



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DEL EFECTO TÉRMICO EN EL LUBRICANTE DE DOS COJINETES SITUADOS EN DIFERENTES POSICIONES DE LA FLECHA DE UNA TURBINA DE GAS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO MECANICO

P R E S E N T A : MARCO OSVALDO VIGUERAS ZÚÑIGA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JAIME GONZALO CERVANTES DE GORTARI



CIUDAD UNIVERSITARIA

JULIO 2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

“Le doy gracias a Dios por todas sus bendiciones y por aquellas personas que a lo largo de mi vida me han brindado su amistad, apoyo y cariño”.

Julio del 2002.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	3
1. RESUMEN.....	5
2. INTRODUCCIÓN.....	7
3. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	8
3.1 Turbinas de gas.....	8
3.2 Transferencia de calor.....	12
3.2.1 Mecanismos de la transferencia de calor.....	12
3.2.2 Condiciones de frontera.....	14
3.3 Características de operación de la turbina "Dart II-C Turboprop, Rolls-Royce ".....	16
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
4.1 Condiciones de frontera para el volumen de control no.1.....	22
4.2 Condiciones de frontera para el volumen de control no.2.....	28
5. PROCEDIMIENTO.....	29
6. MODELO MATEMÁTICO.....	30
6.1 Modelo para el volumen de control no.1.....	30
6.2 Modelo para el volumen de control no.2.....	32
7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
7.1 Evaluación del modelo en el cojinete no. 4.....	42
7.2 Evaluación del modelo en el cojinete no. 5.....	47

8. CONCLUSIONES.....	53
APÉNDICES.....	55
Apéndice 1. Especificaciones de la Turbina.....	55
Apéndice 2. Propiedades termofísicas del material de la flecha.....	57
Apéndice 3. Propiedades del lubricante.....	58
Apéndice 4. Diagrama de bloques del programa numérico.....	59
BIBLIOGRAFIA.....	63

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Principio básico de una turbina de gas
- Figura 2. Diagrama del modelo Dart-IIC de Rolls Royce.
- Figura 3. Esquema de cojinetes.
- Figura 4. Distribución de temperaturas del fluido en la turbina.
- Figura 5. Distribución de temperaturas superficial de la flecha.
- Figura 6. Planteamiento del sistema
- Figura 7. Condición de frontera 2
- Figura 8. Condición de frontera 4
- Figura 9. Volumen de control 1
- Figura 10. Volumen de control 2
- Figura 11. Coordenadas del sistema bidimensional
- Figura 12. Sección interna del cojinete
- Figura 13. Sección del lubricante.
- Figura 14. Diagrama de cilindros coaxiales.
- Figura 15. Perfil de temperaturas de la sección de la flecha.
- Figura 16. Gráfica de la temperatura superficial de la flecha en función de la distancia.
- Figura 17. Gráfica de la temperatura superficial de la flecha en función de la distancia.
- Figura 18. Gráfica de la temperatura superficial de la flecha en la región del cojinete no.4.
- Figura 19. Gráfica de la temperatura superficial de la flecha en la región del cojinete no.5.
- Figura 20. Perfil de temperaturas del cuerpo interno en el cojinete no.4.

Figura 21. Gráfica de la temperatura superficial del cojinete no.4.

Figura 22. Gráfica de la temperatura del lubricante en el cojinete no.4 en función de la distancia .

Figura 23. Perfil de temperaturas del cuerpo interno cojinete no.5.

Figura 24. Gráfica de la temperatura superficial del cojinete no.5.

Figura 25. Gráfica de la temperatura del lubricante en el cojinete no.5 en función de la distancia.

Figura 26. Perfil de temperaturas de la flecha y del cuerpo interno de los cojinetes no.4 y no.5.

1. RESUMEN

La transferencia de calor en los distintos elementos que conforman una turbina de gas así como su interacción entre ellos, juega un papel primordial para la selección y diseño de los materiales a emplear, con el fin de garantizar el ciclo de vida útil de la maquinaria.

En particular se estudió la transferencia de calor en determinada sección de la flecha de una turbina de gas, desde la temperatura del rodete en contacto con la flecha, hasta el lubricante de los cojinetes que sostienen determinada sección de flecha. La cual se consideró primordial en el estudio de la transferencia de calor, ya que en ella se lleva a cabo la transformación de energía térmica a energía mecánica.

Los cojinetes (chumaceras) están provistos de lubricantes especiales para altas velocidades, que desarrolla la flecha de la turbina; sin embargo, la energía que es capaz de transmitir la flecha por el mecanismo de transferencia de calor por difusión, implica que los componentes y accesorios que se encuentran en contacto con la superficie de la flecha, operen a temperaturas mucho más elevadas de lo previsto, como es el caso del lubricante del cojinete.

El objetivo consiste en determinar la máxima temperatura que alcanza el lubricante en dos cojinetes situados en diferentes posiciones sobre la flecha. El primero está localizado antes de la primera etapa de la turbina, y el segundo en la parte final de la flecha, como se puede observar en la figura 1.

Se seleccionó la turbina de gas de Rolls Royce modelo Dart II-C, ya que se tiene la información necesaria para el desarrollo de esta investigación. La característica principal de la turbina consiste en tener una sola flecha simple, sobre la cual va colocado el compresor y turbina.

La transferencia de calor en la flecha, por su naturaleza propia de operación (cilindro girando inmerso en un fluido en este caso aire) implica el planteamiento de condiciones de frontera del primero, segundo y tercer tipo.

El estudio de la transferencia de calor es un tema que implica hacer varias consideraciones, las cuales permiten obtener ecuaciones con solución. Es por ello que a lo largo

de este problema se hacen diversas suposiciones basadas en la teoría acoplada para este fenómeno.

Las consideraciones generales a lo largo del planteamiento del modelo son: que el sistema opera en estado permanente, que la conductividad es continua, que el material es isotrópico y que mantiene el material las mismas propiedades en un rango de temperatura dado.

Con respecto al aire que está en contacto con la flecha, se consideraron los siguientes aspectos: se comporta como gas ideal, la capa límite sobre las superficies está completamente desarrollada a lo largo de cada punto de la superficie de la flecha. De igual manera los dos coeficientes de convección que se obtuvieron, fueron considerados como el coeficiente de convección promedio en las cada una de las superficies correspondientes. El lubricante se consideró como un fluido newtoniano, y que no varía en dirección de la flecha.

El modelo que se obtuvo a partir de las consideraciones anteriores y basado en las leyes que rigen la transferencia de calor, determinó que efectivamente la temperatura de operación del lubricante en el cojinete no.4 en comparación con el cojinete no.5, tienen una diferencia de temperatura de 130 K aproximadamente.

El haber seleccionado dicha turbina, permite ampliar y adaptar el modelo matemático a turbinas de otro tipo tal como se explica en el siguiente capítulo. Con el fin de proporcionar a este trabajo una base teórica, en el capítulo 2 se describen conceptos básicos del mecanismo de transferencia de calor por difusión, dando fundamento a las ecuaciones y modelos matemáticos obtenidos en el planteamiento del problema del capítulo 4.

Se presenta en el capítulo 5 un diagrama de flujo para la descripción del procedimiento del problema, aunque en el capítulo 6 se describe de forma detallada y en base a los resultados obtenidos la solución del problema.

Finalmente una serie de comentarios y conclusiones son presentadas en el último capítulo. Acompañado de una serie de datos que fueron utilizados para las propiedades del material de la flecha y de ambos fluidos en consideración (aire, aceite).

Gran parte de las gráficas y perfiles de temperatura mostrados a lo largo del trabajo fueron obtenidos a partir del procesamiento de datos en los programas Matlab, Ansys 6.6 y Emulador RPL HP48, tal como se describe en el diagrama de bloques del apéndice 4.

de este proyecto se hacen diversas suposiciones basadas en la teoría acoplados para este fenómeno.

Las consideraciones generales a lo largo del planteamiento del modelo son: que el sistema opera en estado permanente, que la conductividad es continua, que el material es isotrópico y que mantiene el material las mismas propiedades en un rango de temperatura dado.

Con respecto al aire que está en contacto con la flecha, se consideraron los siguientes aspectos: se comporta como gas ideal, la capa límite sobre las superficies está completamente desarrollada a lo largo de cada punto de la superficie de la flecha. De igual manera los dos coeficientes de convección que se obtuvieron, fueron considerados como el coeficiente de convección promedio en las cada una de las superficies correspondientes. El lubricante se consideró como un fluido newtoniano, y que no varía en dirección de la flecha.

El modelo que se obtuvo a partir de las consideraciones anteriores y basado en las leyes que rigen la transferencia de calor, determinó que efectivamente la temperatura de operación del lubricante en el cojinete no.4 en comparación con el cojinete no.5, tienen una diferencia de temperatura de 130 K aproximadamente.

El haber seleccionado dicha turbina, permite ampliar y adaptar el modelo matemático a turbinas de otro tipo tal como se explica en el siguiente capítulo. Con el fin de proporcionar a este trabajo una base teórica, en el capítulo 2 se describen conceptos básicos del mecanismo de transferencia de calor por difusión, dando fundamento a las ecuaciones y modelos matemáticos obtenidos en el planteamiento del problema del capítulo 4.

Se presenta en el capítulo 5 un diagrama de flujo para la descripción del procedimiento del problema, aunque en el capítulo 6 se describe de forma detallada y en base a los resultados obtenidos la solución del problema.

Finalmente una serie de comentarios y conclusiones son presentadas en el último capítulo. Acompañado de una serie de datos que fueron utilizados para las propiedades del material de la flecha y de ambos fluidos en consideración (aire, aceite).

Gran parte de las gráficas y perfiles de temperatura mostrados a lo largo del trabajo fueron obtenidos a partir del procesamiento de datos en los programas Matlab, Ansys 6.6 y Emulador RPL HP48, tal como se describe en el diagrama de bloques del apéndice 4.

2. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la transferencia de calor en una sección de flecha para turbina de gas durante su operación. Se pretende obtener el perfil de temperatura de la flecha en dicha sección y determinar la temperatura real de operación del lubricante en los cojinetes situados como lo muestra la Figura 1.

La transferencia de calor depende de la naturaleza del sistema, ya que el medio de propagación como puede ser por un fluido, un gas o en este caso un sólido, la geometría que presente y el medio que lo rodea, definirán el comportamiento de las estructuras moleculares del estado físico del material, con lo cuál se determinan las condiciones de frontera de propagación del calor en el sistema.

Un cojinete está formado por tres partes: cuerpo interno, lubricante y cuerpo externo. Si se determina la temperatura de la superficie de la flecha en contacto con el cuerpo interno del cojinete, permitirá obtener tomando en cuenta las consideraciones respectivas el perfil de temperaturas del cuerpo interno del cojinete (figura20).

Los cojinetes están lubricados por materiales que han sido previamente calculados para garantizar un tiempo de vida útil; su selección se basa principalmente en la velocidad de giro de la flecha. Sin embargo aquella energía que es capaz de transmitir la flecha por medio de difusión de calor, implica un incremento de la temperatura de operación estimada en el lubricante. Lo que conlleva a que el lubricante tenga un tiempo de vida útil menor, que el estimado por la condición única de la velocidad de giro.

Esta investigación está basada en una turbina de gas para avión, ya que por el tamaño de ésta, se puede establecer volúmenes de control perfectamente definidos en sus fronteras. El modelo matemático y planteamiento del problema, pueden ser utilizados en otro tipo de turbinas e inclusive en el estudio de determinados mecanismos de máquinas que utilicen un arreglo similar al planteado en este trabajo.

Debido a las condiciones de operación de la flecha, es necesario utilizar métodos numéricos, capaces de simular este modelo matemático, tal como se irán señalando.

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

3.1 Turbinas de gas

La teoría sobre las turbinas de gas, se estableció mucho antes de que los conocimientos en materiales y la mecánica de fluidos fueran desarrollados. El concepto básico y general de la turbina de gas fue patentada en 1791 por John Barber, pero el desarrollo potencial de éstas no ocurrió hasta 1930 cuando Brown Boveri mostró la primera turbina de gas para la generación de energía eléctrica en la Exhibición Nacional de Suiza (Zurich 1939). La primera turbina de propulsión, empleada en la industria de la aviación fue hasta el 27 de agosto de 1939.

Hoy en día las turbinas de gas tienen un sin fin de aplicaciones y usos. Su aplicación principal es como fuente motora de las aeronaves, su uso en la producción de energía eléctrica ha tenido un rápido aumento debido a la eficiencia que presentan. El desarrollo de turbinas de gas ha permitido que la ciencia y tecnología puedan desarrollar conocimientos en áreas como Mecánica de Materiales, Diseño Mecánico y Mecánica de Fluidos por mencionar solo algunas disciplinas relacionadas con el tema. Su gran viabilidad ha permitido que sean empleadas para compresores, fuentes motoras de barcos, trenes, automóviles, camiones, tanques y en las últimas décadas su utilización en la industria de generación de energía eléctrica al utilizarse para el ciclo combinado.

-Principio básico-

Una turbina de gas esta diseñada para convertir la energía de un combustible en alguna forma de energía utilizable, por ejemplo en energía mecánica, que a través de una flecha convierte la energía en fuerza produciendo un trabajo o bien girando a altas velocidades como es el caso de las turbinas de aviones. Una turbina de gas consiste básicamente en tres partes: compresor, cámara de combustión y turbina. El compresor comprime al aire en forma adiabática, el cuál es conducido a la cámara de combustión, es aquí donde es mezclado con el combustible y se produce la combustión, el producto de la combustión es entonces expandido en forma

adiabática en la turbina, donde parte del trabajo obtenido por la expansión es utilizado por el compresor y la parte restante es el trabajo entregado en la flecha de la turbina. [12]

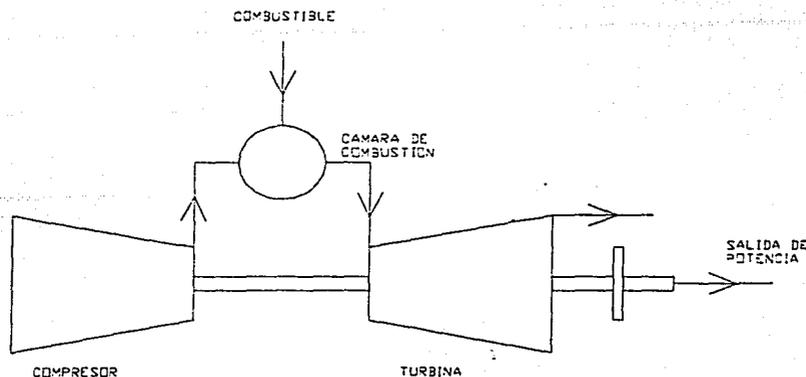


Figura 1. Principio básico de una turbina de gas.

-Historia de las turbinas de gas-

- 1791 John Barber en Suiza obtiene la primera patente del principio básico de funcionamiento de una turbina de gas 1791.
- 1872 Stolze en Francia obtiene la patente al diseñar la primera turbina de gas con un compresor axial de varias etapas en la misma flecha, con un intercambiador de calor y una cámara de combustión.
- 1895 Charles G. Curtis en Estados Unidos la primera patente de una turbina de gas con todos sus elementos. 1895 Stolze en Francia pone la primera turbina en operación.
- 1900 Los hermanos Armangand en Inglaterra construyen la primera turbina a gran escala. Stodola en Alemania desarrolla una turbina con una eficiencia del 3%.
- 1927 H.Holzwarth en Inglaterra construye la primera turbina de gas económicamente rentable.

- 1930 Whittle en Inglaterra obtiene la primera patente de turbinas de gas como fuente motora de las aeronaves.
- 1936 La compañía Power Jets, Ltd. en Inglaterra desarrolla una turbina simple de una sola etapa en el compresor.
- 1936 Ernest Heinkel en Alemania pone en marcha un diseño de una turbina con compresor centrífugo en un turbojet.
- 1938 Von Ohian de Junkers Airplane Company junto con Ernst Heinkel A.G. en Alemania, construyen turbinas para turbojets con compresores axiales y materiales nuevos, obteniendo así un tamaño pequeño y de bajo peso, con la serie 001 – 006 y S-3b.
- 1938 Estados Unidos enfoca su desarrollo en turbocompresores para aumentar la eficiencia en las turbinas, obteniendo así eficiencias de hasta 65%.
- 1939 Brown Boveri en Inglaterra construye la primera turbina de gas para la generación de energía eléctrica 4000kW.
- 1939 Power Jets, Ltd, en Inglaterra bajo la guía de Whittle diseñan y ponen en marcha la turbina W1.
- 1941 Power Jets, Ltd, en Inglaterra construyen los modelos W1A, y W2 sin un éxito considerable.
- 1942 Power Jets, Ltd y Rolls-Royce en Inglaterra diseñan turbinas con compresores centrífugos, modelo W2B.
- 1942 Las compañías de la Fuerza Aérea Norteamericana, Lockheed Aircraft, NACA, Westinghouse Electric Corporation, Wright Aeronautical Corporation, General Electric Company, Allison División de GM, Pratt & Whitney. Desarrollaron modelos de turbinas basados en la serie W2B de Power Jets Ltd. logrando el liderazgo en la fabricación de turbinas, ya que éstas eran de mayor potencia y menor peso, que tanto alemanes e ingleses habían logrado desarrollar.
- 1944 Rolls –Rocien Inglaterra construye el modelo Derwent I, eliminando el flujo reversible.
- 1945 RAE y Metropolitan Vickers Company en Inglaterra desarrollan el turbojet F-2.
- 1945 – 1950 Rusia incursiona en el desarrollo de turbinas para aviones, basándose en la ingeniería de las turbinas de BMW y Jumbo.

- 1950 – 1960 En esta década se desarrollaron materiales capaces de resistir altas temperaturas. Es el inicio de turbinas para aviones comerciales como la compañía Boeing con su modelo 707 en 1954, y JT-3 de Pratt- Whitney. General Electric desarrolla la primera turbina para helicóptero la T58.
- 1960 – 1970 Incursionan principalmente las marcas comerciales como Allison Divison de GM y Chrysler Company, esta última fabrica el primer vehículo impulsado por una turbina de gas. Rolls Royce en 1967 saca al mercado la primera turbohélice de 3 flechas.
- 1970 – 1980 Se introducen varios factores enfocados principalmente en peso, costo, rentabilidad, y manufactura. El consumo de combustible se reduce al 20% que en 1960. Ingleses y franceses fabrican el primer avión supersónico comercial “Concorde”. Se ponen en marcha normas internacionales de control de emisiones.
- 1980- 1990 La industria de las telecomunicaciones juega un papel esencial en los medios de transporte, se enlazan y controlan vuelos comerciales vía satelital. Comienzan las termoeléctricas a utilizar el ciclo combinado para aumentar la eficiencia de su producción.
- 1990-2000 Se desarrollan materiales compuestos que aligeran el peso y aumentan la eficiencia en las turbinas. Se desarrollan las micro turbinas capaces de generar hasta 30 MW. La NASA desarrolla un sistema impulsor a base de plasma. La era de las comunicaciones trae consigo un sin fin de comodidades para los usuarios del transporte aéreo, como acceso a línea telefónica, internet, acceso a redes bancarias etc.

-Clasificación general de turbinas de gas-

- Turbinas de gas para producción de energía Eléctrica
- Turbinas de gas para propulsión de aviones [11]
 - a) Turbojets
 - b) Turbofans
 - c) Turboprop (turboshaft)

3.2 Transferencia de calor [1]

La transferencia de calor es el transporte o la transferencia de energía como resultado de una diferencia de temperaturas, atendiendo principalmente para su estudio la rapidez y la manera con la que se transmite la energía.

3.2.2 Mecanismos de la transferencia de calor [1]

Los métodos de estudio y los procedimientos de diseño que de ellos se derivan, empleados en los problemas de Transferencia de Calor están basados en ciertos modos o mecanismos de transferencia de energía observados experimentalmente. Los mecanismos físicos de transferencia de energía son complejos.

Generalmente se acepta clasificarlos, junto con otros fenómenos de transporte de propiedades distintas a la energía, en tres categorías: difusión, convección y radiación. Los procesos de difusión se caracterizan por presentarse en materia relativamente densa, o bien entre cuerpos físicamente en contacto, y la propiedad de que se difunde lo hace a través de las actividades e interacciones moleculares. En los fenómenos de convección se requiere la presencia de un fluido en movimiento para efectuar el transporte de calor, de cantidad de movimiento o de materia. Finalmente, los procesos de radiación son típicos de materiales cuya densidad es relativamente baja o nula.

Los mecanismos de transferencia de calor empleados en este trabajo son descritos a continuación:

1. Transferencia de calor por conducción.

El término conducción de calor se refiere a la transferencia de energía térmica por difusión en un material "denso" como es el caso de un sólido o el de un fluido en reposo. El proceso físico mediante, el cual se logra este efecto se puede visualizar, a nivel microscópico, como los frecuentes choques entre las moléculas en el caso de un gas y con ciertas restricciones

en el caso de un líquido; o bien, mediante la vibración de la estructura cristalina y la traslación de electrones en el caso de los sólidos.

El efecto macroscópico de lo anterior es que, como resultado de una diferencia de temperaturas entre dos regiones del medio conductor, se transfiere energía con una rapidez que resulta directamente proporcional a la diferencia de temperaturas y al área transversal a la dirección de conducción, e inversamente proporcional a la distancia cubierta.

$$Q \propto A \frac{\Delta T}{L} \quad (3.1)$$

es decir,

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Ecuación de la Ley de Fourier}).$$

Donde Q es la rapidez de conducción de calor (es decir, energía por unidad de tiempo), ΔT es la diferencia de temperaturas entre dos puntos separados una distancia L , A es el área perpendicular a esta dirección y k es la constante de proporcionalidad, denominada conductividad térmica, la cual constituye una propiedad física del material y tiene como dimensiones $[F\theta^{-1}T^{-1}]$.

2. *Transferencia de calor por convección*

La transmisión de calor por convección, entre un cuerpo sólido y un fluido en movimiento a temperatura diferente. Se trata en realidad de la combinación de tres efectos. Primeramente las partículas de fluido en inmediato contacto con la superficie sólida aumentan o disminuyen su energía (dependiendo de cuál de los dos cuerpos tenga mayor temperatura) mediante el mecanismo de conducción de calor, es decir, debido a la comunicación entre las moléculas de ambas sustancias en dicha superficie que las separa. Estos elementos de fluido, con su energía interna modificada, se mueven hacia regiones de temperatura diferente, dejando su lugar a otras partículas, que a su vez tomarán o cederán energía en la superficie sólida. Finalmente, las primeras partículas de fluido, al llegar a regiones de diferente temperatura, se mezclan con otros elementos allí existentes, o bien, ante la presencia de otra superficie sólida, transfieren parte de su energía por conducción, tal como lo hicieron con el primer sólido. Se establece así un transporte continuo de energía mediante el fluido en movimiento. Obsérvese

entonces que el mecanismo de convección no sólo depende de una diferencia de temperaturas: es indispensable además el movimiento de un fluido.

Aspectos tales como la velocidad del fluido, la rugosidad de la superficie y la capacidad de mezclado del escurrimiento (la cual depende del régimen del flujo, laminar o turbulento) juegan un papel importantísimo en la transmisión de calor por convección.

Generalmente se acostumbra clasificar este tipo de transmisión de calor en convección forzada y convección libre o natural. La diferencia entre una y otra es simplemente la forma como se produce el movimiento del fluido: para la primera el fluido se mueve debido a la acción de un agente externo, la segunda tiene su origen en la diferencia de temperaturas de densidades en el fluido generalmente asociada a una diferencia de temperaturas que produce una fuerza de flotación que induce al fluido a moverse sin que exista un agente externo para ello.

Se acostumbra a caracterizar de manera global el enfriamiento de una pared bañada por un fluido en movimiento a una temperatura menor utilizando la siguiente expresión:

$$Q = hA(T_o - T_f) \text{ Ley de Newton de enfriamiento} \quad (3.2)$$

donde, Q es el flujo de calor perpendicular al segmento de superficie A de la pared; T_o y T_f , respectivamente, son las temperaturas de la pared y el fluido a una distancia suficientemente alejada de aquélla, y h es un coeficiente de transmisión de calor por convección, el cual depende de propiedades del fluido tales como la densidad, la viscosidad, la conductividad térmica, etc. y de su velocidad y régimen de escurrimiento, las dimensiones son $[FL^{-1}\theta^{-1}T^{-1}]$.

3.2.2 Condiciones de frontera [1]

Como consecuencia directa de la Transferencia de Calor en conducción, se establecen diferencias de temperatura entre la superficie y el centro de las piezas metálicas. Los parámetros que nos ayudan a estudiar el medio de transmisión son denominadas Condiciones de Frontera. Estas condiciones han sido clasificadas en los siguientes tres tipos:

- 1) Condición de Frontera de Primer Tipo: Son aquellas condiciones que se especifican mediante el valor de la temperatura en la superficie o contorno correspondiente, por lo

general se presenta cuando se conoce la distribución de la temperatura en la superficie, esto es:

$$T = f(r, t) \quad (3.3)$$

Donde la temperatura en la superficie (T) es en general, una función de la posición y el tiempo.

- 2) Condición de Frontera de Segundo Tipo. Se toma en cuenta el valor que adquiere el flujo de calor en la superficie considerada; se trata entonces de establecer el valor para la derivada de la temperatura, por lo general el flujo de calor se describe en las superficie, esto es:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = f(r, t) \quad (3.4)$$

donde $\partial T / \partial n$ es el gradiente térmico sobre la superficie, y $f(r, t)$ describe el flujo de calor normal a la superficie.

O bien:

para $x=0$,

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = q_0$$

es decir,

$$\left[\frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} = -\frac{q_0}{k}$$

para $x=L$,

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

es decir,

$$\left[\frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=L} = 0$$

Se pueden también tener condiciones de frontera en función de la posición inicial.

- 3) Condición de Frontera del Tercer Tipo. Las que expresan la transmisión de calor entre la superficie bajo estudio y un fluido en movimiento de temperatura conocida que se encuentre en contacto con dicha superficie. Esta condición de frontera debe establecer la igualdad del calor transmitido por conducción en el sistema de interés con el calor transferido por convección, expresa la relación entre la temperatura y su derivada en la superficie.

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + hT = hT_{\infty}(r, t) \quad (3.5)$$

donde, la temperatura de la superficie (T) y la temperatura del fluido (T_{∞}) son una función de la posición y el tiempo.

En nuestro caso particular, para el sistema de la flecha, se definen las condiciones de frontera del segundo y del tercer tipo.

Para estimar estas condiciones de frontera, se utilizarán los datos técnicos de operación plena de la turbina en estudio. Las condiciones de frontera evaluadas en los volúmenes de control se consideraran en régimen permanente.

3.3 Características de operación de la turbina "Dart Turboprop de Rolls Royce"

El tercer tipo de turbinas de gas usadas para la propulsión de aeronaves es el diseño del turboprop. La propulsión de un turboprop es acompañada a través de la combinación de acciones de una propela al frente del sistema de engranaje y por la parte de atrás son expulsados a altas velocidades los gases productos de la combustión al pasar a través de la tobera. Un Turbojet probablemente se convierta en un turboprop si se añade a la turbina una propela, reduciendo su velocidad a través del sistema de engranes.

Un turboprop combina las ventajas del turbojet la propulsión y la eficiencia de la propela, los turbojets varían su potencia de propulsión cuando atraviesan bolsas de aire (vacíos que se crean por la diferencia de temperaturas), sin embargo los turboprop fuerzan al aire a mantener siempre una cantidad de aire constante que requiere el compresor.

La turbina en estudio es la mostrada en la figura 2 que muestra una turbina de gas "Turboprop" de una sola flecha, (modelo Dart de Rolls Royce).

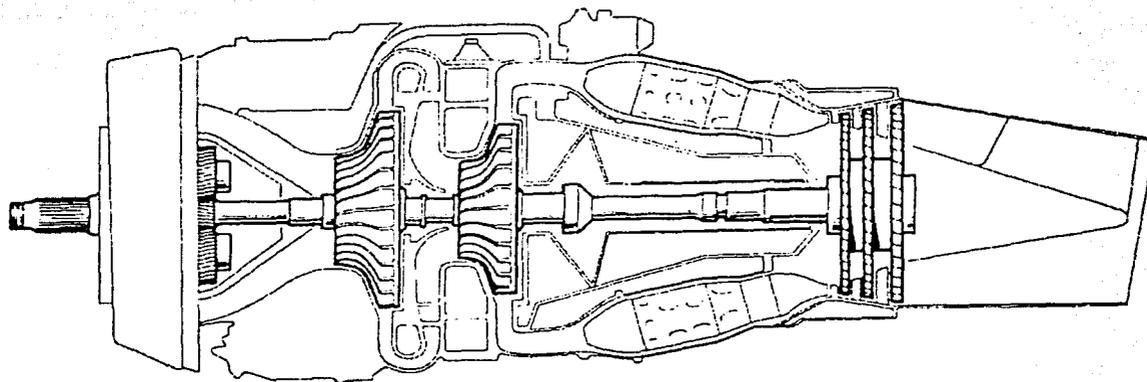


Figura 2. Diagrama del modelo Dart II-C de Rolls Royce

CARACTERISTICAS GENERALES

Potencia	2500kW
Año	1985
Combustible:	Turbosina (MIL-T-5624H)
Compresor:	Centrífugo, 2 etapas
Cámara de combustión	2 cámaras de combustión
Estabilidad de la turbina	90% Propela

	10% Tobera
Gasto del compresor (aire)	1 kg/s
Compresión total (2 pasos)	1 a 12
Eficiencias:	100% Difusor 87% Compresión 89% Turbina 89% Propela
Temperatura del gas de salida	763 K
Presión de salida	172.4 kPa
Velocidad de crucero	643 km/h
Velocidad de flujo de la propela	0.5 Mach
Velocidad de la flecha	261.8 rad/s

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la transferencia a través de la flecha de una turbina de gas hasta la pared de contacto entre el cojinete y el lubricante.

Los objetivos particulares se describen a continuación:

- Determinar el perfil de temperatura de la flecha
- Obtener la temperatura de operación del lubricante, en base a la transferencia de calor que existe a través de la flecha.

La justificación de los objetivos va en relacionado con la obtención de la temperatura del lubricante en los cojinetes no. 4 y no.5. El lubricante del cojinete que se encuentra ubicado en la fase primera de la turbina, presentará una vida útil mayor que el lubricante del cojinete ubicado en la segunda fase de la turbina, debido a la transferencia de calor que implicará una diferencia en temperaturas de operación de consideración.

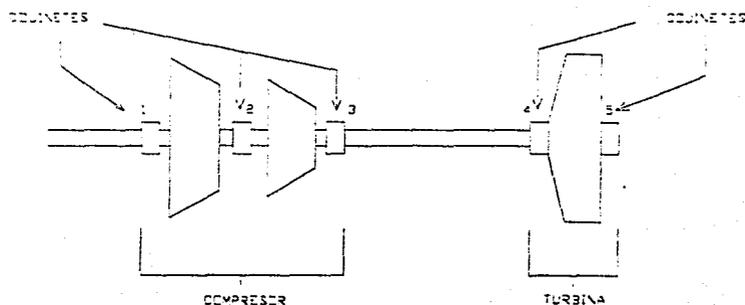


Figura 3. Localización de cojinetes sobre la flecha de la turbina.

Para el desarrollo de este proyecto, se consideran las siguientes características y condiciones:

- Condiciones estándar
- Temperatura de operación de la turbina (Apéndice 1)
- Cojinete ubicado en la posición 4 (figura 3)
- Cojinete ubicado en la posición 5 (figura 3)
- Aire como fluido que rodea a la flecha
- Ambos cojinetes con mismas propiedades y características (lubricante).
- Flecha del mismo material

Los problemas de transferencia de calor son extremadamente complejos, además de que a menudo se presentan ecuaciones diferenciales sin solución analítica. Es por ello conveniente hacer la siguiente aclaración: durante el desarrollo de esta tesis, se harán las consideraciones necesarias para encontrar la solución del modelo, esto puede implicar datos técnicos obtenidos por la investigación teórica, datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Termofluidos, o bien consideraciones específicas de operación en estado permanente.

La temperatura a través del aire en el paso de la turbina esta representada en la figura 4. , la cual muestra en cada una de las etapas el valor de la temperatura que va adquiriendo el aire, debido a los proceso termodinámico que va sufriendo. La temperatura en el punto 4, corresponde a la temperatura de la cámara de aire que encierra dicho volumen, se recomienda consultar la figura 2.

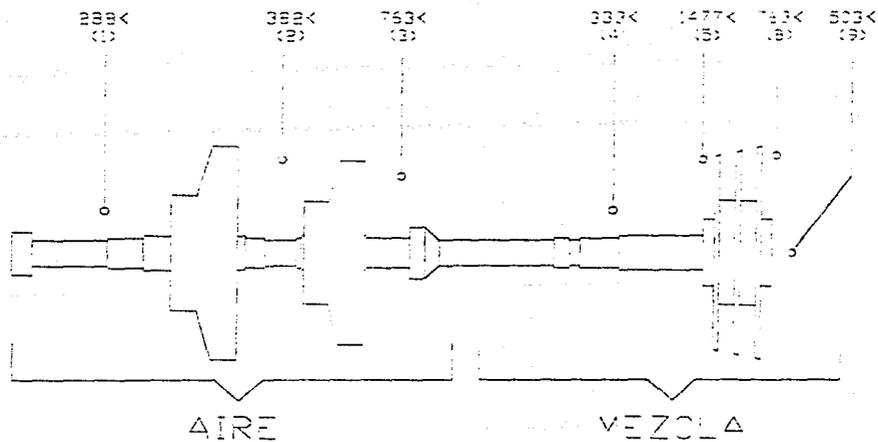


Figura 4. Distribución de temperatura del fluido en la turbina.

La temperatura superficial de la flecha, se muestra en la Figura 5, el valor de la temperatura en el punto 5, será de gran utilidad para el establecimiento de las condiciones de frontera. (Apéndice no.1)

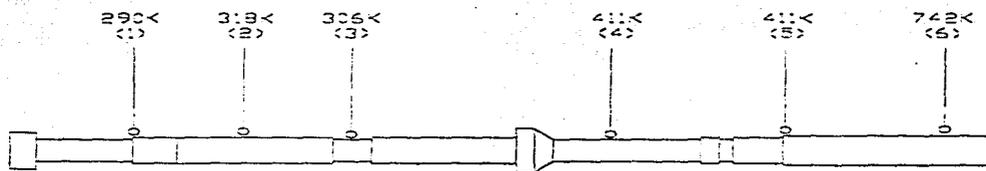


Figura 5 Distribución de temperaturas sobre la superficie de la flecha.

Se puede observar claramente el área crítica térmica de la flecha (punto 6), ya que en ellas la temperatura es mayor que en el resto de la flecha debido a la transferencia de calor del

paso del fluido (gases de combustión) por los alabes y esta a través del rodete a la superficie de la flecha. Por lo anterior el sistema que se consideró para el estudio de este trabajo comprende: la sección de flecha donde esta colocado el rodete y sus cojinetes respectivos.

-Planteamiento del Sistema-

En la Figura 6, se plantea el sistema en estudio, que se dividirá en dos volúmenes de control

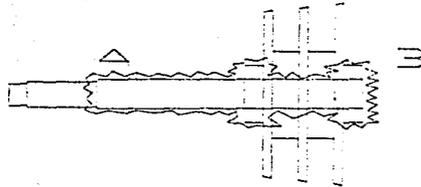


Figura 6. Sección de la flecha que se considerará como el sistema en estudio.

-Análisis del Problema (Volumen de Control)-

Para el estudio del sistema se separó el sistema en dos volúmenes de control, considerando las condiciones de frontera finales del primer volumen como las condiciones iniciales de frontera del segundo volumen de control.

El primer volumen de control está comprendido en la sección de la flecha que se encuentra en el sistema y el segundo volumen de control es el cuerpo y lubricante del cojinete.

4.1 Condiciones de frontera para el volumen de control no.1

Como un primer paso, es necesario determinar las condiciones de frontera de nuestro volumen de control no. 1, las cuales serán la base fundamental para el planteamiento del modelo matemático.

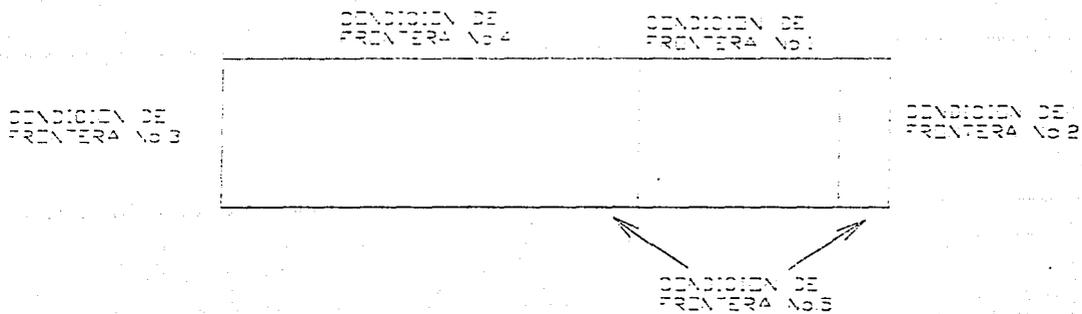


Figura 7. Localización de las condiciones de frontera en el volumen de control 1

Condición de frontera 1.- Considerar la fuente de energía que provee al volumen de control de flujo de calor. Esto es obviamente la temperatura superficial de la flecha, por la cual fluye el calor transmitido por el paso de la combustión tal como se explicó con anterioridad. La temperatura superficial a lo largo del cilindro del rodete y en contacto con la flecha, es dato conocido y se considerará constante a lo largo de dicha superficie sobre la flecha.

Para $y = 0.06$,
 $0.30 \leq x \leq 0.55$ la temperatura superficial es de: $T_{s1} = 742K$

Condición de frontera 2.- Superficie del extremo transversal B en contacto con el flujo de un fluido. Para establecer la condición de frontera del 3° tipo (3.5), es necesario obtener el coeficiente de convección promedio del fluido que rodea la superficie circular del final de la flecha, considerando:

- El flujo es aire a una temperatura de 503K (Figura 4)
- Se trata de un flujo forzado, debido al giro de la flecha
- Se considera un desarrollo de extensión del área de la sección en forma circular que ocupe el 85% ($r = 0.04$ a $r = 0.06$), como una placa plana con una $L_c = 0.185$ y una velocidad promedio del flujo del aire.

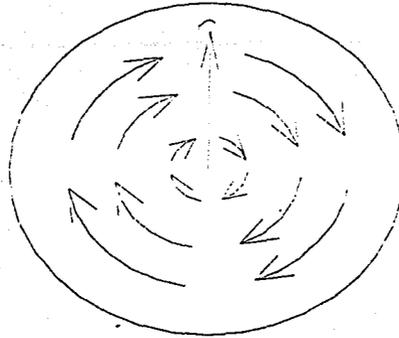


Figura 8. Condición de frontera 1

-Régimen del flujo-

$$Re = \frac{\rho L_c u}{\mu} \quad (4.1)$$

donde :

L_c esta en función del área en contacto con la superficie $\pi D^2 / 4$ o bien πr^2 y el perfil de velocidades proyectado desde $0 < r < 0.06$ m .

La velocidad de la flecha $\omega = 261.80$ rad/s,

La velocidad , en esta caso lineal esta expresada en términos de $u = \omega r$

Sustituyendo en la ecuación 4.1 tenemos:

$$Re = \frac{0.6964 \times 0.185 \times 15.70}{270.1 \times 10^{-7}} = 74924.83 = 0.074924 \times 10^5$$

Recordando que un número de Reynolds menor a 5×10^5 se considera un flujo en régimen laminar, por lo tanto el aire se comporta en la cara de la sección de la flecha como un flujo en régimen laminar, con una capa de límite desarrollada a lo largo de la superficie. Se considerará los parámetros principales de convección de acuerdo a las ecuaciones de capa límite, al suponer un flujo laminar incompresible y estable con propiedades de fluido constante, disipación viscosa despreciable y al reconocer que $dp/dx=0$.

Considerando el coeficiente local de convección en función del número de Nusselt resulta [13]:

$$Nu = \frac{h_r r}{k} = 0.332 Re_r^{1/2} Pr^{1/3}; \quad Pr \geq 0.6 \quad (4.4)$$

Sustituyendo en (4.4)

$$Nu = 0.332 \times 74924.83^{1/2} \times 0.684^{1/3} = 80.07$$

Finalmente el coeficiente de convección promedio que se utilizará es de:

$$\bar{h}_r = \frac{Nu k_f}{r_c} = \frac{80.07 \times 40.7 \times 10^{-3}}{0.06} = 54.3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Condición de frontera 3.- Superficie del extremo transversal A. La temperatura es conocida y se considera en este estado de frontera como constante. A lo largo del eje y con $x = 0$.

Para $x = 0$, la temperatura a lo largo de dicha región es de: $T_{s3} = 411K$

Condición de frontera 4.- Superficie longitudinal de la flecha sumergida en un fluido. Para establecer la condición de frontera del 3º tipo ecuación (3.5), es necesario obtener el coeficiente de convección promedio que rodea la superficie perimetral del cilindro considerando:

- El flujo es aire a una temperatura de 333K (Apéndice 2)
- Se trata de un flujo forzado alrededor del cuerpo de la flecha y toda la región se analizará como una capa límite totalmente desarrollada.

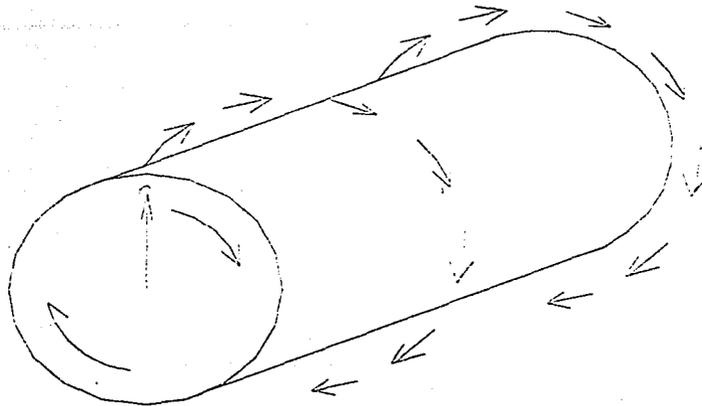


Figura 9. Condición de frontera 4

-Régimen del flujo

$$Re = \frac{\rho Lcu}{\mu}$$

donde :

Lc esta en función del diámetro del cilindro D^2 , $D= 0.12$ m.

La velocidad de la flecha (ω) es 2500 rpm = 261.80 rad/s,

La velocidad , en esta caso lineal esta expresada en términos de $u = \omega r$

Sustituyendo:

$$Re = \frac{1.045 \times 0.12^2 \times 15.70}{200.3 \times 10^{-7}} = 11794.98 = 0.11794.98 \times 10^5$$

Considerando los aspectos anteriores de la condición de frontera 2, implica que se trata de un flujo en régimen laminar, y se considerará los parámetros principales de convección de acuerdo a las ecuaciones de capa límite, al suponer un flujo laminar incompresible y estable con propiedades de fluido constante y disipación viscosa despreciable y al reconocer que $dp/dx=0$,

El coeficiente de transferencia de calor por convección para un flujo laminar uniforme en la capa límite sobre la superficie exterior del cilindro por las correlación del parámetro adimensional Nu, sustituyendo en ecuaciones (4.2), (4.3) con las condiciones del problema se obtienen las correlaciones propuestas por Churchill y Bernstein son las siguientes [13]:

$$Nu \cong 0.3 + 0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}; \quad Pr \geq 0.7 \quad (4.5)$$

Sustituyendo en (4.5)

$$Nu = 0.3 + 0.62 \times 11794.98^{1/2} \times 0.702^{1/3} = 60.1438$$

Finalmente el coeficiente de convección promedio que se utilizará es de:

$$\bar{h}_r = \frac{Nu k_f}{r_c} = \frac{60.14 \times 28.75 \times 10^{-3}}{0.06} = 28.818 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Condición de frontera 5.- Superficie que se considerará adiabática (región del cojinete).

$$q'' = 0$$

Es la condición de frontera final del volumen de control 1 y será la condición de frontera inicial para el volumen de control 2.

$$\text{Es decir: } T_{r=0.06} = \frac{\int_{x=0.250}^{x=0.300} T dx}{\Delta x} \quad (4.6)$$

4.2 Condiciones de frontera para el volumen de control no.2

Empleando las mismas consideraciones iniciales del volumen de control no.1 se establecen las siguientes condiciones de frontera:

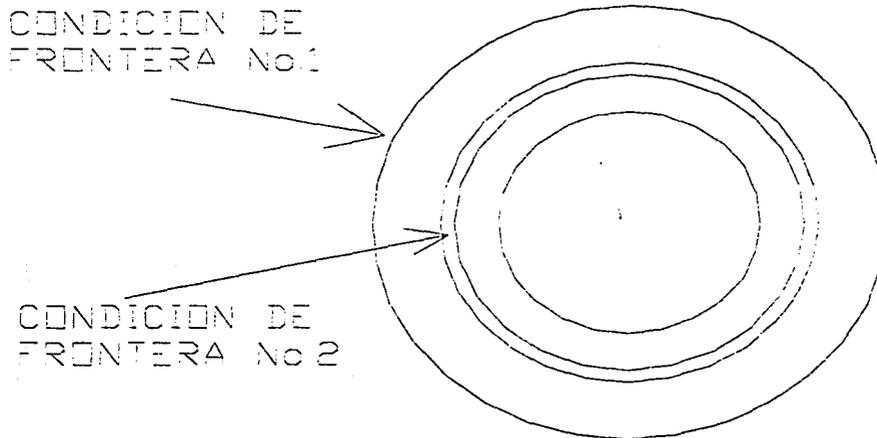


Figura 10. Localización de las condiciones de frontera en el volumen de control 2

Condición de frontera 1.- Temperatura de la pared interna del cojinete en contacto con el lubricante ($r = 0.085$). se trata de una frontera correspondiente a la ecuación (3.3), es decir:

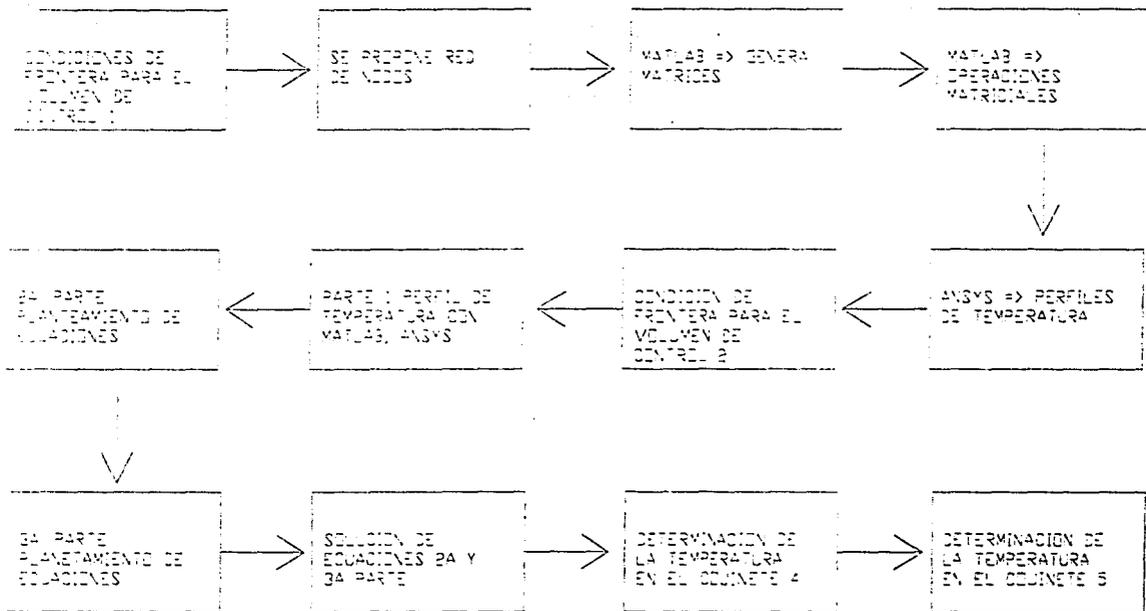
$$T_{r=0.085} = Cte$$

Condición de frontera 2.- Temperatura de la pared externa del cojinete en contacto con el aire que lo rodea, ($r = 0.110$), se trata de una frontera correspondiente a la ecuación (3.3), es decir:

$$T_{r=0.110} = 397K$$

5. PROCEDIMIENTO

El siguiente diagrama de bloques muestra el procedimiento para determinar la temperatura de operación del lubricante de los cojinetes 4 y 5.



6. MODELO MATEMÁTICO

6.1 Modelo para el volumen de control no.1

Suposiciones:

- 1.- Condiciones de estado permanente.
- 2.- Conducción bidimensional, por la forma geométrica que presenta el cuerpo en estudio (un cilindro sólido), se analizará un corte longitudinal con un espesor unitario, determinando el perfil de temperaturas dentro del cilindro y obteniendo la temperatura superficial en el lugar que es colocado el cojinete.
- 3.- Propiedades constantes del material (Apéndice 2).
- 4.- Ninguna generación interna de calor.

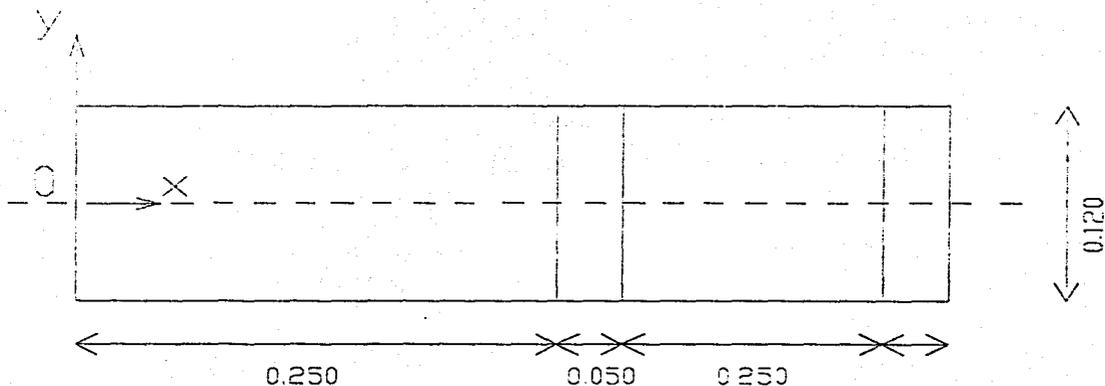


Figura 11. Coordenadas del sistema bidimensional de la flecha

-Análisis-

Para determinar el perfil de temperaturas que presenta esta sección de flecha, utilizaremos la solución de las diferencias finitas.

Se propone una Red nodal de $\Delta x = \Delta y = 0.010$, obteniendo 720 puntos discretos.

Utilizando los casos particulares de la solución de diferencias finitas, y relacionándolas con la naturaleza de las condiciones de frontera se obtiene la siguientes ecuaciones:

Para los nodos internos:
$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 4T_{m,n} = 0 \quad (6.1)$$

De ahí que para el nodo m,n la ecuación de calor, que es una ecuación diferencial exacta, se reduzca a una ecuación algebraica aproximada. Esta forma aproximada en diferencias finitas de la ecuación de calor se aplica a cualquier nodo interno que sea equidistante de sus cuatro vecinos. Simplemente requiere que la suma de las temperaturas asociadas con los nodos vecinos sea cuatro veces la temperatura de interés.

Condición de Frontera 4 y 2:
$$(2T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) + \frac{2h\Delta x}{k} T_{\infty} - 2\left(\frac{h\Delta x}{k} - 2\right)T_{m,n} = 0 \quad (6.2)$$

Condición de Frontera 5:
$$(2T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) + \frac{2q''\Delta x}{k} - 4T_{m,n} = 0 \quad (6.3)$$

donde $q''=0$ ya que se consideró adiabática

Condición de Frontera 1 y 3: Los nodos toman el valor de la temperatura dada.

$$T_{m,n} = T_{\text{superficie}} \quad (6.4)$$

Donde m,n es la localización del nodo en estudio en el sistema cartesiano planteado.

De lo anterior se derivan las ecuaciones que nos determinan el perfil de temperaturas, lo que implica con el arreglo de red nodal propuesta un total de 720 ecuaciones.

Usando el Método de inversión de matrices con ayuda del programa MatLab (Apéndice 4) es posible determinar la solución del sistema de ecuaciones, generando las matrices correspondientes:

[A] = Matriz de coeficientes de las Temperaturas

[C] = Matriz de términos independientes

[D] = Matriz de valores de temperaturas por determinar.

$$[A][T] = [C] \text{ haciendo las correctas operaciones se obtiene: } [T] = [A]^{-1}[C]$$

Se puede simplificar aun más esta operación, ya que al tratarse de una geometría simétrica se puede reducir el número de ecuaciones a la mitad, los nodos internos sobre el eje "x" colindan en dirección del eje "y" con nodos del mismo valor ($n + 1 = n - 1$), por lo que se puede sustituir colocando en el programa que genera la matriz un condicional que limite el número de operaciones al llegar al valor de $x = 0$ (Apéndice 4). Con esto obtenemos una red nodal de 360 nodos, con la misma exactitud que si se utilizan los 720 nodos.

6.2 Modelo para el volumen de control no.2

El planteamiento del modelo para el volumen de control 2, es necesario hacer una relación entre el comportamiento del flujo de calor en el lubricante y entre los cuerpos del cojinete, por lo que se separó en 3 etapas las cuales van una relacionada con otra:

- 1ª. Parte, se considera que la temperatura de la pared del cojinete interna en $r = 0.085$ m, es una temperatura que la podemos conocer si consideramos que la transmisión de calor proveniente de la flecha es a partir de la condición de frontera 5 del volumen 1.

Por lo que se considera que la temperatura inicial $T_{r=0.060}$ y está en función del resultado de la ecuación (4.6). Nuevamente se utilizará el método de diferencias finitas para encontrar la temperatura promedio final en $T_{r=0.085}$ tal como lo muestra la figura 12.

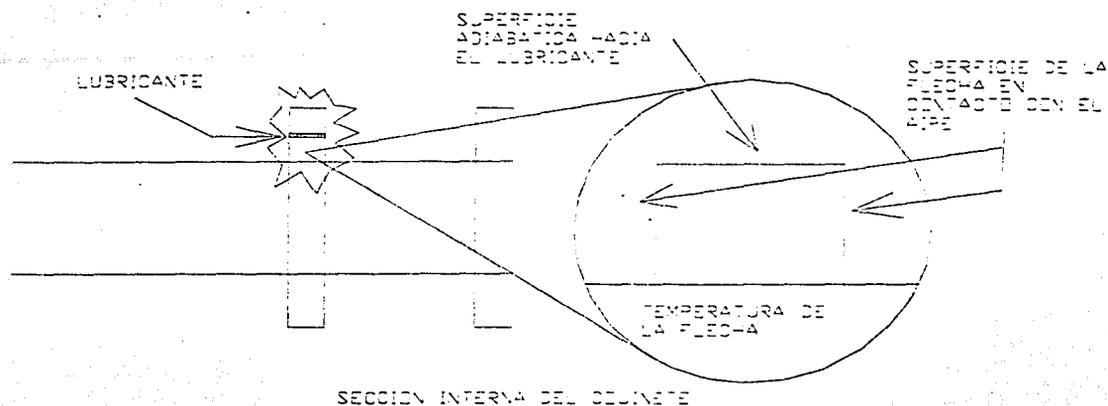


Figura 12. Sección interna del cojinete. En la figura se puede apreciar, la ubicación del análisis del volumen de control 2, así como el cuerpo de l cojinete interno y externo y la posición que guarda el lubricante en dicha sección.

Donde ya se calculó el valor del coeficiente de convección del aire en el capítulo 4.

- 2ª. Parte, esta consiste en modelar el comportamiento del lubricante entre las paredes del cojinete, la cual es una de las pocas situaciones en la que es posible obtener soluciones exactas para las ecuaciones de transferencia por convección ya que se denomina un flujo paralelo. En este caso el movimiento del fluido es sólo en una dirección. Se considera un caso especial de flujo paralelo que incluye una placa estacionaria y una móvil de extensión infinita separada por una sustancia L, con el espacio de en medio lleno con del fluido incompresible. Esta situación se denomina flujo de Couette.

Determinación del perfil de temperaturas en el lubricante, a partir del sistema de coordenadas planteado en la figura 13.

Condiciones:

- Condiciones de estado permanente
- Flujo bidimensional (sin variaciones en z)
- Fluido incompresible con propiedades constantes
- No hay fuerzas de cuerpo
- No hay generación interna de energía

Usando la teoría de transporte de masa y de la ley de la conservación de la masa, se define la ecuación de continuidad de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (6.5)$$

Esta expresión general del requerimiento de conservación de la masa global, debe satisfacer en todo punto en la capa límite de velocidad o hidrodinámica. Además de que se aplica a un fluido de una sola especie.

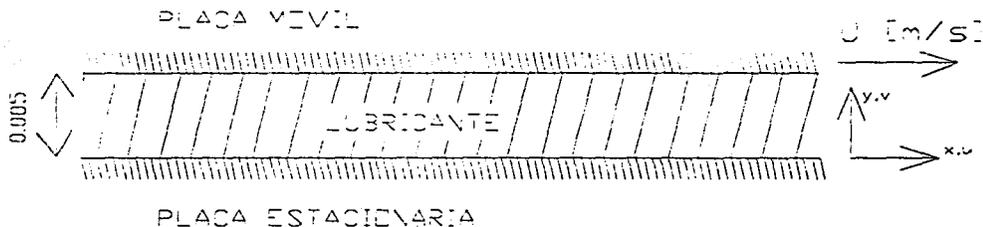


Figura 13. Sección del lubricante. Considere que el eje de estas coordenadas no coincide con el eje de las coordenadas del sistema bidimensional de la flecha.

Para aplicar el requerimiento de conservación de la energía a un volumen de control diferencial en la capa límite tenemos:

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sate} = \frac{dE_{alm}}{dt} \equiv \dot{E}_{alm} \quad (6.6)$$

En particular para condiciones de estado estable bidimensionales con $v = 0$, $(\partial u / \partial x) = 0$ y $\dot{q} = 0$, se sigue que [19]:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (6.7)$$

Sin embargo, como las placas superior e inferior están a temperatura uniforme, el campo de temperaturas también debe estar desarrollado por completo, en cuyo caso $(\partial T / \partial x) = 0$. Para conductividad térmica constante la forma apropiada de la ecuación de energía es, entonces,

$$0 = \left(k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (6.8)$$

Si consideramos que la distribución de velocidades en dicha región se mantiene lineal, la distribución de temperaturas deseada se obtiene resolviendo esta ecuación. Al reacomodar y sustituir para la distribución de velocidades [19]:

$$k \frac{d^2 T}{dy^2} = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^2 = -\mu \left(\frac{U}{L} \right)^2 \quad (6.9)$$

Al integrar dos veces, obtenemos

$$T(y) = -\frac{\mu}{2k} \left(\frac{U}{L} \right)^2 y^2 + C_1 y + C_2 \quad (6.10)$$

Las constantes de integración se obtienen de las condiciones de frontera:

$$T(0) = T_{r=0.085} \quad T(L) = T_{r=0.090}$$

en cuyo caso

$$C_1 = T_{r=0.085} \quad y \quad C_2 = \frac{T_{r=0.090} - T_{r=0.085}}{L} + \frac{\mu U^2}{2kL}$$

y

$$T(y) = T_{r=0.085} \frac{(T_{r=0.090} - T_{r=0.085})y}{L} + \frac{\mu U^2}{2kL} \left[\frac{y}{L} - \left(\frac{y}{L} \right)^2 \right] \quad (6.11) \dots\dots\dots I$$

La posición de la temperatura máxima en el aceite puede derivarse del requerimiento de que:

$$\frac{dT}{dy} = \frac{\mu}{2k} U^2 \left(\frac{1}{L} - \frac{2y}{L^2} \right) + \frac{T_{r=0.090} - T_{r=0.085}}{L} = 0 \quad (6.12)$$

Al resolver para "y" se sigue que

$$y_{\max} = \left[\frac{k}{\mu U^2} (T_{r=0.090} - T_{r=0.085}) + \frac{1}{2} \right] L \quad (6.13)$$

- 3ª. Parte se considera un cilindro coaxial, con las siguientes condiciones:

Un fluido caliente a temperatura T_{aceite} (lubricante), transfiere calor del fluido a la pared del tubo $T_{r=0.100}$ con un coeficiente de transferencia promedio h_{aceite} , la pared de $r = 0.100$ m, transfiere calor hasta la pared ($T_{r=0.140}$ dato conocido), este a su vez se encuentra en contacto con el fluido frío (T_{aire} dato conocido) con un coeficiente de convección h_{aire} .

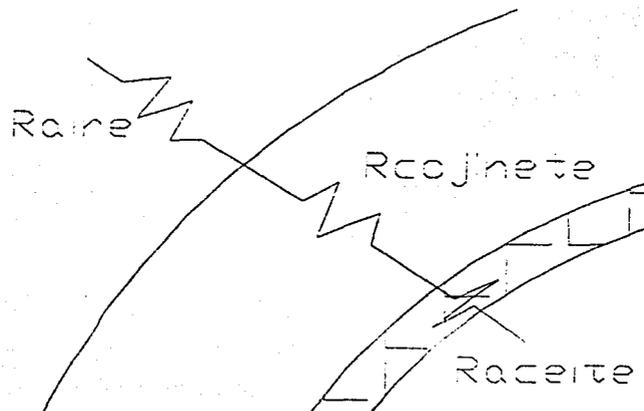


Figura 14. Diagrama de cilindros coaxiales.

La tasa total de transferencia de calor Q desde el fluido caliente hasta el fluido frío en una longitud (H = espesor) esta dado por [2]:

$$Q = \frac{T_{aceite} - T_{r=0.090}}{R_{aceite}} = \frac{T_{r=0.110} - T_{r=0.090}}{R_{cojinete}} = \frac{T_{aire} - T_{r=0.110}}{R_{aire}} \quad (6.14)$$

en donde las resistencias térmicas se definen de acuerdo a la condición de frontera que ocupan:

$$R_{aceite} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.0875 H h_{aceite}}, \text{ se propone una distancia media dentro del lubricante.}$$

$$R_{cojinete} = \frac{1}{2\pi H k_{cojinete}} \ln \frac{r_{0.110}}{r_{0.090}}$$

$$R_{aire} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.110 H h_{aire}} \quad (6.15)$$

Cuando de la ecuación 6.18 se eliminan las temperaturas de las superficies de separación, se obtiene la siguiente expresión de la tasa de flujo total de calor:

$$Q = \frac{T_{aceite} - T_{aire}}{R} \quad (6.16)$$

donde $R = R_{aceite} + R_{cojinete} + R_{aire}$

Sustituyendo las ecuaciones (6.14) y (6.15) en (6.16) se obtiene:

$$T_{aceite} = T_{aire} + \frac{(T_{r=0.090} - T_{r=0.110})R}{R_{cojinete}} \quad (6.17) \dots \dots \dots \text{II}$$

Finalmente el modelo matemático para el volumen de control 2, queda establecido en función de las dos ecuaciones que gobiernan la transferencia de calor en el cojinete. Dichas ecuaciones tienen como variables la T_{aceite} , y la $T_{r=0.090}$.

7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La siguiente tabla explica el procedimiento de operación del problema.

RESULTADOS DEL VOLUMEN DE CONTROL 1, (COJINETE NO.4 Y NO.5)

Concepto	Resultado
Condición de Frontera 1	$T_{s1} = 742K$
Condición de Frontera 2	$Re = 0.074924 \times 10^5$ $Nu = 80.07$ $\bar{h}_r = 54.3 \text{ W/m}^2K$
Condición de Frontera 3	$T_{s3} = 411K$
Condición de Frontera 4	$Re = 0.1179498 \times 10^5$ $Nu = 60.1438$ $\bar{h}_r = 28.818 \text{ W/m}^2K$
Condición de Frontera 5	$q' = 0$

-Flecha-

Las condiciones de frontera demuestran la importancia que tienen con respecto al perfil de temperaturas que se obtuvo de la flecha de la turbina.

El coeficiente de convección del fluido sobre el cuerpo de la flecha A es menor que la cara transversal B; implicando que la transferencia de calor a través del material en dirección contraria al eje x sea menor que en el otro extremo, ya que la temperatura decrece más lentamente en A. Si se continuará sobre la superficie de la flecha en dirección contraria al eje x, las isothermas comienzan a cambiar de forma, ya que buscan el equilibrio térmico con el medio que lo rodea y la curva de la isoterma tiende a la superficie externa, como se puede observar en el perfil de temperaturas. La consideración de que la superficie externa se encuentra en un medio ideal determinado por las consideraciones, es decir en flujo laminar y en todo su perímetro se considere la capa límite totalmente desarrollada, permitió utilizar un coeficiente de convección promedio sobre el cuerpo de la flecha.

El valor del coeficiente de convección, es consecuencia de la naturaleza del fenómeno, por una parte la geometría que presenta la flecha permite el análisis sobre la superficie extendida a lo largo del cilindro y con una velocidad constante determinada.

La región superficial sobre la flecha que se consideró como adiabática, obligó a que dicha región no existiera pérdida de calor, contribuyendo a que el flujo de calor avanzara al interior del material en el lado A, en contrario en el extremo B.

El establecer este primer volumen de control trae consigo varias consideraciones, una de ellas y esencial es considerar al sistema como estado permanente, con ello que las ecuaciones que se emplearon para definir las condiciones de frontera son válidas y pueden interactuar entre ellas.

Otro punto interesante es la determinación del coeficiente de convección tanto del lado A y B, definidos por el estado en el que se encuentra el flujo del aire, es decir en base a los números adimensionales que describen el comportamiento de este último con respecto a la superficie que interactúa. Los parámetros para determinar los números adimensionales están en función de la geometría, velocidad de giro de la flecha y temperatura del aire externo. Sin los números adimensionales, Reynolds y Nusselt no hubiera sido posible determinar el coeficiente de convección y por lo tanto la temperatura de operación del lubricante seguiría siendo una incógnita.

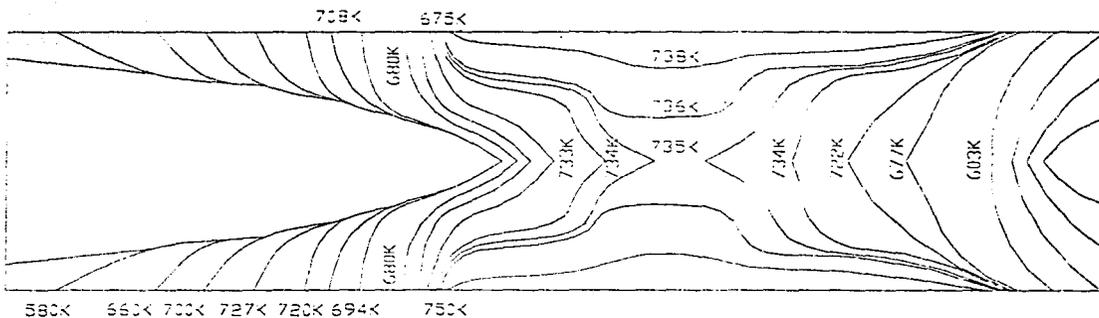


Figura 15 Perfil de temperaturas de la flecha

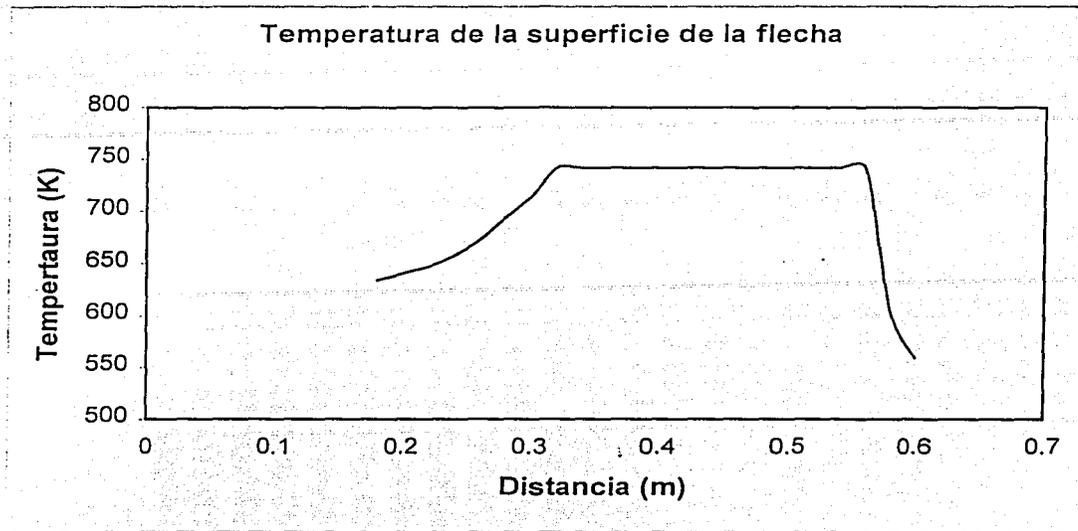


Figura 16 Gráfica de la temperatura superficial de la flecha en función de la distancia (x)

$$T_{\text{superficie}} = f(x).$$

FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA FLECHA

PARA $0 < X < 0.30$ M.

$$T_{\text{superficial}}(x) = 509.47 \times e^{1.119 \times x}$$

Correlación	0.974
Covarianza	0.00268

Temperatura superficial en la flecha para el cojinete No.4

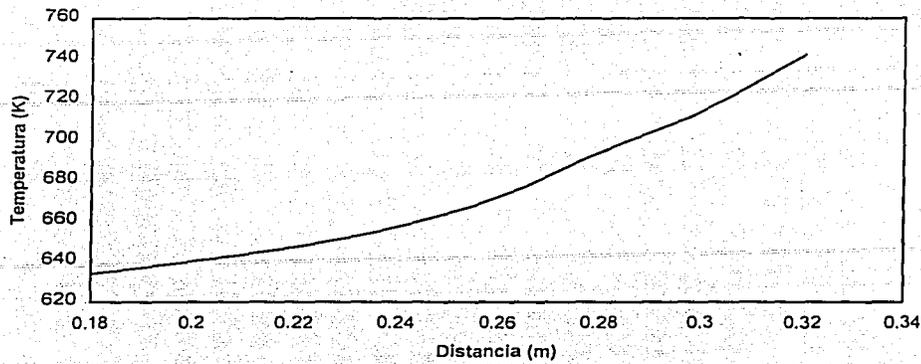


Figura 17 Gráfica de la temperatura superficial de la flecha en la región del cojinete 4.

*FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA FLECHA
PARA $0.55 < X < 0.60$ M.*

$$T_{\text{superficial}}(x) = 66.84x^{-1.115}$$

Correlación	-0.9683
Covarianza	-4.897×10^{-3}

Temperatura superficial de la flecha para el cojinete No.5

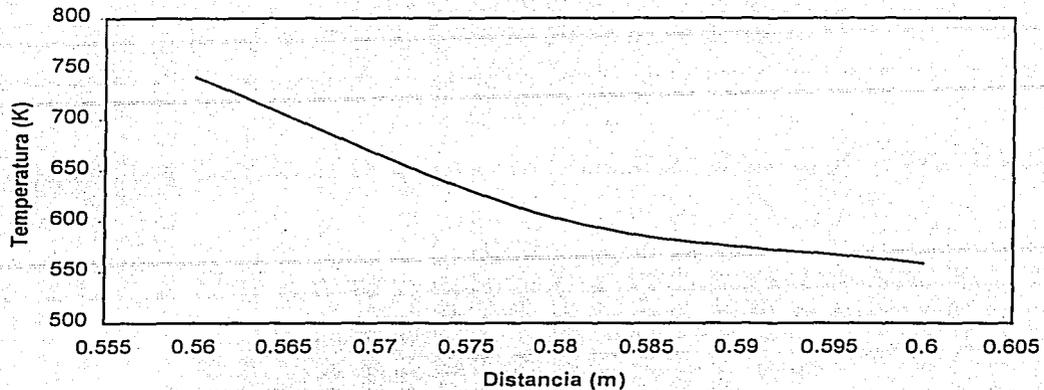


Figura 18 Gráfica de la temperatura superficial de la flecha en la región del cojinete 5.

7.1 Evaluación del modelo en el cojinete no. 4

-Cojinete no. 4-

Retomando el análisis de las isotermas pero ahora en la superficie donde está situado el cojinete no.4. Si analizamos un corte transversal en dicha sección, se observa que la temperatura de mayor valor no se encuentra en el centro de la flecha, si no sobre la superficie, esto es debido al fenómeno de conducción, que relaciona el coeficiente de conductividad (k), ya que esta constante de proporcionalidad entre la diferencia de temperaturas y la distancia que las separa; explica dicho fenómeno, en otras palabras, la distancia más corta que tiene la fuente de energía hacia el cojinete es por la superficie y la distancia que tiene al centro de la flecha en esa sección es mayor, por lo que el flujo de calor avanza sobre la superficie.

Se definió nuevamente un segundo arreglo nodal para el cuerpo interno del cojinete no. 4, el cual no se detalla en este trabajo, por resultar repetitivo, sin embargo el resultado obtenido

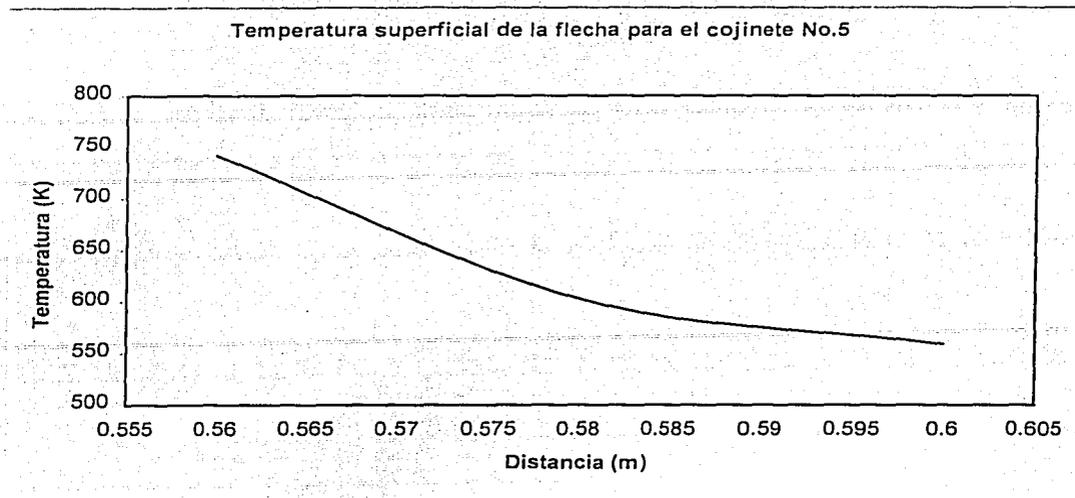


Figura 18 Gráfica de la temperatura superficial de la flecha en la región del cojinete 5.

7.1 Evaluación del modelo en el cojinete no. 4

-Cojinete no. 4-

Retomando el análisis de las isotermas pero ahora en la superficie donde está situado el cojinete no.4. Si analizamos un corte transversal en dicha sección, se observa que la temperatura de mayor valor no se encuentra en el centro de la flecha, si no sobre la superficie, esto es debido al fenómeno de conducción, que relaciona el coeficiente de conductividad (k), ya que esta constante de proporcionalidad entre la diferencia de temperaturas y la distancia que las separa; explica dicho fenómeno, en otras palabras, la distancia más corta que tiene la fuente de energía hacia el cojinete es por la superficie y la distancia que tiene al centro de la flecha en esa sección es mayor, por lo que el flujo de calor avanza sobre la superficie.

Se definió nuevamente un segundo arreglo nodal para el cuerpo interno del cojinete no. 4, el cual no se detalla en este trabajo, por resultar repetitivo, sin embargo el resultado obtenido

es necesario para determinar una de las temperaturas de la superficie que tiene contacto con el lubricante.

El empleo de dos modelos matemáticos que describen la transferencia de calor en dos fenómenos diferentes: flujo paralelo y cilindros coaxiales, como se explicó en el desarrollo de la 2ª y 3ª parte del volumen de control 2 de este trabajo; permitió que se pudiera plantear un modelo que englobara ambas situaciones y se pudiera dar respuesta a nuestra incógnita (temperatura de operación del lubricante). Al aplicar las ecuaciones correspondientes y derivando la ecuación que modela el perfil de temperatura del lubricante, dio como resultado que ha cierta distancia con respecto a la superficie que lo limita. Se encuentra una temperatura mayor que la que existe en las superficies que contienen a éste. Este fenómeno es consecuencia de la velocidad con la que gira la flecha y la relación que guarda la distancia del cojinete con el rodete de la turbina.

El análisis de un flujo paralelo en conjunto con el análisis de cilindros coaxiales, implican dos consideraciones. Primeramente para el análisis de los cilindros coaxiales, se trata de variables en función del radio y por ello necesario determinar los valores de resistividad térmica, así como también las temperaturas promedio del fluido externo (aire) e interno (lubricante). El segundo análisis es el flujo paralelo, el cual es una derivación del estudio de transferencia de calor en placas planas, donde sus variables están en función de una longitud característica, en este caso la distancia que las separa (L). La validez de condicionar un modelo con el otro, se basa en suponer que los radios de los cilindros con respecto al espacio que los separa (donde se encuentra el lubricante) es tan pequeño que puede considerarse que ambas caras de los cilindros se miran de manera plana, es decir la curvatura de las superficies con respecto a la distancia que las separa puede despreciarse. En base a estas suposiciones fue posible determinar la temperatura interna del fluido (lubricante).

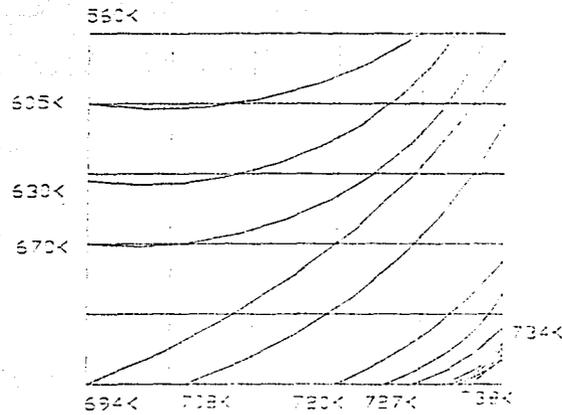


Figura 19 Perfil de temperaturas del cuerpo interno cojinete no.4 (longitudinal)

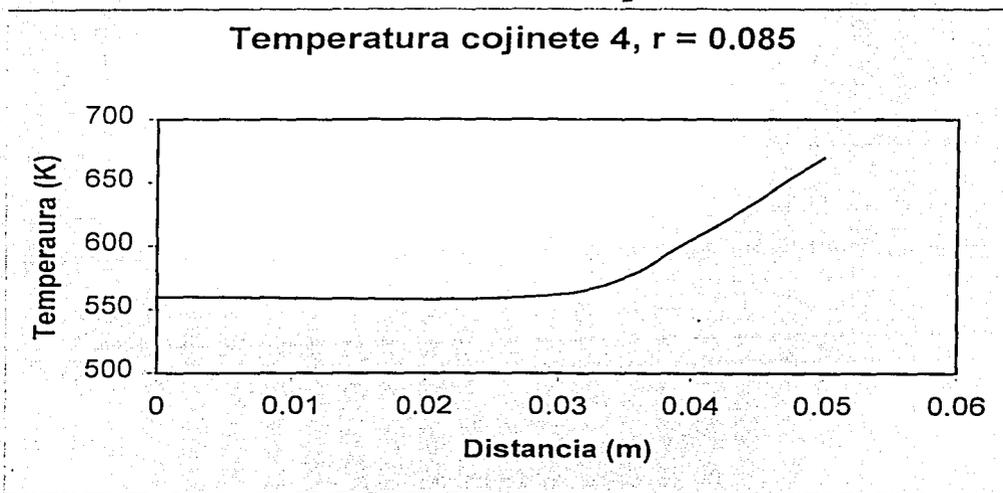


Figura 20 Temperatura en función de la distancia (x) de la superficie de del cuerpo interno cojinete 4, en contacto con el lubricante: para: $0.25 < x < 0.30$, $r = 0.085$ m.

Resultando una temperatura promedio en la superficie del cojinete 4, $r = 0.085$ m es de:

$$T_{r=0.085} = 590 \text{ K}$$

2ª y 3ª Parte

VOLUMEN DE CONTROL 2:

Datos:

Concepto	Resultado
Condición de frontera 1	$T_{r=0.085} = 590 \text{ K}$
Condición de frontera 2	$T_{r=0.11} = 397 \text{ K}$ $\bar{h}_{\text{aire}} = 28.818 \text{ [W/m}^2\text{K]}$
Cilindro coaxial (cuerpo externo del cojinete)	L (ancho del cojinete) = 0.05 m $\bar{h}_{\text{aceite}} = 500 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ $\bar{h}_{\text{aire}} = 28.818 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ $k_{\text{cojinete}} = 21 \text{ [W/mK]}$ $R_1 = 0.0304 \text{ [K/W]}$ $R = 1.0989 \text{ [K/W]}$ $T_{\text{aire}} = 333 \text{ [K]}$ $T_{r=0.110} = 397 \text{ [K]}$ $T_{r=0.090} = ?$ $T_{\text{aceite}} = ?$
Flujo Couette	$U_{r=0.090} = 23.56 \text{ [m/s]}$ $\mu_{\text{aceite}} = \nu_p = 0.799 \text{ [N s/m}^2\text{]}$

$$k_{aceite} = 0.145 \text{ [W/mK]}$$

$$\bar{y} = 0.0025$$

$$T_{r=0.090} = ?$$

$$T_{aceite} = ?$$

Resolviendo el sistema de las ecuaciones (I) y (II) por medio del programa Simulador HP48, haciendo la correcta sustitución de los valores obtenidos del volumen de control 1 y 1ª parte del volumen de control 2 se obtiene:

$$T_{r=0.090} = 407 \text{ K}$$

Es decir la temperatura de la pared interna del cuerpo del cojinete externo.

Utilizando el valor anterior y sustituyendo en la ecuación (6.13) para determinar la posición en el sistema x,y (Parte 2, volumen de control 2) de la temperatura máxima de operación

$$y_{T_{\max}} = 0.0028 \text{ m}$$

Finalmente sustituyendo en la ecuación (6.11) dicha posición, se obtiene la temperatura máxima de operación del lubricante tomando en cuenta la la transferencia de calor de la flecha (condiciones de frontera) y la velocidad de giro de los dos cilindros (cuerpo externo e interno del cojinete).

$$T_{y=0.0028} = 717 \text{ K}$$

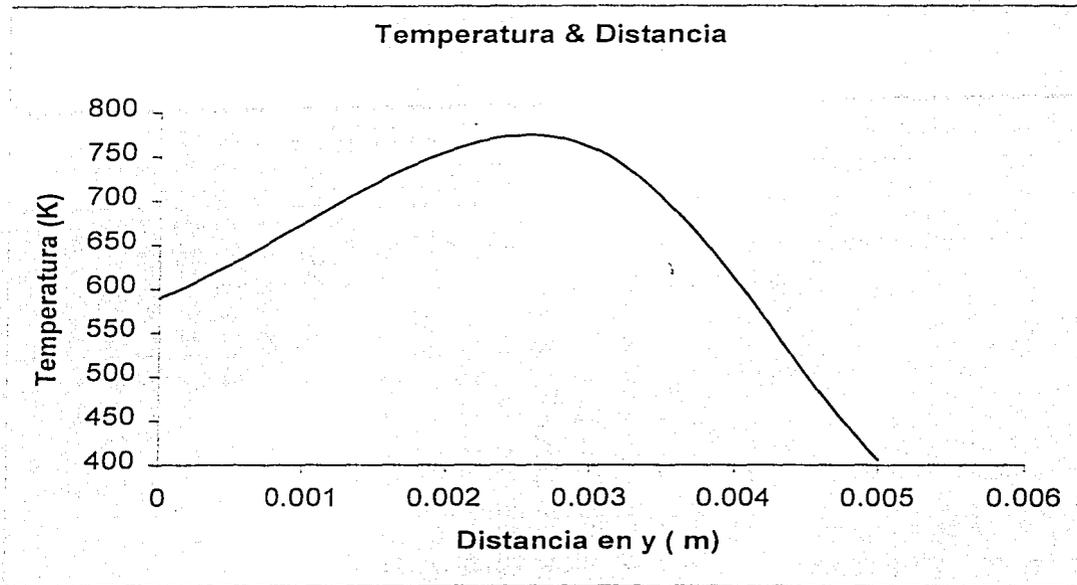


Figura 21 Temperaturas del lubricante en el cojinete no.4 en función de la distancia “y”.

7.2 Evaluación del modelo en el cojinete no. 5

-Cojinete no.5-

La segunda sección de la flecha implica una transferencia de calor por conductividad en una distancia corta a comparación del otro extremo de la flecha, es decir la cara de la flecha expuesta al aire se encuentra muy cercana a la fuente que transfiere calor al sistema, tal como se explico anteriormente. Por ello que las isotermas de dicha sección se comportan de manera

diferente a las del lado contrario, por consecuencia de este fenómeno la tasa de transferencia de calor es mayor que en cualquier otra región de la flecha, como se puede observar en el perfil de temperaturas.

El coeficiente de convección en la sección mencionada es mucho mayor, debido principalmente a dos factores: la temperatura del aire y la velocidad del flujo. La temperatura del aire en esta sección es mayor que la de la superficie del cuerpo ya que se encuentra éste casi en contacto con la salida de los gases de la combustión, lo que influye directamente en las propiedades del aire y a su vez los números adimensionales que definen el estado del fluido en contacto con la superficie son también afectados. Si analizamos el coeficiente de convección resultante con un valor del coeficiente de convección del aire en condiciones estándar entre 5 y 25 $W/m^2 K$, se puede afirmar la importancia que guarda la localización de los cojinetes sobre la flecha.

Analizando de la misma manera el cojinete no. 5, a partir de la obtención del perfil de temperaturas en la sección de la flecha correspondiente, es posible determinar la temperatura de la superficie en contacto con el lubricante. Procediendo de la misma manera que en el caso del cojinete no.4, se determina la temperatura máxima a la que opera el lubricante del cojinete no. 5.

1ª Parte

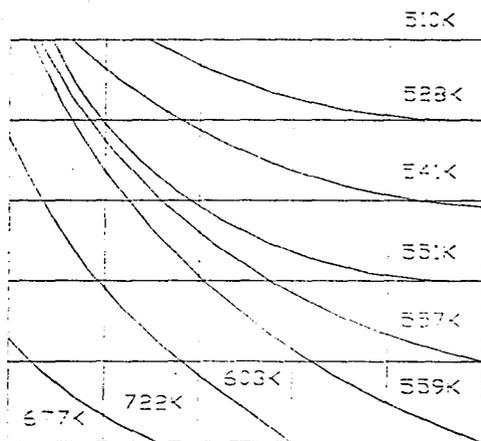


Figura 22 Perfil de temperaturas del cuerpo interno cojinete no.5 (longitudinal)

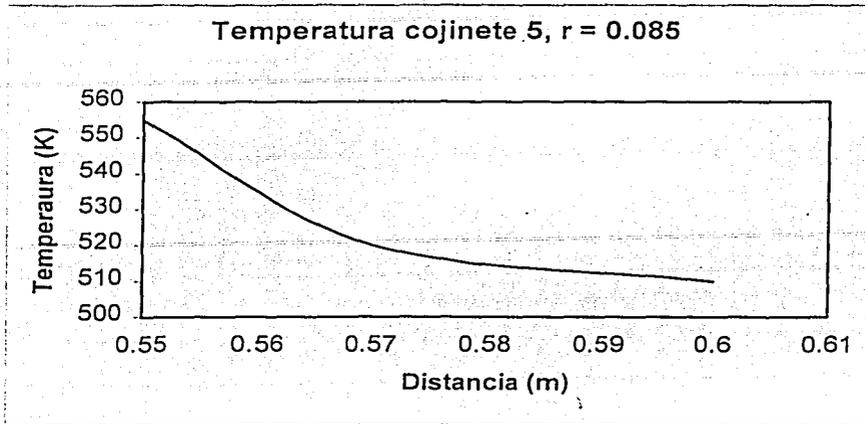


Figura 23 Temperatura en función de la distancia (x) de la superficie de del cuerpo interno cojinete 5, en contacto con el lubricante para: $0.55 < x < 0.60$, $r = 0.085$ m.

Temperatura promedio en la superficie del cojinete 5 con $r = 0.085$ m es de :

$$T_{r=0.085} = 525 \text{ K}$$

2ª y 3ª Parte

VOLUMEN DE CONTROL 2:

Datos:

Concepto	Resultado
Condición de frontera 1	$T_{r=0.085} = 520 \text{ K}$
Condición de frontera 2	$T_{r=0.11} = 507 \text{ K}$ $\bar{h}_{aire} = 54.3 \text{ [W/m}^2\text{K]}$
Cilindro coaxial (cuerpo externo del	L (ancho del cojinete) = 0.05 m

cojinete)	$\bar{h}_{aceite} = 500 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ $\bar{h}_{aire} = 54.3 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ $k_{cojinete} = 21 \text{ [W/mK]}$ $R_1 = 0.0304 \text{ [K/W]}$ $R = 0.634 \text{ [K/W]}$ $T_{aire} = 503 \text{ [K]}$ $T_{r=0.110} = 507 \text{ [K]}$ $T_{r=0.090} = ?$ $T_{aceite} = ?$
Flujo Couette	$U_{r=0.090} = 23.56 \text{ [m/s]}$ $\mu_{aceite} = \nu_p = 0.799 \text{ [N s /m}^2\text{]}$ $k_{aceite} = 0.145 \text{ [W/mK]}$ $\bar{y} = 0.0025$ $T_{r=0.090} = ?$ $T_{aceite} = ?$

Resolviendo el sistema de las ecuaciones (I) y (II) por medio del programa Simulador HP48, haciendo la correcta sustitución de los valores obtenidos del volumen de control 1 y 1ª parte del volumen de control 2 se obtiene:

$$T_{r=0.090} = 526 \text{ K}$$

(temperatura de la pared interna del cuerpo del cojinete externo).

Utilizando el valor anterior y sustituyendo en la ecuación (6.13) para determinar la posición en el sistema x,y (Parte 2, volumen de control 2) de la temperatura máxima de operación se obtiene que:

$$y_{T_{\max}} = 0.0026 \text{ m}$$

Finalmente sustituyendo en la ecuación (6.11) dicha posición, se obtiene la temperatura máxima de operación del lubricante tomando en cuenta la la transferencia de calor de la flecha (condiciones de frontera) y la velocidad de giro de los dos cilindros (cuerpo externo e interno del cojinete).

$$T_{y=0.0023} = 847 \text{ K}$$

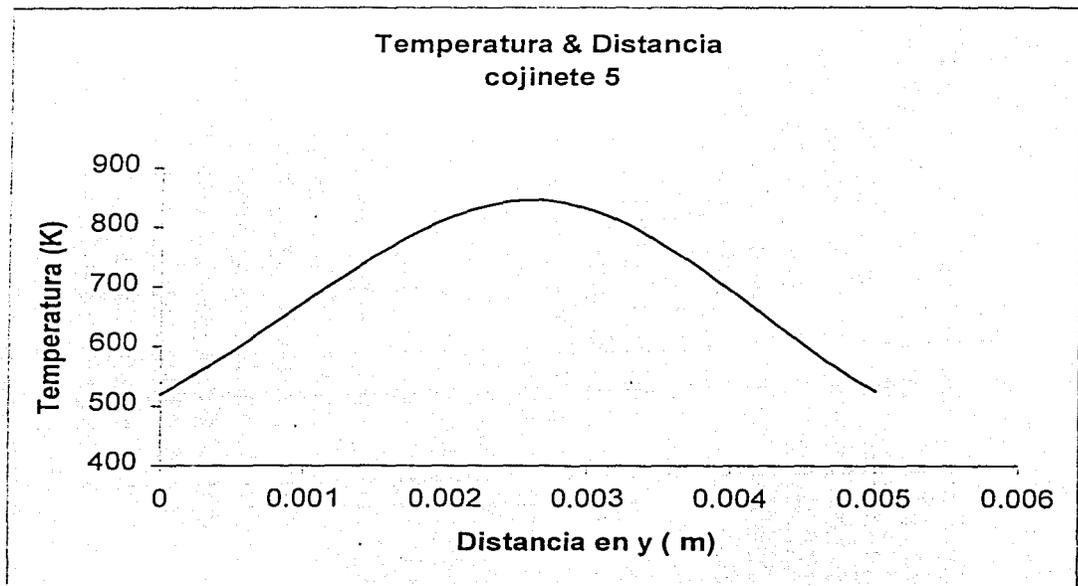


Figura 24 Temperaturas del lubricante en el cojinete no.4 en función de la distancia .

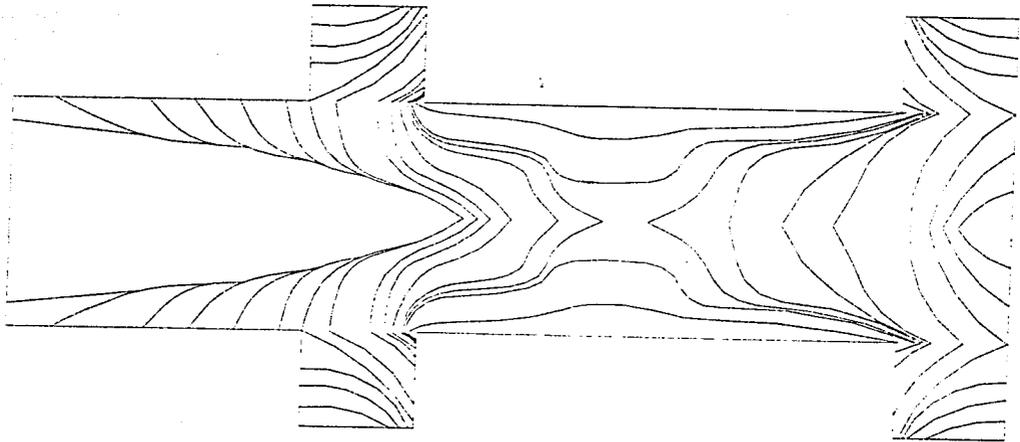
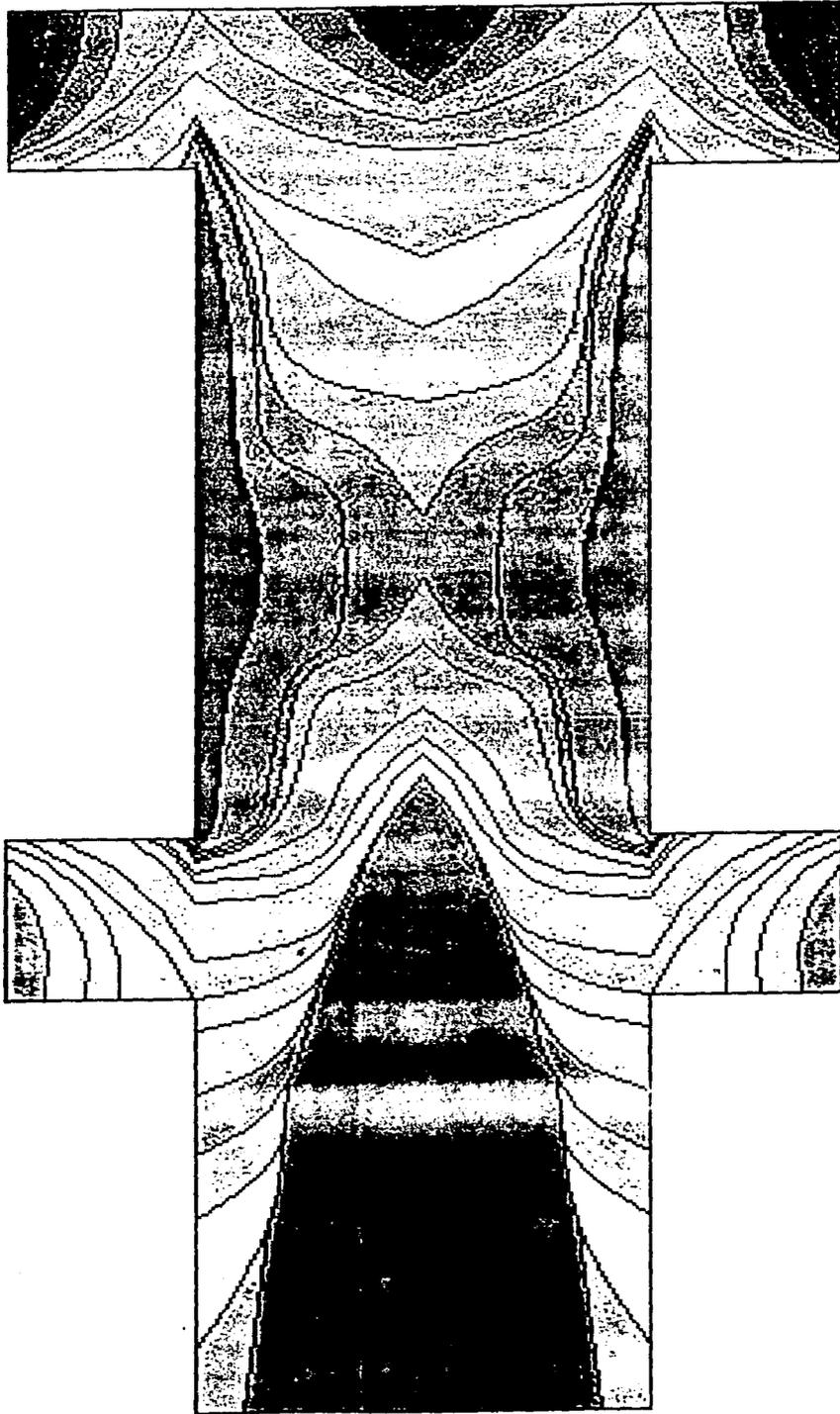


Figura 25 Isotermas debido a la conducción de calor



8. CONCLUSIONES

Este trabajo tuvo como objetivo estudiar la transferencia de calor a través de la flecha de una turbina de gas hasta la pared de contacto entre el cojinete y el lubricante, determinando la dirección del flujo de calor que se puede observar con las temperaturas que presentan los cuerpos. Es por ello que uno de los objetivos particulares de la tesis y base fundamental en el planteamiento de la 2ª y 3ª parte fue determinar el perfil de temperatura de la flecha.

-Comparando características del cojinete no.4 y no.5-

Comparando los resultados entre el cojinete no.4 y no.5, podemos afirmar que el cojinete no.4 presenta una temperatura promedio mayor que la del cojinete no.5 en la condición de la superficie de radio = 0.085 (condición de frontera 1 del volumen de control 2), por razones de la transferencia de calor a través de la flecha.

Podría suponerse que por consecuencia la temperatura del lubricante en el cojinete no.4 fuera mayor que la del cojinete no.5, mas esto no sucede. La razón por la que el lubricante del cojinete no.5 presenta una temperatura mayor que la del cojinete no.4 radica en un punto principal y motivo de este trabajo.

El cojinete no.4 puede transferir calor al medio que lo rodea con una tasa de transferencia mayor, ya que la temperatura del aire es menor que en el lado opuesto, por lo que el flujo de calor avanza a lo largo del cuerpo externo del cojinete a mayor velocidad buscando el equilibrio térmico con el medio. Es decir que el cuerpo externo del cojinete no.4 tiene una pérdida de energía mayor que en el cuerpo externo del cojinete no. 5.

Ahora bien, qué sucede en el cojinete no. 5, el medio que lo rodea no le es muy favorable ya que aunque tenga un coeficiente de convección alto debido al flujo del fluido, la temperatura del aire es mucho mayor que en el cojinete no.4. Por lo que la tasa de transferencia de calor en el cuerpo externo disminuye al acercarse a la temperatura de equilibrio con el medio, resultando así que la temperatura en la superficie de radio 0.090 sea mayor que en el cojinete no.4 y por lo tanto la máxima temperatura de operación en el lubricante del cojinete no. 5 sea mayor que en el cojinete no. 4.

Por lo anterior se concluye que la hipótesis inicial de este trabajo se cumple, ya que la posición y el medio que rodea a los cojinetes va a influir directamente con la temperatura de operación. Tal es el caso que existe una diferencia de temperaturas entre el cojinete no. 4 y no. 5 de 130K.

-Aspecto económico-

El costo del mantenimiento de las turbinas de gas en plantas industriales, es elevado en comparación a otro tipo de mantenimiento preventivo, como puede ser calderas, bombas, líneas de tuberías etc., además de que al realizarse éste se lleva a cabo un "PARO" de producción, como puede ser generación de electricidad, extracción de petróleo, medios de transporte (turbinas de propulsión), etc., produciendo una pérdida económica mayor que la del sólo hecho del costo de mantenimiento por materiales y mano de obra.

Una pieza en mal estado debido a un uso excesivo o falta de mantenimiento, como puede ser el caso del lubricante de los cojinetes (degradación del lubricante), afecta directamente otros componentes entre ellos la flecha, que frecuentemente debido a este problema se presentan los fenómenos de fatiga térmica, rozamiento excesivo, altas temperaturas, corrosión del material, esfuerzos internos etc., y estos a su vez se ven reflejados en las fallas microestructurales. Por lo que se requeriría reemplazar completamente la flecha por una nueva. Es por ello que cuando se realiza el mantenimiento se cambian por seguridad los dos cojinetes, sin embargo puede ser que uno de ellos todavía se encuentre con más de media vida útil.

El costo de los accesorios y piezas de estos materiales podría optimizarse si se calcula el tiempo de vida útil de cada una de las piezas en su estado de operación real, como es el caso de los cojinetes de la flecha de que fue objeto dicha investigación.

APÉNDICES

Apéndice 1. Especificaciones Turbina y propiedades del aire

MODELO	TORQUE kN	ESTADO 1		ESTADO 2		ESTADO 3	
		P1 (kPa)	T1 (K)	P2 (kPa)	T2 (K)	P3 (kPa)	T3 (K)
DART-I	197.065	101.352	288.15	233.042	376.483	2199.427	749.261
DART-II	205.063	101.352	288.15	236.49	378.705	2275.269	757.038
DART-IIB	208.261	101.352	288.15	241.316	380.927	2323.533	762.038
DART-IIC	213.514	101.352	288.15	244.074	382.038	2344.217	763.15

MODELO	TORQUE kN	ESTADO 4		ESTADO 5		ESTADO 6	
		P3 (kPa)	T3 (K)	P4 (kPa)	T4 (K)	P4 (kPa)	T4 (K)
DART-I	197.065	265	325	2089.111	1427.59	992.25	1125
DART-II	205.063	267	330	2164.953	1449.816	997.36	1199
DART-IIB	208.261	267	330	2206.322	1460.927	1005.34	1216
DART-IIC	213.514	267	333	2220.111	1477.594	1025.36	1230.987

MODELO	TORQUE kN	ESTADO 7		ESTADO 8		ESTADO 9	
		P5 (kPa)	T5 (K)	P6 (kPa)	T6 (K)	P6 (kPa)	T6 (K)
DART-I	197.065	525.38	988.705	144.1	742.038	220.369	496
DART-II	205.063	542.617	1005.372	146.858	752.038	235.36	501
DART-IIB	208.261	554.338	1016.483	146.858	753.705	239.325	503
DART-IIC	213.514	562.612	1027.597	148.926	763.705	239.325	503

Propiedades del aire

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg K)	μ 10 ⁷ /Ns/m ²	ν 10 ² (m ² /s)	k 10 ³ (W/mK)	Pr
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	1.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	0.726

Apéndice 2. Propiedades termofísicas del material de la flecha

PROPIEDADES A 300 K

COMPOSICION	PUNTO DE FUSION	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg K)	k 10 ³ (W/mK)
Acero inoxidable AISI 302	1670	8055	480	15.1
Acero inoxidable AISI 316	1670	8238	468	13.4

PROPIEDADES A DIFERENTES TEMPERATURAS

k 10 ³ (W/mK) COMPOSICION	100 K	200 K	400 K	600 K	800 K	1000 K	1200 K	1500 K
Acero inoxidable AISI 302			17.3	20.0	22.8	25.4		
Acero inoxidable AISI 316			15.2	18.3	21.3	24.2		

Apéndice 3. Propiedades de cojinetes y lubricación.

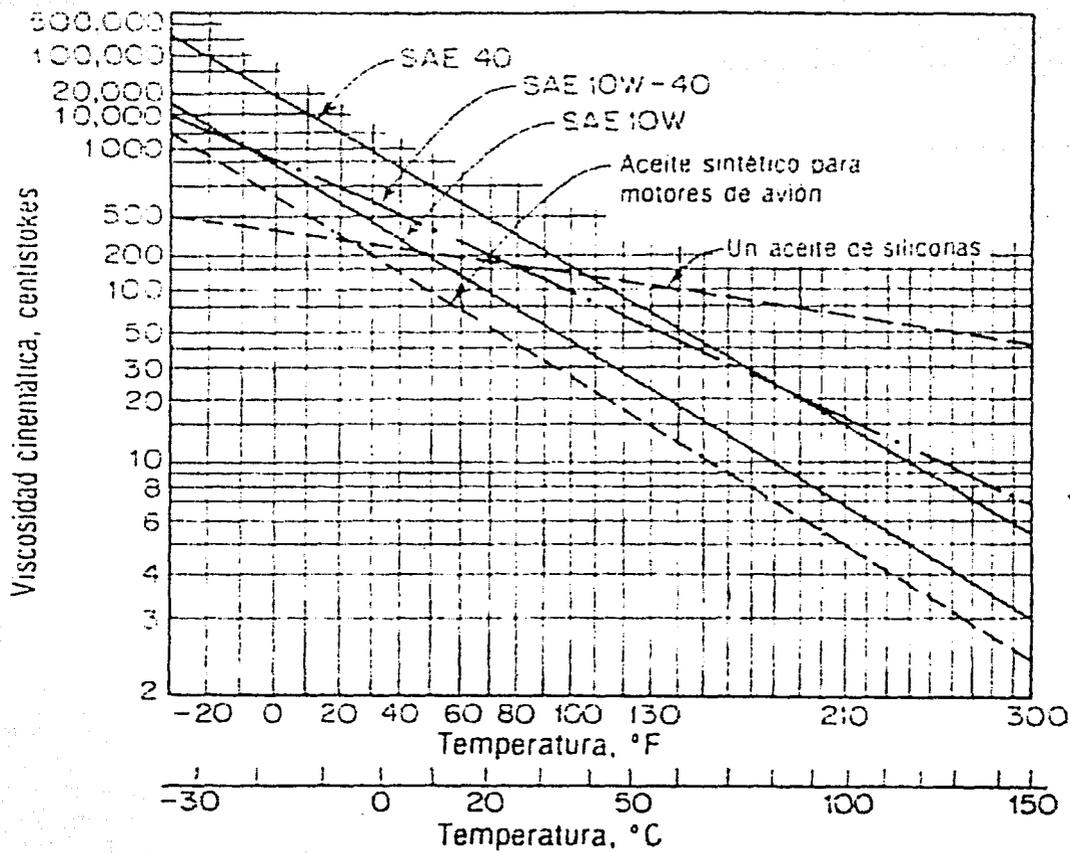


Fig. 1 Relaciones temperatura-viscosidad (gráfica estándar ASTM para temperatura-viscosidad). Las líneas continuas representan grado SAE de aceites para motor; las dos punteadas, fluidos sintéticos).

Apéndice 4. Programa numérico

Comentario de paquetes de cómputo utilizados:

Es importante señalar que los resultados obtenidos se han procesado a través de programas de cómputo, en sus diferentes aplicaciones, los cuales veo conveniente mencionar las aplicaciones que se utilizaron.

En las operaciones que respectan a la conducción de calor en la flecha se utilizaron tres programas que solucionan por métodos numéricos las ecuaciones establecidas.

Programa Matlab versión 6, es la herramienta que se utilizó para generar la matriz de la red nodal, basándonos en la teoría de diferencias finitas se definieron los tipos de nodos que pudieran existir, es decir dependiendo de las condiciones de frontera por lo que se realizó una serie de condicionales. Una vez generada la matriz de nodos, se hizo uso de la librería de álgebra del mismo programa, la cual tiene la gran ventaja de proporcionar un ambiente de trabajo algebraico "Workspace", ahora la gran ventaja de usar este programa es que los subprogramas se ejecutan de manera automática desde el "workspace", los cuales ya están definidos por una serie de operadores de llamada. En este programa en concreto se realizaron los cálculos del volumen de control 1 así como generar la matriz de Temperaturas resultantes del método de diferencias finitas.

Con el programa de elementos finitos Ansys 5.5 se comprobó los resultados obtenidos del Matlab, y en conjunto con el programa de Autocad 2000, permitieron establecer los perfiles de temperatura del interior de la flecha en forma gráfica, permitiendo ver la distribución de temperatura a lo largo de la geometría longitudinal de la flecha y de los cojinetes. Por lo que permitió establecer un criterio congruente de consideraciones con respecto a las propiedades termofísicas del material y del volumen de control 2.

La solución del volumen de control 2, se generó en el programa del Emulador RPL HP48, el cual permite establecer en la librería "solve" las ecuaciones a resolver, y por un método numérico de interacciones, encuentra la primera posible respuesta. Se utilizó la librería "equation predict" y "fit data" en conjunto, para generar los modelos matemáticos de la distribución de la temperatura a lo largo de las superficies en estudio. Cabe mencionar que dicho programa está enfocado para el análisis de datos experimentales, por lo que permite al usuario ingresar los datos

para generar los modelos matemáticos y utilizando la librería de "Plot" permite la graficación de dichos modelos.

El éxito y confiabilidad de los resultados depende principalmente de una teoría correctamente establecida, así como de parámetros y consideraciones bien definidos, ya que sin esto el "Paquete de Cómputo" procesará operaciones con bucles de repetición infinitos o bien arrojará datos totalmente erróneos e incongruentes.

NOMENCLATURA

Nu = Número de Nusselt

Re = Número de Reynolds

Pr = Número de Prandtl

Lc = Longitud característica

D = Diámetro

Kr = Conductividad térmica del fluido

ρ = Densidad (Kg/m^3)

u = Velocidad lineal (m/s)

μ = Viscosidad (kg/m s)

ν = Viscosidad cinemática

D = Diámetro

r = Radio

T = Temperatura

Ts = Temperatura superficial

Tf = Temperatura del fluido

H = Acho del cojinete

L = Distancia entre placas

U = Velocidad lineal

h = Coeficiente de Convección

R = Resistividad térmica total

R1 = Resistividad térmica del cuerpo del cojinete externo

ω = Velocidad angular

K = Kelvines

NOTA: Las unidades que se utilizaron estan basadas en el Sistema Internacional.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cervantes J., Transferencia de Calor, Fondo de Cultura Económica, México 1999.
- [2] Özisik M., Heat Conduction, 2nd Edition Wiley, New York 1993.
- [3] Crane R., Flujo de Fluidos, Mc Graw Hill, New York 1989
- [4] Greene R., Compresores, Mc Graw Hill, New York 1989
- [5] Baumeister T., Marks Manual del Ingeniero Mecánico, Mc Graw Hill Mexico 1997
- [6] Mataix C., Turbomaquinas Térmicas, Madrid 1973
- [7] Dixon S., Mecánica de fluidos y termodinámica de las turbomaquinarias, Madrid 1981
- [8] Severns W., La producción de Energía Mecánica Mediante Vapor de Agua, Aire y Gas, Madrid 1990
- [9] Balance de Energía, Secretaria de energía, México 1998.
- [10] Faires J., Diseño de Maquinarias, Trillas, México, 1999.
- [11] Batlle W. Fundamentals of Gas Turbines, Wiley , New York 1984
- [12] Cohen H., Gas Turbine Theory, Longman Scientific & Technical, New York 1989.
- [13] Holman J., Heat Transfer, Mc Graw Hil, New York 1995
- [14] Bejan A., Heat Transfer, Wiley, New York 1993
- [15] Witiaker S., Fundamental Principles of Heat Transfer, New York 1983
- [16] Karlekar D., Transferencia de calor, Mc Graw Hill, Mexico 1984
- [17] Isachenco V., Transmisión de calor, Barcelona 1973
- [18] Wark K., Termodinamica, Mc Graw Hill, México 1998
- [19] Incropera F., Fundamentos de Transferencia de Calor, Prentice Hall, México 1995

- [20] Apraiz Barreiro J. Tratamientos Térmicos de los aceros. Dossat-Plaza de Santa Ana. Sra. Edición, Madrid, 1974
- [21] Howard E. Boyer and Philip R. Cary, Quenching and control of Distorsion ASM International, 2nd Edition, New York 1998
- [22] Weeks J. Metalurgia Editorial Reverté, Madrid 1980
- [23] Totten G., Bates C. and. Clinton N., Handbook of Quenchants and Quenching Tecnology ASM International, New York 1993.
- [24] Ander G. Voort Atlas of time Temperature Diagrams for Iron and Steels, ASM International, New York 1991
- [25] Krauss G. Steels, Heat Treatment and Processing Principles. ASM International 2nd. Edition New York 1990.
- [26] Gieger G. and Poirer D., Transport Phenomena in Metallurgy. Addison Wesley, Publishing New York 1973
- [27] Liscs B., Svaicang S. Flietin., Workshop Designed System for Quenching Intensity Evaluation and Calculation of Heat Trasnfer Data. Proceedings of the First International Conference on Quenching and Control Distorsion. USA 1992.
- [28] Hernandez B.-Morales, J.K. Brimacombe and E.B. Hawbot. Charectiration of the Boundary Condition in Heat Treatment Operations Using an Inverse Heat Conduction algoritmo. Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, 1995.
- [29] Masse, M. "Continiuum Mechanics for engineers", CRS Press, 1991, New York.
- [30] Ashby, M. "Materials Selection in Mechanical Design" PERGAMON Press, London.

REFERENCIAS DE INFORMACIÓN ELECTRÓNICA

www.se.gob.mx
www.pemex.gob.mx
www.cfe.gob.mx
www.asme.org
www.sae.org
www.unam.mx
www.cranfield.ac.uk/mechanical
www.ox.ac.uk/stjhoncollege-eng
www.mec-ic.ac.uk
www.mit.edu/turbinelaboratory/1058/ed-24