{\partial\mu r}{\partial r} & \mu \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu_{\theta}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial\mu r}{\partial \theta} \right] & \mu \left(\frac{\partial\mu r}{\partial z} + \frac{\partial\mu z}{\partial r} \right) \\ \mu \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu_{\theta}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial\mu r}{\partial \theta} \right] & 2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial\mu r}{\partial \theta} + \frac{\partial\mu r}{\partial r} \right) & \mu \left(\frac{\partial\mu \theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial\mu z}{\partial \theta} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial\mu r}{\partial z} + \frac{\partial\mu z}{\partial r} \right) & \mu \left(\frac{\partial\mu \theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial\mu z}{\partial \theta} \right) & 2\mu \frac{\partial\mu z}{\partial z} \end{pmatrix}$$
(39)

3.2.3. Modelo matemático de balance de energía y transferencia de calor

Como parte del modelamiento matemático para el desarrollo de este proyecto, también se realiza el planteamiento del balance de energía partiendo del primer principio de la termodinámica y la ley de la conservación de la masa. (Legrand et al, 2014 y Potter, Wiggert. y Ramadan, 2015).

$$\frac{DE}{Dt} = q - [\dot{W}_{eje} + \dot{W}_{\Delta V}] \tag{40}$$

Dónde:

• $\frac{DE}{Dt}$ = representa la energía del sistema cerrado el cual se descompone en:

- Energía cinética Ec, por el movimiento del sistema
- Energía potencial Ep, por la altura del sistema

$$\frac{dEp}{dt} = 0$$
, para este proyecto

• Energía química Eq, por una reacción química.

$$\frac{dEq}{dt} = 0$$
, para este proyecto

• Energía nuclear En, por una reacción nuclear que se da en el interior del sistema.

$$\frac{dEn}{dt} = 0$$
, para este proyecto

- Energía interna U, debida a la energía del material por el estado termodinámico del proyecto de estudio.
- *q*= Potencia térmica que se calcula según el estudio de transferencia de calor que se da en el sistema; en este proyecto se calcula mediante conducción y convección.
- \dot{W}_{eje} = Potencia del eje en el sistema cerrado

 $\dot{W}_{eje} = Cw$, donde C = par del eje (torque)w = velocidad angular

La potencia por variación de volumen es:

$$\dot{W}\Delta V = p\frac{dV}{dt} \tag{41}$$

Con el análisis correspondiente la ecuación del balance de energía para el presente proyecto y reemplazando en (45) se denota de la ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{d(Ec+U)}{dt} = q - [Cw + p\frac{dV}{dt}] \qquad (42)$$

Para el análisis de potencia térmica y considerando la ecuación de transferencia de calor según (Legrand et al, 2014) tenemos:

$$\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + \frac{q}{k} \tag{43}$$

Dónde:

80

- $\alpha = \frac{k}{\rho C p}$; difusión térmica
- ∇² = Operador laplaciano que para sistemas con sistema de revolución como constituye el presente proyecto se define:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) \tag{44}$$

Reemplazando el operador laplaciano y la difusión térmica en (43) obtenemos:

$$\frac{\rho C p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{q}{k}$$
(45)

Con la finalidad de determinar la potencia térmica que se transfiere a través de la superficie del cilindro por convección se utiliza la siguiente ecuación:

$$q = hA_s(T_s - T_\infty) \tag{46}$$

Dónde:

- *q* = Potencia térmica por convección.
- *A_s* = Área de la superficie del secador cilíndrico que está en contacto con el aire.
- T_s = Temperatura de la superficie externa del secador cilíndrico.
- $T_{\infty} =$ Área de la superficie del cilindro que está en contacto con el aire.
- *h* = Coeficiente de transferencia de calor por convección libre para este proyecto.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = CGr^a Pr^b \qquad (47)$$

Dónde:

- h =Coeficiente de transferencia por convección
- *Nu* = Número de Nusselt
- L_c = Longitud característica de la superficie que transfiere el calor, geometría de la superficie y tipo de flujo.
- k =Coeficiente de transferencia de calor por conducción.
- Gr = Número de Grashof

$$Gr = Re^{2} = \frac{g\beta(T_{s} - T_{\infty})L^{3}}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{2}}$$
(48)

- g =Gravedad.
- β = Coeficiente volumétrico de expansión térmica
- *L* = Longitud característica del problema o espesor de la capa límite
- μ = Viscosidad del fluido
- ρ = Densidad del fluido
- Pr = Número de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu}{\rho\alpha} \tag{49}$$

- $\alpha = \frac{k}{\rho C p}$; Coeficiente de difusión térmica
- *C*, *a*, *b* = Constantes para el número de Rayleigh

$$Ra = GrPr$$
 (50)

Reemplazando en (53)

$$\frac{hL_c}{k} = CRa^a Pr^b \tag{51}$$

CAPÍTULO 4 VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

La tercera fase del proceso de simulación, también conocida como post proceso, permite generar dos actividades, bien diferenciadas, la primera que consiste en generar el proceso de simulación y la segunda es el análisis de los resultados de dicho proceso, para luego validar los resultados con la información tangible obtenida del equipo en funcionamiento en la industria papelera.

Cabe recalcar que la simulación se lleva a cabo, después de haber simplificado la geometría, realizar el refinamiento de la malla, y la fijación de las cargas iniciales o condiciones de frontera del cuerpo cilíndrico, así como de la geometría del vapor.

4.1. Fase del Post Proceso – Visualizar los resultados

Para ejecutar el proceso de simulación de los esfuerzos y transferencia de calor, es necesario que se hayan generado las mallas con su respectivo refinamiento sobre la geometría ya simplificada. No sin antes haber colocado todas las condiciones iniciales para el correcto funcionamiento del secador cilíndrico rotativo. Se desarrolló la simulación con dos tipos de mallados, respecto al número de elementos, en el total de las figuras que se presentan en esta sección el sector izquierdo corresponde al mallado fino, y el derecho es el mallado grueso.

El tipo de análisis que se realice determina los resultados disponibles para que se pueda examinar después de la solución. Así tenemos que, en un análisis estructural, puede interesar en los resultados de tensión equivalente o esfuerzos cortantes máximos, mientras que, en un análisis térmico, puede interesar la temperatura o el flujo de calor total. La selección de los resultados engloba el proceso del post-proceso.

En la presente investigación se desarrollarán los análisis que se detallan a continuación:

Análisis Estructural

- Deformación Total (*Total Deformation*)
- Esfuerzos de Von-Mises (Equivalent (von Mises))
- Deformación Elástica Equivalente (Equivalent Elastic Strain)
- Vector Principal de Esfuerzos (Vector principal stress)

Análisis Térmico

- Transferencia de calor (*Temperature*)
- Flujo de calor (*Total Heat Flux*)

Análisis del Fluido

- Viscosidad (*Eddy Viscosity*)
- Distribución de la temperatura en el fluido (*Temperature*)
- Presión del Fluido (*Pressure*)

4.2. Análisis Estructural

Se refiere a la simulación computacional que utiliza las ecuaciones de resistencia de materiales, con el fin de encontrar esfuerzos internos, deformaciones y tensiones que actúan sobre la estructura del secador cilíndrico.

4.2.1. Deformación Total (Total Deformation)

Se calcula sobre y dentro del secador cilíndrico rotativo. Las deformaciones se calculan en relación al equipo de coordenadas global. La tabla 10 muestra los valores de deformaciones máximos y mínimos

Deformación total			
	Malla Fina	Malla Gruesa	
Valor Máximo	1.4583 mm	1,4583 mm	
Valor Mínimo	0.0001634 mm	0.0001634 mm	

deformación del cilindro

Fuente: Los autores

La deformación total del cilindro se muestra en la Figura 42a con mallado fino, y 42b con mallado grueso.

Figura 42. Deformación del cilindro – Vista 3D



a) Deformación total mallado fino

b) Deformación total mallado grueso

Fuente: Los autores

Para mejor detalle se presenta la deformación del cilindro, tomando como referencia el elemento del sector del sector circular de 30°, con vista en 2D (Figura 43), donde se observa la distribución de la deformación en el cilindro considerando una escala de colores; se muestra entonces que la deformación máxima es de 1.47 mm, la que se genera en la superficie exterior del cilindro, donde se concentra la mayor presión de vapor.





Fuente: Los Autores

4.2.2. Esfuerzos de Von-Mises - Equivalent (von Mises)

Es un análisis estructural que permite conocer los esfuerzos resultantes debido a las cargas a las cuales está sometido el secador cilíndrico rotativo, es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión.

En la tabla 10 se muestran los valores máximos y mínimos, que se calculan del esfuerzo de Von Mises

Esfuerzo (Von Mises)			
	Malla Fina	Malla Gruesa	
Valor Máximo	29,842 MPa	34,315 MPa	
Valor Mínimo	0,035279 MPa	0,1209 MPa	

Tabla 11. I	Datos del	Esfuerzo d	e Von Mises	del cilindro
-------------	-----------	------------	-------------	--------------

Fuente: Los autores

El análisis estructural genera la figura 44, donde se evidencia en una gama de colores los esfuerzos resultantes, se observa que la figura 44b que los valores de los esfuerzos son menores, debido al mallado grueso; acotando entonces que a mas fina la malla se obtienen mejores resultados (Figura 44a).







En los dos tipos de mallados se observa que el esfuerzo máximo se da en el extremo del eje mayor, donde están montados los rodamientos (Figura 45), sin embargo, existe mayor asertividad cuando la malla es fina.

Figura 45. Acercamiento del eje-Vista 3D



Fuente: Los autores

Un corte frontal del sector circular nos confirma los resultados descritos en el párrafo anterior (Figura 46).



Figura 46. Esfuerzo de Von Mises vista frontal – Vista 2D

a) Esfuerzo Von Mises mallado fino

b) Esfuerzo de Von Mises Grueso



4.2.3. Deformación Elástica Equivalente - Equivalent Elastic Strain

Es la deformación que se genera en el secador cilíndrico rotativo, debido a los esfuerzos y la ocurrencia de dilatación debido al proceso de térmico al cual está sometido. En la tabla 12 se colocan los valores máximos y mínimos de la deformación elástica.

Deformación elástica equivalente			
	Malla Fina	Malla Gruesa	
Valor Máximo	5,720 x 10 ⁻³ m/m	3,425 x 10 ⁻³ m/m	
Valor Mínimo	1,093 x 10 ⁻⁵ m/m	5,339 x 10 ⁻⁵ m/m	

Fabla 1	2. Datos	de la	deformación	elástica	del	cilind	rc
			<i>J</i>				

La figura 47, muestra las deformaciones elásticas del cilindro, y se evidencia que hay una mejor aproximación cuando el mallado es fino (Figura 47a), lo cual fundamenta el hecho favorable de refinar la malla.









b) Deformación elastica malla gruesa



Al observar en 3D (Figura 48a y 48b), se aprecia que las deformaciones elásticas del cilindro se encuentran en el extremo por donde ingresa el vapor saturado.



a) Deformación elástica mallado fino



b) Deformación elastica malla gruesa

Fuente: Los Autores

4.2.4. Vector Principal de Esfuerzos - Vector principal stress

Determina el lugar donde se concentra el esfuerzo máximo y mínimo al cual está sometido el equipo, los cuales son lugares críticos a considerar.

En la figura 49, se observa que el Esfuerzo Máximo Principal se encuentra ubicado en los extremos del eje donde se dan las reacciones R1 y R2, al tratarse de un mallado grueso, es necesario que se ejecute un refinamiento, que permita optimizar la respuesta.



Figura 49. Vector principal de esfuerzo malla gruesa – Vista 3D



Después de mejorar el mallado a uno fino, y volver a ejecutar el análisis del vector principal (Figura 50), se observa que los resultados no varían, dando por hecho que no había necesidad de que se refine el mallado en este tipo de geometría.





Fuente: Los Autores

4.3. Análisis Térmico

Se enfoca en el comportamiento de la energía térmica del sistema del secador cilíndrico rotativo, especialmente en el flujo de vapor al interior del mismo, el cual transfiere el color hacia la superficie externa, para desarrollar el proceso de secado. 88 Los resultados obtenidos mediante el proceso de simulación se describen a continuación.

4.3.1. Transferencia de calor - Temperature

Determina la distribución de la temperatura en el cuerpo cilíndrico debido a la trasferencia del calor generado por el vapor, lo esencial de este análisis, es determinar la temperatura de la superficie externa del cilindro.

La tabla 13, muestra la información con respeto a la distribución de la temperatura, los Valores máximo y mínimo, con la malla gruesa y refinada.

Transferencia de calor				
Malla Fina Malla Gruesa				
Valor Máximo	167,00 °C	167,70 °C		
Valor Mínimo	119,48 °C	119,48 °C		

Tabla	13.	Datos	de	la	distribución	de	temperatura
-------	-----	-------	----	----	--------------	----	-------------

Fuente: Los Autores

El proceso de simulación genera la figura 51, donde muestra la distribución de la temperatura en el cilindro, con el mallado fino 51a y mallado grueso 51b; se puede comprobar que dicha distribución es muy similar en los dos tipos de llamado.



Figura 51. Distribución Temperatura en el cilindro - Vista 3D

Fuente: Los Autores

Para observar en forma más sencilla la distribución de la temperatura, se compara con las dos mallas en la figura 52. La variación de la temperatura es casi nula entre los dos tipos de mallado, de ahí que no existe necesidad de realizar el refinamiento en el caso este tipo de análisis.



Figura 52. Distribución Temperatura en el cilindro - Vista 2D



4.3.2. Flujo de calor - Total Heat Flux

Este análisis determina la tasa de transferencia de energía térmica a través de la superficie del cilindro. En la tabla 14 se muestran los datos de la distribución de temperatura en el cuerpo del cilindro.

Flujo de calor				
	Malla Fina	Malla Gruesa		
Valor Máximo	114070 W/m^2	77525 W/m ²		
Valor Mínimo	0,01454 W/m ²	0,419 W/m ²		

Fuente: Los Autores

El flujo del calor distribuye por el cuerpo del cilindro en un abanico de posibilidades que se reflejan de una forma de escala de colores, la figura 53 nos muestra esta distribución con mallado fino (53a) y con mallado grueso (53b).

Figura 53. Flujo del Calor en el cilindro – 3D







Fuente: Los Autores

En la vista 2D, del flujo del calor cilindrico se observa que con el mallado grueso figura 54a existe un mayor detalle en la distribución del fluido, a diferencia de la figura 54b que es la malla gruesa.

Figura 54. Flujo del Calor en el cilindro – 3D



a) Flujo de Calor mallado fino





4.4. Análisis del Fluido

Se analiza la velocidad del flujo del vapor al interior del cilindro, la distribución de la presión, las temperaturas que acompañan al vapor, y la viscosidad del vapor.

4.4.1. Viscosidad - Eddy Viscosity

La viscosidad es una propiedad física característica de todos los fluidos, el cual emerge de las colisiones entre las partículas del fluido que se mueven a diferentes velocidades, provocando una resistencia a su movimiento, la función *Eddy Viscosity* calcula la variación del valor de viscosidad que tiene el vapor a medida que fluye en la cavidad del cilindro.

La tabla 15, muestras los valores máximos y mínimos por donde atraviesa el valor de la viscosidad del flujo del vapor en el interior del cilindro.

Viscosidad del flujo del vapor				
Malla Fina Malla Gruesa				
Valor Máximo	1,517 Pa	1,517 Pa		
Valor Mínimo	3.272 x 10 ⁻⁵ Pa	3.272 x 10 ⁻⁵ Pa		

 Tabla 15. Viscosidad del flujo del vapor

Fuente: Los Autores

Al comparar los valores de la tabla 15, no se puede evidenciar resultados concluyentes, sin embargo la figura 55a muestra que existe variación en la viscosidad del vapor con mallado fino, a diferencia de la viscosidad que se mantiene constante con un mallado grueso figura 55b, por lo que es importante refinar el mallado en el proceso de simulación de vapor.



Figura 55. Distribución Temperatura en el cilindro - Vista 2D

Fuente: Los Autores

4.4.2. Distribución de la temperatura en el fluido - Temperature

Al ingresar el vapor al cilindro, este se distribuye en forma uniforme al interior del cilindro, no obstante, el fluido del vapor atraviesa por diferentes temperaturas las cuales se muestran en la figura 56.



Figura 56. Distribución de la temperatura el flujo del vapor – 2D

a) Flujo de Calor mallado fino Fuente: Los Autores

Para el proceso de simulación se genera una capa limite entre el cilindro y el vapor, la misma que permite realizar el proceso de transferencia de calor desde el vapor hasta la pared interna del cilindro, en la figura 57 se muestra una vista superior y una vista en 3D de la capa limite en mención.

Figura 57. Capa limite vista superior y en 3D





4.4.3. Presión del Fluido - Pressure

Dentro del proceso de simulación, se analiza cómo se distribuye la presión del vapor en el interior del cilindro debido al vapor, esta presión se mantiene constante tanto en el flujo de vapor como en la capa límite entre del vapor y el secador (Figura 58).



Figura 58. Presión del vapor al interior del cilindro

4.5. Análisis de convergencia

De acuerdo a los antecedentes expuestos, un punto muy importante en la simulación MEF es realizar un adecuado análisis de convergencia.

Teniendo en consideración la geometría simplificada del cuerpo y la malla fina adaptativa, el programa ejecuta la convergencia del mismo los resultados se arrojan hasta llegadas las 9000 iteraciones (Figura 59).

Fuente: Los Autores



Figura 59. Convergencia malla fina 9000 iteraciones



Se acota que a partir de la iteración 500 se comienzan a estabilizar los datos (Figura 60)





Fuente: El autor

Otro aspecto que se considera en el análisis de la convergencia es la deformación total del cuerpo cilíndrico, se puede observar que a partir de la séptima iteración el sistema se estabiliza, dando como resultado que a más elementos mejor es la convergencia, esta información se muestra en la tabla 16.

Item	Deformación Total (mm)	Cambio (%)	Nodos	Elementos
1	1,456100E-03		44204	25605
2	1,457400E-03	1,30E-06	111910	68358
3	1,457800E-03	4,00E-07	264712	168691
4	1,458400E-03	1,00E-06	306643	194748
5	1,458100E-03	-3,00E-07	530262	330368
6	1,458700E-03	6,00E-07	748703	488197
7	1,458400E-03	-3,00E-07	754685	483123
8	1,458200E-03	-2,00E-07	991754	657375
9	1,458380E-03	1,80E-07	1774434	1197592
10	1,458410E-03	3,00E-08	1995687	1289547
11	1,458430E-03	2,00E-08	2147821	1657489
12	1,458451E-03	2,10E-08	2299955	2025431
13	1,458473E-03	2,20E-08	2452089	2393373
14	1,458494E-03	2,10E-08	2604223	2761315

Tabla 16. Deformación Total, nodos y número de elementos para la convergencia

Fuente: Los Autores

La representación gráfica de las primeras 14 iteraciones se grafican en la figura 61, donde se evidencia que el método converge, por lo tanto, los resultados obtenidos del proceso de simulación son válidos.



Figura 61. Convergencia de la Deformación Total

Fuente: Los Autores

4.6. Validación del proceso de simulación.

Para realizar la validación de resultados obtenidos con el software *ANSYS 17.0 Academic* del proceso de simulación del secador cilíndrico rotativo, se utiliza una cámara termográfica (Figura 62) de propiedad de la Universidad Politécnica Salesiana, los datos específicos se encuentran en la tabla 17.





Fuente: TESTO (2009)

Tabla 17.	Características	de la	cámara	termográfica
-----------	-----------------	-------	--------	--------------

Modelo	Testo 882
N.º de serie:	2353180
Objetivo:	Angular 32°
Imágenes infrarrojas	
Propiedad	Valores
Campo visual/distancia	Objetivo estándar: 32° x 23°/0,2m
mín.de enfoque	(0,66ft)
Sensibilidad térmica	<50mK a 30°C (86°F)
(NEID)	
Resolucion geometrica	Objetivo estandar:1,/mrad
Frecuencia de imagen	33 Hz dentro de la UE
Treedeneta de infagen	9 Hz fuera de la UE
Enfoque	Manual + motorizado
Tipo de detector	FPA 320 x 240 píxeles, a-Si
Rango espectral	8-14 μm
Imágenes Visuales	
Campo visual/ distancia	$229 \times 259/0.4 \times (1.21ft)$
min de enfoque	55 x 25 /0.4 III (1.51II)
Tamaño de la imagen	640 x 480 pixeles
Frecuencia de imagen	8-15 Hz

Fuente: TESTO (2009)

El proceso de validación se hace en base a los datos obtenidos de la cámara termográfica, los cuales reposan en el informe (Anexo 4), que fue desarrollado por el Ing. Carlos Zhigue, quién trabaja como laboratorista en los talleres de mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana.

4.6.1. Validación 1 – Vista lateral

A través de una imagen real (Figura 63) de la vista lateral del cilindro, se ejecuta el proceso de validación, que se describe a continuación, y se compara con los resultados de la simulación computarizada



Figura 63. Imagen Rea Vista lateral del cilindro

Fuente: Los autores

La figura 64a, muestra los datos de la cámara termográfica vista desde la sección lateral contraria al ingreso del vapor, y se compara con la figura 64b, que simula la misma vista lateral de una de las caras del cilindro.

Figura 64. Imágenes cámara Termográfica vs Simulación Ansys – Vista Lateral



Fuente: Los autores

El formato de las tablas del proceso de validación considera dos columnas donde se colocan los datos obtenidos, la primera presenta los datos de la cámara y la segunda el rango e datos de la simulación computarizada, considerando los mismos puntos de contraste. La tabla 18 muestra que los datos obtenidos con la cámara termográfica, se encuentran cercanos o dentro del rango del proceso de simulación desarrollado con ANSYS.

Objetos de medición	Testo 882	Ansys [°C]
M 1	120,4	119,48 - 124,76
M 2	123,0	124,76 - 130,04
M 3	131,2	135,32 - 140,6
M 4	130,2	135,32 - 140,6
M 5	154,8	151.16 - 156.44

 Tabla 18. Comparación de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – Vista Lateral

Fuente: Los autores

4.6.2. Validación 2 – Tapa del cilindro

Otra imagen real a considerar es la vista de una tapa del cilindro (Figura 65), al igual que el proceso anterior se compara con los resultados de la simulación computarizada y los valores de la cámara termográfica

Figura 65. Imagen Rea Vista lateral del cilindro



Fuente: Los autores

La figura 66a, muestra los datos de la cámara termográfica con un acercamiento del cilindro lateral, en comparación con la figura 66b, que simula el mismo ángulo de una de las caras del cilindro.



Figura 66. Imágenes de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – Tapa del cilindro

Fuente: Los autores

La tabla 19 muestra que los datos obtenidos con la cámara termográfica, con otra vista lateral, en la cual podemos observar que los datos están dentro del rango del proceso de simulación desarrollado con ANSYS.

Objetos de medición	Temp. [°C] Camara Testo 882	Simulación Ansys [°C]
M 1	118,6	119,48 – 124,76
M 2	125,6	124,76 - 130,04
M 3	125,3	130,04 - 135,32
M 4	140,5	135,32 - 140,60
M 5	151,5	145,88 - 151.16

Tabla 19. Comparación de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – Tapa del cilindro

Fuente: Los autores

4.6.3. Validación 3 – Entrada del vapor

La entrada del vapor al cilindro (Figura 67), es una opción para realizar la validación, posteriormente se compara con los resultados de la simulación computarizada y los valores de la cámara termográfica





Fuente: Los autores

La figura 68a, muestra los datos de la cámara termográfica con un acercamiento del cilindro lateral, por la sección donde ingresa el vapor de agua, se compara con la vista de entrada de vapor (Figura 68b), desarrollada en ANSYS.

Después de la figura 68 se muestra la tabla 20 con los datos obtenidos con la cámara termográfica, mismos que se encuentran cercanos o dentro del rango del proceso de simulación desarrollado con ANSYS, para el caso de la entrada de vapor se consideraron tres puntos de validación.



Figura 68. Imágenes de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – entrada del vapor

a) Imagen cámara Termográfica

b) Simulación de la temperatura del cilindro

Fuente: Los autores

Tabla 20. Comparación de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – entrada del vapor

Objetos de medición	Temp. [°C] Camara Testo 882	Simulación Ansys [°C]
M 1	164,7	161,72 - 167
M 2	169,5	161,72 - 167
M 3	168,7	161,72 – 167
	Fuente: Los autores	

4.6.4. Validación 4 – Entrada del vapor

La entrada de vapor al cilindro desde otra perspectiva (Figura 69), será la última imagen para el proceso de validación con la imagen computarizada del ANSYS y los valores de la cámara termográfica



Figura 69. Imagen Real entrada del vapor2

Fuente: Los autores

La figura 70a, muestra los datos de la cámara termográfica del lugar donde ingresa el vapor, se compara con la vista de entrada de vapor (Figura 70b), desarrollada en Ansys.

Figura 70. Imágenes de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – entrada del vapor2



Fuente: Los autores

La tabla 21 muestra que los datos obtenidos con la cámara termográfica, se encuentran cercanos o dentro del rango del proceso de simulación desarrollado con ANSYS

Tabla 21. Comparación de cámara Termográfica vs Simulación Ansys – entrada del vapor 2

Objetos de medición	Temp. [°C] Camara Testo 882	Simulación Ansys [°C]
M 1	169,6	161,72 – 167
M 2	167,3	161,72 – 167
M 3	169,6	161,72 - 167

Fuente: Los autores

4.7. Cálculo de factor de servicio según método ASD

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{perm}} \leq 1 \qquad \qquad y \qquad \qquad \sigma_{perm} = (\frac{\sigma_{ult}}{\Omega})$$

Dónde:

- σ_{max} = Esfuerzo máximo calculado
- σ_{perm} = Esfuerzo permisible
- σ_y = Esfuerzo de fluencia del material ASTM A-48 = 193,05 MPa.
- Ω = Factor de seguridad según norma, ANSI/AISC 360-16 (2016) = 1,67

Reemplazando datos para σ_{perm} :

$$\sigma_{perm} = (\frac{\sigma_y}{\Omega})$$

$$\sigma_{perm} = (\frac{193,05}{1,67})$$

$$\sigma_{perm} = 115,60 Mpa$$

Obteniendo la relación:

$$\frac{29,84}{115,60} \le 1$$
$$0,26 \le 1$$

Por lo tanto, se evidencia que el material trabaja sobredimensionado.
CONCLUSIONES

- La fundamentación teórica permitió afianzar el conocimiento sobre el cual se sustenta el desarrollo del presente proyecto; siendo una guía de cómo desarrollar las etapas en el proceso de simulación, las ecuaciones con las cuales se determinó el modelo matemático; así como los factores de seguridad y coeficientes utilizados en problemas de análisis estructural mediante la normativa ANSI/AISC 360-16 (2016) vigente en la actualidad.
- Para realizar un proceso de simulación correcto que garantice resultados óptimos es de crucial importancia seleccionar una malla adecuada, acorde al problema con el cual se está trabajando, en el presente proyecto se pudo determinar que el seleccionar una malla con grado de relevancia fino en el cual existe mayor número de elementos y nodos, los resultados obtenidos son de mayor precisión sobre todo en la fase de análisis de esfuerzos y del flujo de vapor de agua; en cuanto a los resultados obtenidos de temperatura no existe una variación significativa por lo que se debe utilizar un grado de relevancia grueso, lo que permite ahorrar recursos en el procesamiento.
- Resolver las ecuaciones del modelo matemático en las diferentes fases ya sea para análisis de esfuerzo-deformación y transferencia de calor en forma analítica resulta un proceso demasiado extenso y repetitivo; debido a esto se han creado herramientas CAD, CAE que mediante el método de elementos finitos MEF optimizar estos procesos y permiten obtener resultados correctos.
- En cuanto al análisis de esfuerzo-deformación se determinó que el secador cilíndrico rotativo no presenta problemas estructurales, ya que el material trabaja con un factor de servicio del 26 %, según la norma ANSI/AISC 360-16 (2016). La validación de estos resultados no se pudo efectuar debido a que el secador estaba en funcionamiento y no se cuenta con la tecnología adecuada para realizar estas mediciones.
- El presente proyecto sirve como insumo a posteriores investigaciones donde se utilicen equipos de revolución que trabajen con gradientes de temperatura.
- El análisis matemático por elementos finitos ofrece una gran posibilidad de investigación de fenómenos que anteriormente se realizaban por ecuaciones aproximadas, gracias a las ciencias de la computación se automatizaron estos

procesos repetitivos y hoy estas herramientas son aplicadas a casos de mecánica de sólidos, fluidos, procesos térmicos, logrando así reducir tiempo y esfuerzos para evaluar variables de diseño e implementarlas.

 Los valores de temperatura obtenidos del software reflejan cómo se da el proceso de transferencia de calor del fluido hasta la superficie interna del cilindro para luego mediante conducción expresar los valores en la superficie externa del secador cilíndrico rotativo, esta temperatura se pudo comparar con los valores obtenidos de la cámara termográfica determinado que el proceso de simulación es correcto.

RECOMENDACIONES

- En el desarrollo del proceso de simulación se recomienda utilizar en el mallado un tipo de función adaptativo que ofrece el software, ya que esta función adapta de mejor manera los elementos y nodos de la malla a la geometría del problema.
- Se recomienda realizar una simplificación adecuada acorde a la geometría del problema, de esta manera se optimizan recursos en la fase de simulación.
- La simulación realizada con el uso del software *Ansys 17.0 Academic* desarrollada en el presente proyecto, puede ser utilizada para optimizar los procesos de secado en la planta papelera, sobre todo en lo referente a transferencia de calor.
- Es importante contar con equipos de laboratorio que permitan validar de una mejor manera los procesos de simulación en diferentes problemas, así se garantiza que la simulación obtenida del software es fiable.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Ansys: Es un ecosistema de programas CAE para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos FEA, incluye las fases de preparación de la malla, ejecución y post proceso, el programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos usadas en ingeniería y diseño mecánico, puede resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas, brevemente se describen sus módulos principales por disciplina.

Cámara Térmica o Termográfica: Dispositivo que, a partir de las emisiones de infrarrojos medios del espectro electromagnético de los cuerpos detectados, forma imágenes luminosas visibles por el ojo humano. Estas cámaras operan, más concretamente, con longitudes de onda en la zona del infrarrojo térmico, que se considera entre $3 \mu m y 14 \mu m$

Elasticidad: Parte de la Física que estudia las Leyes que gobiernan las deformaciones sufridas por un cuerpo cuando se le aplica una fuerza externa. Todo cuerpo sobre el que actúan fuerzas externas sufre una deformación que depende de la naturaleza del sólido y de las fuerzas que sobre él actúan.

Método de cálculo ASD: Es el método utilizado para realizar el cálculo estructural utilizando el factor de seguridad según normativa ANSI/AISC 360-16 (2016).

Método de los elementos finitos: (MEF) método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas.

Transferencia de calor: Es el proceso de propagación del calor en distintos medios. La parte de la física que estudia estos procesos se llama a su vez Transferencia de calor o Transmisión de calor.

ANEXO 1: ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL DEL SECADOR CILÍNDRICO ANEXO 2: PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES NO FERROSOS ANEXO 3: ÁREAS BAJO LA CURVA NORMAL ANEXO 4: INFORME TERMO GRÁFICO

ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL DEL SECADOR CILÍNDRICO

Gray Cast Iron, ASTM A 48 Class 40

Categories: Metal; Ferrous Metal; Cast Iron; Gray Cast Iron

Material Carbon listed in the composition table is the total carbon. Can be oil quench hardened from 860°C to attain a Rockwell C 50 minimum surface hardness. Data provided by the manufacturer, Siltin Industries, Inc.

Vendors: No vendors are listed for this material. Please click here if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.15 g/cc	0.258 lb/in ^s	Typical for Gray Cast Iron
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	183 - 234	183 - 234	
Hardness, Knoop	258	258	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell B	97	97	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell C	20	20	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Vickers	246	246	Converted from Brinell hardness.
Tensile Strength, Ultimate	>= 276 MPa	>= 40000 psi	
Ultimate Compressive Strength	>= 1034 MPa	>= 150000 psi	
Machinability	0.0 %	0.0 %	Very good machinability. No numerical rating available.
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	3.25 - 3.5 %	3.25 - 3.5 %	
Chromium, Cr	0.050 - 0.45 %	0.050 - 0.45 %	
Copper, Cu	0.15 - 0.40 %	0.15 - 0.40 %	
Iron, Fe	91.9 - 94.2 %	91.9 - 94.2 %	As Balance
Manganese, Mn	0.50 - 0.90 %	0.50 - 0.90 %	
Molybdenum, Mo	0.050 - 0.10 %	0.050 - 0.10 %	
Nickel, Ni	0.050 - 0.20 %	0.050 - 0.20 %	
Phosphorous, P	<= 0.12 %	<= 0.12 %	
Silicon, Si	1.8 - 2.3 %	1.8 - 2.3 %	
Sulfur, S	<= 0.15 %	<= 0.15 %	

References for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineeing calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's terms of use regarding this information. <u>Click here</u> to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES NO FERROSOS

lúmero	Resistencia a la tensión	Resistenci a la compre	ia ssión	Modulo de rotura por cortante	Modu elasticido	lo de id, Mpsi	Limite de resistencia a la fatiaa*	Dureza Brinell	Factor de concentración al esfuerzo
NTM	S _{Uf} , kpsi	Suc, kps	in the	S _{su} , kpsi	Tensión [†]	Torsión	S _e , kpsi	H	y network
20	22	83		26	9.6-14	3.9-5.6	10	156	1.00
25	26	26		32	11.5-14.8	4.6-6.0	11.5	174	1.05
30	31	109		40	13-16.4	5.2-6.6	14	201	1.10
35	36.5	124		48.5	14.5-17.2	5.8-6.9	16	212	115
40	42.5	140		57	16-20	6.4-7.8	18.5	235	1 25
50	52.5	164		73	18.8-22.8	7.2-8.0	21.5	262	135
60	62.5	187.5		88.5	20.4-23.5	7.8-8.5	24.5	302	1.50

Tabla A-24

.

Propiedades mecánicas de tres metales no ferrosos

a) Propiedades típicas del hierro fundido gris [El sistema de numeración de la American Society for Testing and Materials (ASTM) del hierro fundido gris es tal que los números corresponden a la resistencia a la tensión mínima en kpsi. En consecuencia, un hierro fundido núm. 20 ASTM tiene una resistencia a la tensión mínima de 20 kpsi. Observe en particular que las

ÁREAS BAJO LA CURVA NORMAL

	Ejemplo:									
			Si $z = 1.9$	96, entonc	es					
			P(0 a z) :	= 0.4750.	/					
0.4750										
				Z	•	0	1.	96		
z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.0000	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0199	0.0239	0.0279	0.0319	0.0359
0.1	0.0398	0.0438	0.0478	0.0517	0.0557	0.0596	0.0636	0.0675	0.0714	0.0753
0.2	0.0793	0.0832	0.0871	0.0910	0.0948	0.0987	0.1026	0.1064	0.1103	0.1141
0.3	0.1179	0.1217	0.1255	0.1293	0.1331	0.1368	0.1406	0.1443	0.1480	0.1517
0.4	0.1554	0.1591	0.1628	0.1664	0.1700	0.1736	0.1772	0.1808	0.1844	0.1879
0.5	0.1915	0.1950	0.1985	0.2019	0.2054	0.2088	0.2123	0.2157	0.2190	0.2224
0.6	0.2257	0.2291	0.2324	0.2357	0.2389	0.2422	0.2454	0.2486	0.2517	0.2549
0.7	0.2580	0.2611	0.2642	0.2673	0.2704	0.2734	0.2764	0.2794	0.2823	0.2852
0.8	0.2881	0.2910	0.2939	0.2967	0.2995	0.3023	0.3051	0.3078	0.3106	0.3133
0.9	0.3159	0.3186	0.3212	0.3238	0.3264	0.3289	0.3315	0.3340	0.3365	0.3389
1.0	0.3413	0.3438	0.3461	0.3485	0.3508	0.3531	0.3554	0.3577	0.3599	0.3621
1.1	0.3643	0.3665	0.3686	0.3708	0.3729	0.3749	0.3770	0.3790	0.3810	0.3830
1.2	0.3849	0.3869	0.3888	0.3907	0.3925	0.3944	0.3962	0.3980	0.3997	0.4015
1.3	0.4032	0.4049	0.4066	0.4082	0.4099	0.4115	0.4131	0.4147	0.4162	0.4177
1.4	0.4192	0.4207	0.4222	0.4236	0.4251	0.4265	0.4279	0.4292	0.4306	0.4319
1.5	0.4332	0.4345	0.4357	0.4370	0.4382	0.4394	0.4406	0.4418	0.4429	0.4441
1.6	0.4452	0.4463	0.4474	0.4484	0.4495	0.4505	0.4515	0.4525	0.4535	0.4545
1.7	0.4554	0.4564	0.4573	0.4582	0.4591	0.4599	0.4608	0.4616	0.4625	0.4633
1.8	0.4641	0.4649	0.4656	0.4664	0.4671	0.4678	0.4686	0.4693	0.4699	0.4706
1.9	0.4713	0.4719	0.4726	0.4732	0.4738	0.4744	0.4750	0.4756	0.4761	0.4767
2.0	0.4772	0.4778	0.4783	0.4788	0.4793	0.4798	0.4803	0.4808	0.4812	0.4817
2.1	0.4821	0.4826	0.4830	0.4834	0.4838	0.4842	0.4846	0.4850	0.4854	0.4857
2.2	0.4861	0.4864	0.4868	0.4871	0.4875	0.4878	0.4881	0.4884	0.4887	0.4890
2.3	0.4893	0.4896	0.4898	0.4901	0.4904	0.4906	0.4909	0.4911	0.4913	0.4916
2.4	0.4918	0.4920	0.4922	0.4925	0.4927	0.4929	0.4931	0.4932	0.4934	0.4936
2.5	0.4938	0.4940	0.4941	0.4943	0.4945	0.4946	0.4948	0.4949	0.4951	0.4952
2.6	0.4953	0.4955	0.4956	0.4957	0.4959	0.4960	0.4961	0.4962	0.4963	0.4964
2.7	0.4965	0.4966	0.4967	0.4968	0.4969	0.4970	0.4971	0.4972	0.4973	0.4974
2.8	0.4974	0.4975	0.4976	0.4977	0.4977	0.4978	0.4979	0.4979	0.4980	0.4981
2.9	0.4981	0.4982	0.4982	0.4983	0.4984	0.4984	0.4985	0.4985	0.4986	0.4986
3.0	0.4987	0.4987	0.4987	0.4988	0.4988	0.4989	0.4989	0.4989	0.4990	0.4990

INFORME TERMO GRÁFICO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA

SALESIANA

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN SECADOR CILÍNDRICO ROTATIVO DE LA INDUSTRIA PAPELERA

Empresa	Universidad Politécnica Salesiana	Examinador:
	Calle Vieja 12-30 y Elia Liut Cuenca	Ing. Carlos Zhigue Teléfono: 72862213
Instrumento testo 882	N.º de serie: 2353180	Objetivo: Angular 32°
Cliente	Ing. Antonio Perez / Ing. Jhison Romero	Lugar de medición:
	Calle Vieja 12-30 Cuenca	Rodillos de Industria Papelera Parque Industrial Cuenca
Pedido Pruebas: Termog	ráficas	Fecha de medición: 17/07/2017

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN SECADOR CILÍNDRICO ROTATIVO DE LA INDUSTRIA PAPELERA



Archivo:

Fecha: 17/07/2017

Hora: 17:26:33



Parámetros de la imagen:

Grado de emisividad:	0,97
Temp. refl. [°C]:	25,0

Marcas de imagen:

Objetos de medición	Temp. [°C]	Emis.	Temp. refl. [°C]	Comentarios
Punto de medición 1	120,4	0,97	25,0	-
Punto de medición 2	123.0	0.97	25.0	-
Punto de medición 3	131.2	0.97	25.0	-
Punto de medición 4	130.2	0.97	25.0	_
	154.0	0,97	25,0	-
Punto de médición 5	154,8	0,97	25,0	-





Parámetros de la imagen:

Grado de emisividad:	0,97
Temp. refl. [°C]:	25,0

Marcas de imagen:

Objetos de medición	Temp. [°C]	Emis.	Temp. refl. [°C]	Comentarios
Punto de medición 1	118,6	0,97	25,0	-
Punto de medición 2	125.6	0.97	25.0	-
Punto de medición 3	125.3	0.97	25.0	-
Punto de medición 4	140.5	0.97	25.0	-
Punto de medición 5	1515	0.07	25,0	
Punto de medición 5	151,5	0,97	25,0	-

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN SECADOR CILÍNDRICO ROTATIVO DE LA INDUSTRIA PAPELERA



Archivo:

Fecha: 17/07/2017

Hora: 17:28:47





Parámetros de la imagen:

Grado de emisividad:	0,97
Temp. refl. [°C]:	25,0

Marcas de imagen:

Objetos de medición	Temp. [°C]	Emis.	Temp. refl. [°C]	Comentarios
Punto de medición 1	164,7	0,97	25,0	-
Punto de medición 2	169,5	0,97	25,0	-
Punto de medición 3	168.7	0,97	25.0	-
) .		-) -	





Parámetros de la imagen:

Grado de emisividad:	0,97
Temp. refl. [°C]:	25,0

Marcas de imagen:

Objetos de medición	Temp. [°C]	Emis.	Temp. refl. [°C]	Comentarios
Punto de medición 1	169,6	0,97	25,0	-
Punto de medición 2	167,3	0,97	25,0	-
Punto de medición 3	169,6	0,97	25,0	-

Conclusión:

Mediciones realizadas según las Condiciones Pedidas del Usuario

19/07/2017,

Ing. Carlos Zhigue

Página 5 / 5

BIBLIOGRAFÍA

- 1. Alberto, M., Schwer, I., Cámara, V. & Fumero, Y. (2005). *Matemática discreta:* con aplicaciones a las ciencias de la programación y de la computación. Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral.
- Alfonso, W. F. J., González, F. E. & Torres, L. O. (2017). Diseño y análisis del chasis de un vehículo monoplaza Formula SENA. *Revista Integra*, 5(1), 58-86.
- ANSI/AISC 360-16, (2016). Specification for Structural Steel Buildings. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, Chicago Illinois. (https://goo.gl/5QNAqn) (2017-07-24)
- 4. ANSYS, Inc. Tutorials (2009). (http://www.ansys.com).
- Aponte, G., Herrera, W., González, C. & Pleite, J. (2011). Implementación de un Modelo de un Transformador Eléctrico para el Análisis de su Respuesta en Frecuencia. *Información Tecnológica*. 22(4). 59-72. doi: 10.4067/S0718-07642011000400008
- Badiola, V. (2004). Diseño de Máquinas I. Principios Básicos de Resistencia de Materiales. Dpto. Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales. Universidad de Navarra. 5-34. (https://goo.gl/mZZ8Ob) (2017-03-19)
- Baltazar, J. M, & Eça, L. R. (2006). Generación de Mallas Estructuradas en Superficie. Información tecnológica, 17(3), 107-116. (https://goo.gl/1D43PX) (2017-03-26)
- 8. Banks, J., Carson II, J. S., Nicol, D. & Nelson, B. (2010). *Discrete-event system simulation. Quinta Edición.* Edimburgo: Prentice-Hall Pearson.
- 9. Batchelor, G. K. (2000). *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge University Press. United Kingdom: Cambridge:
- Beer, F. P., Russell Johnston, E., Dewolf, J. T. & Mazurek, D. F. (2013) Mecánica de Materiales. Sexta Edicion. México Df: McGraw-Hill Education. 706 p.

- Budynas, R. G. & Nisbett, J. K. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Novena Edición, Mc-Graw-Hill-Interamericana Editores S.A. Mexico DF.
- Bursztyna, G., Oteroa, A. D. & Quinterosa, J. (2008). Una nueva implementación para las ecuaciones de Navier-Stokes mediante KLE y elementos espectrales. *Mecánica Computacional* (27) págs. 2367-2383
- 13. Callister, W. D. (2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, I.* 3ra. Ed., Barcelona: Reverté.
- Catalán-Requena, J. & Sesé, L. (2016). Análisis Numérico y Experimental de Elementos Mecánicos mediante la Técnica de Fotoelasticidad. (Tesis de Pregrado) Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén
- 15. Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. Tercera edición, México D.F.: Editorial Mc Graw-Hill.
- Cengel, Y. y Boles, M. (2015). *Termodinámica*. Octava Edición, México D.F.: Editorial Mc Graw-Hill.
- Chu, D, Forbes, M., Backstrom, J., Gheorghe, C. & Chu, S. (2011). Model Predictive Control and Optimization for Papermaking Processes, Advanced Model Predictive Control, *Dr. Tao ZHENG (Ed.), InTech,* DOI: 10.5772/18535.
- 18. Cuadrado, D. S. (2011). Análisis de tensiones en piezas mecánicas de geometría cilíndrica utilizando el método de los elementos finitos (Doctoral dissertation).
- De la Figal Costales, J. G. (2011). Simulación por el Método de los Elementos Finitos. Departamento de Mecánica Aplicada. Facultad de Ingeniería Mecánica, La Habana – Cuba.
- FCEN–UBA, (2010). Introducción a la simulación y a la generación de números pseudoaleatorios. Taller de Informática I. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires.
- 21. Fernández, J. & Corrochano, C. (2014). *Fundamentos de transmisión de calor*. Madrid: Dextra Editorial S.L.

- 22. Fitzgerald, R. W. (2007). *Mecánica de Materiales. 2da. Ed.*, México DF: Alfaomega.
- 23. Fox, R. W., McDonald, A. T., Cázares, G. N. & Callejas, R. L. (1995). Introducción a la Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill: México DF
- Frías Valero, E. (2004). Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos (Tesis Doctoral). Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Fullana, C. & Urquía, E. (2011). Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinar de investigación. *Encuentros multidisciplinares*, 11(32). 37-48.
- Gómez Vacas, M. (2017). Estudio mediante simulación numérica de unión heterogénea acero de alta resistencia-metal duro aplicando soldadura fuerte (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid – Facultad de Ciencias Químicas.
- 27. González Estrada, O. A. (2010). Estimación y acotación del error de Discretización en el modelado de grietas mediante el método extendido de los elementos finitos (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia – España.
- 28. Harrell, C. & Tumay, K. (1998). Simulation made easy: A manager's guide. Norcross, Ga: Industrial Engineering and Management Press
- 29. Harrington, H. J. & Tumay, K. (1999). *Simulation modeling models*. McGraw Hill New York: High Performance Systems.
- Imaz Gutiérrez, R. (2013). *Resistencia de Materiales*. Universidad de Cantabria. Open Course Ware. (https://goo.gl/VdAH09) (2017-03-19)
- Jackson, R., Chusoipin, I. & Green, I. (2005). A finite element study of the residual stress and deformation in hemispherical contacts. *Journal of Tribology*, 127(3), 484-493. doi:10.1115/1.1843166
- Jiménez Rodríguez, R. M. (2010). Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de discos cerámicos. (https://goo.gl/6WloVv) (2017-04-28)

- 33. Joly, F. (1988). La cartografía. Barcelona: Oikos-Tau.
- 34. Joseph, E & Shigley, L. D. (1985). *Diseño de Ingeniería Mecánica*, Tercera Edición: McGraw-Hill: México.
- 35. Jutglar, L. & Galán, M. (2012). *Termotecnia*. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- 36. Latorre Estrada, E. (1996). *Teoría general de sistemas aplicada a la solución integral de problemas*. Santiago de Cali: Universidad del Valle
- Lázaro Naranjo, C. (2004). Simulación por elemento finito del proceso de formado de conexiones T sin costura en caliente (Tesis Doctoral), Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Legrand, M., Ventas Garzón, R. & Rodríguez Aumente, P. (2014). Ingeniería térmica, principios de termodinámica técnica y transferencia de calor. Madrid: Editorial Ibergarceta Publicaciones, S.I.
- López Arango, D. (2008). *Termodinámica*. Tercera Edición, Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- 40. MatWeb Material Property Data (2017). Gray Cast Iron, ASTM A 48 Class 40. (https://goo.gl/sxp9tB) (2017-07-18)
- 41. Montes, M. (2015). *Teoría y problemas de transmisión de calor*. Madrid: UNED
 Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Moraleda, A. & Villalba, C. (2016). Métodos de simulación y modelado. Universidad Nacional de la Educación a Distancia. Madrid: Editorial UNED.
- Morales, J. F. & Santiago, A. S. (2016). Determinación del estado tensional de un invernadero tipo capilla en áreas de clima tropical, *Innovare*. 5(1), 1-19. (https://goo.gl/UXdwSW) (2017-05-15)
- 44. Mott, R. (1996). *Mecánica de fluidos aplicada*, Cuarta Edición. México: Pearson Educación.
- 45. Neira, O. (2015). Simulación Numérica de la distribución de temperaturas y flujo de aire en el horno de una cocina de uso doméstico (Tesis Maestría), Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.

- Nieto Carlier, R., González Fernández, C., López Paniagua, I., Jiménez Álvaro, A. & Rodríguez Marín, J. (2015). *Termodinámica*. Madrid: Dextra Editorial S.L.
- 47. Norton R. (2011). *Diseño de máquinas, un enfoque integrado*. Cuarta edición, México D.F.: Pearson Educación.
- 48. Oñate, E. (2005). *Cálculo de estructuras por el MEF. Análisis estático lineal.* Barcelona, CIMNE.
- 49. Perelli, B. (2017). Resistencia de materiales, elasticidad y plasticidad. *Retineo Ingeniería*. (https://goo.gl/ZoYmef) (2017-03-19)
- 50. Pinto Ramírez, E. (2015). *Propiedades de los Materiales*. Universidad de Bucaramanga.
- 51. Potter, M. C., Wiggert, D. C. & Ramadan, B. H. (2015). *Mecánica de Fluidos*. CENGAGE Learning. Colombia: Santa Fe.
- Reddy, J. N. (1993). An introduction to the finite element method (Vol. 2, No. 2.2). New York: McGraw-Hill.
- 53. Rey Rey, J. (2013). La barrera del análisis estructural y la representación gráfica en el desarrollo de los proyectos arquitectónicos: el caso de la Ópera de Sidney (Tesis Doctoral). Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, España (https://goo.gl/atZsZR) (20-05-2017)
- Roa M. A. & Garzón D. A. (2002). "Introducción al modelamiento por elementos finitos con ANSYS", Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.
- 55. Rodríguez Rojas, C. P. (2005). Simulación computacional de procesos de conducción de calor en alimentos de formas irregulares complejas (Tesis Doctoral). Licenciatura en Alimentos, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile, Valdivia. (https://goo.gl/gHqoST) (2017-05-20)
- 56. Salazar Trujillo, J. E. (2007). Resistencia de materiales básica para estudiantes de ingeniería. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- 57. Shannon, R. E., Alderete, B. F. & Pérez, U. A. (2003). *Simulación de sistemas: Diseño, desarrollo e implantación*. México: Trillas.

- 58. Shigley, J. E., Mischke, C. R., Bocanegra, F. P. & Correa, C. O. (1990). *Diseño* en ingeniería mecánica (8). London: McGraw-Hill.
- 59. Streeter, V., Wylie, E., Bedford, K., 2000, Mecánica de los fluidos (9): Santafé de Bogotá, McGraw-Hill.
- 60. Tarifa, E. E. (2001). Teoría de modelos y simulación. Facultad de Ingeniería, Universidad de Jujuy.
- 61. TESTO. (2009). Testo 882 Termal Image Instrucción Manual
- Vergara, M. J. (2002). *H-Adaptatividad en elementos finitos con refinamiento por subdivisión* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, España).
- 63. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Bugeda, G., Cervera, M. & de Navarra, E. O. I. (2004). El método de los elementos finitos. CIMNE.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA UNIDAD DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA

Autores:

Director:

Jorge Antonio Pérez Torres Jhison Enrique Romero Romero Paúl Bolívar Torres Jara

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN SECADOR CILÍNDRICO ROTATIVO DE LA INDUSTRIA PAPELERA

El presente trabajo investigativo asume el reto que radica en la necesidad de realizar una simulación computacional de esfuerzo-deformación y transferencia de calor de un secador cilíndrico rotativo de la industria papelera por medio de la simulación computarizada con herramientas CAD (*Computer Aided Desing*) – CAE (*Computer Aided Engineering*), que permitan establecer las condiciones óptimas de funcionamiento del proceso de secado, y establecer posibles zonas críticas, precisando los valores de las propiedades que se ingresan en el proceso de simulación.

La presente investigación sintetiza el conocimiento del método de los elementos finitos (MEF), documentando los pasos para la construcción de los elementos, su simplificación, asignación de condiciones de frontera y generación y refinamiento de mallas. También se establece el modelo matemático ajustado a las condiciones de funcionamiento del secador cilíndrico rotativo, considerando la teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles, análisis diferencial de la cantidad de movimiento del vapor mediante el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes, balance de energía y transferencia de calor.

Esta investigación ha sido apoyada con los fondos de la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca, y se desarrolla en el software *ANSYS 17.0 Academic* 17.0; los resultados del mismo, así como el procedimiento empleado serán base para futuras investigaciones en el campo del análisis estructural, transferencia de calor de equipos mecánicos sometidos a rotación.