



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D , utilizando como herramienta el computador

Guánchez R. Marcos J.

Naguanagua, Noviembre de 2012



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Tutor académico:
Victor Carrera. *Ing.*

Autor:
Guánchez R. Marcos J.

Naguanagua, Noviembre de 2012



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Guánchez R. Marcos J.

Naguanagua, Noviembre de 2012



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada ***“Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador”***, presentada por el bachiller: **Guánchez R. Marcos J.**, portador de la Cédula de Identidad N°: **14573121**; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Víctor Carrera, *Ing*

Prof. Jorge Romero, *Ing*.

Prof. Fernando Montero, *Ing*

En Naguanagua, Noviembre de 2012

Agradecimientos

Quiero dedicar este trabajo y la carrera universitaria a Dios por darme la fuerza necesaria para seguir luchando frente a las adversidades, a mi esposa e hija por el soporte y el impulso en esta meta profesional, a mi tía, abuela, tío, madre, padre, hermanos, demás familiares y amigos que siempre a mi lado empujaron y forjaron la persona que soy hoy en día, mi más sincero agradecimiento a mi tutor, el profesor Víctor, por sus consejos, guía y sugerencias oportunas durante el desarrollo de este trabajo de investigación, y por último a mi *Agüelo*, gracias donde quiera que estés por haber sido quien fuiste, esto es para ti, te extraño.

Resumen

En este trabajo se presenta una alternativa para el diseño de cojinetes mediante el uso de las gráficas de Raimondi y Boyd, utilizando la computadora como herramienta principal. En el mismo se realiza la programación basándose en la ecuación de interpolación de los autores anteriormente nombrados y empleando los programas comerciales TableCurve 2D 5.0, para la parametrización de las curvas iniciales, y un programa basado en matrices, que además de poseer una gran versatilidad, puede resolver cálculos matemáticos y realizar la visualización de los mismos, y fue usado como base, para la creación de la herramienta computacional, en donde se logra la realización de los gráficos por medio del programa llamado RaiboCharts v1.0, que permite simplificar el trabajo de ingeniería, ofreciendo resultados confiables en un corto periodo de tiempo. Por medio de la comparación con problemas de diseño resueltos en las bibliografías disponibles se validó el programa observándose que el modelo cumple de una manera satisfactoria. Con la construcción de estos diagramas mediante el programa realizado, los usuarios tanto externos a la casa de estudio como los estudiantes de la misma, se verán beneficiados directamente, pues al disminuir el tiempo de uso en los métodos tradicionales podrá dedicar esa ganancia en otros asuntos del proceso de diseño de maquinas.

Introducción

El diseño de cojinetes de deslizamiento suele ser uno de los principales tópicos de interés durante la enseñanza de elementos de máquina en general, el cual es una de las diversas funciones que cumple el Ingeniero Mecánico en su desenvolvimiento profesional y por ello se hace indispensable poseer conocimientos bien fundamentados en cuanto al tema; debido a que para dicho diseño se debe establecer una serie de parámetros iniciales así como el uso de gráficas con una data insuficiente, hace que el proceso se torne tedioso y engorroso, lo puede llevar a realizar cálculos innecesarios y cometer errores, por ello surge la necesidad de crear un programa de computación que sea capaz de realizar los gráficos necesarios en forma optima y en un tiempo reducido. Por ende en este trabajo, se ejecutó el desarrollo de un programa que genere dichas curvas, según los datos suministrados, lo que influenciará en la resolución de problemas de diseño generando a su vez un beneficio académico, pues simplifica el trabajo y permite aprovechar al máximo el tiempo invertido durante la resolución.

El presente trabajo está dividido en cinco capítulos, a continuación se describe brevemente el contenido de los mismos.

En el primer capítulo se realiza el planteamiento del problema, sus causas y su justificación, a partir de lo cual han surgido los objetivos de la presente investigación. Por otra parte, se definen cuáles son los alcances y limitaciones de este trabajo.

El segundo capítulo, lleva a cabo una descripción general de los diferentes regímenes de lubricación, los parámetros de superficie y de película, la viscosidad de los lubricantes, cojinetes y tipos de cojinetes, con el propósito de presentar una serie de conceptos básicos necesarios para el desarrollo del trabajo.

En el siguiente capítulo, el número tres, se presenta la metodología a seguir para el desarrollo de la investigación, especificando cada paso y actividad a ejecutar con la finalidad de mostrar claramente el procedimiento a seguir para realización de la herramienta computacional y la metodología de cálculo que dicho programa realiza.

En la cuarta etapa se hace una breve referencia al lenguaje de programación elegido y se realiza el análisis de los resultados del presente trabajo, mediante la validación de la herramienta computacional desarrollada y llamada RaiboCharts v 1.0, al comparar los resultados obtenidos de problemas desarrollados de manera manual, con las soluciones arrojadas por dicho programa.

En el último Capítulo se presentan las conclusiones obtenidas y las recomendaciones importantes a tener en cuenta para futuras investigaciones sobre el tema tratado en este trabajo de grado.

Referencias

- Black, P. & Adams, E. (1968). Machine Design. *International Student Edition*, 419-458.
- Cavalca, L. K. & Cattaruzzi F. E. (2000) A CAE tool dedicate to the design of hydrodynamic bearings. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Brasil.
- ElMadany, M. M.; Abdelhamid, G., y Abdul, M. A. (2002). “Cad of hydrodynamic Journal bearings” de la Universidad King Saud, de Arabia Saudita.
- Kamenets, A.; Toscano, J., & Bernal, A. (2006). Cálculo automatizado de los cojinetes de deslizamiento. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Las Villas. Cuba.
- Linares O. (2005) Tribología y mantenimiento proactivo, Widman Internacional S.R.L. Bolivia.
- Raimondi, A.A. & Boyd, J.(1958) A solution for the finite Journal bearing and its application to analisis and design III. ASLE, Nueva York.

- Shigley, J. & Mischke, C. (1999 / 2006). Diseño en Ingeniería Mecánica (5ª edición) (8ª edición). McGraw-Hill. Quinta Edición. México.
- Valkonen, A. (2009). Oil film pressure in hydrodynamic journal bearings. Tesis Doctoral. Helsinki University of Technology. Finlandia.

Índice general

Índice general	i	
Índice de figuras	v	
Índice de tablas	viii	
CAPÍTULO 1	El Problema	1
1.1	Planteamiento del problema	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	<i>Objetivo General</i>	3
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3	Alcances	3
1.4	Limitaciones	4
1.5	Justificación	4
CAPÍTULO 2	Marco teórico	5
2.1	Tribología, 5	5
2.2	Lubricación	6
2.2.1	<i>Lubricación hidrodinámica</i>	6
2.2.2	<i>Lubricación elastohidrodinámica</i>	7
2.2.3	<i>Lubricación marginal</i>	8
2.2.3	<i>Lubricación parcial</i>	8
2.3	Lubricantes y propiedades	11
2.4	Ley Petroff	14
2.5	Lubricación de película gruesa	16
2.6	Teoría de la lubricación hidrodinámica	18

2.7 Consideraciones para el diseño de cojinetes	26
2.8 Relaciones entre las variables	27
CAPÍTULO 3 Marco Metodológico	36
3.1 Metodología propuesta	36
3.1.1 Revisar bibliografía reciente sobre las graficas de Raimondi y Boyd	36
3.1.2 Parametrizar las curvas correspondientes a los diversos factores característicos de los cojinetes	37
3.1.3 Diseñar el programa de computación	37
3.1.4 Metodología de cálculo	37
3.1.4.1 Calcular las relaciones que existen entre las variables de diseño de cojinetes	37
3.1.4.2 Generación de diagramas de Raimondi y Boyd	38
3.1.4.3 Validación de los diagramas de Raimondi y Boyd	39
3.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	39
3.3 Técnicas de procesamiento y análisis de datos	40
CAPÍTULO 4 Análisis de los Resultados	41
4.1 Parametrización de las curvas	41
4.2 Desarrollo del programa para la construcción de los diagramas de Raimondi y Boyd para distintas relaciones de l/d	42
4.2.1 Lenguaje de programación	42
4.2.2 Estructura del programa	43
4.2.2.1 Estructura de programación	43
4.3 Resultados	48
4.4 Análisis de resultados	56
CAPÍTULO 5 Conclusiones y Recomendaciones	59
5.1 Conclusiones	59
5.2 Recomendaciones	60
REFERENCIAS	62
ANEXO I	64
APÉNDICE: Manual de usuario.	66

Índice de figuras

2.1 (a) Superficie rodantes concordantes (b) superficies rodantes no concordantes	7
2.2 Caracterización de los tipos de lubricaciones (a) película fluida (b) marginal (c) Parcial	9
2.3 Variación del coeficiente de Fricción con el tipo de lubricación	10
2.4 Variación del desgaste con respecto a la carga.	10
2.5 Modelo geométrico elemental para interpretar la Viscosidad Absoluta.	12
2.6 Comparación de las viscosidades de diversos fluidos	14
2.7 Formación de la película de aceite	17
2.8 Nomenclatura de un cojinete deslizante	18
2.9 Representación esquemática del cojinete parcial empleado por Tower	19
2.10 Gráfica contenida por Tower, de la distribución aproximada de la presión	20
2.11 Muñón girando en sentido del reloj, soportado por una película de lubricante	22
2.12 Velocidad de flujo del lubricante	25
2.13 Diagrama Viscosidad – Temperatura en unidades IPS (Boyd y Raimondi)	29
2.14 Diagrama para lubricantes de grado múltiple de viscosidad. Este diagrama se dedujo a partir de viscosidades conocidas en dos puntos, 100°F y 210°F, y los resultados se cree que son correctos para otras temperaturas	30
2.15 Diagrama de la variable de espesor mínimo de la película y la relación de excentricidad. El límite izquierdo de la zona punteada define la ho óptima para fricción mínima; el límite derecho es la ho	31

óptima para carga máxima. (Raimondi y Boyd)	
2.16 Diagrama para determinar la posición del espesor mínimo de película ho. (Raimondi y Boyd)	31
2.17 Diagrama polar de la distribución de la presión en la película, en el que se indica la notación utilizada. (Raimondi y Boyd)	32
2.18 Diagrama para el valor variable del coeficiente de fricción. (Raimondi y Boyd)	32
2.19 Diagrama para la variable de flujo. (Raimondi y Boyd)	33
2.20 Diagrama para determinar la relación del flujo lateral al flujo total. (Raimondi y Boyd)	34
2.21 Diagrama para determinar la presión máxima en la película de lubricante. (Raimondi y Boyd)	34
2.22 Diagrama para determinar la posición terminal de la película de lubricante y de la presión máxima en ella. (Raimondi y Boyd)	35
4.1 Resultado de la parametrización de la curva de Posición de Presión Máxima Pelicular para un $l/d = 1$, arrojada por el programa TableCurve v5.0	42
4.2 Subrutina: Graficar curvas de Raimondi y Boyd para relaciones de l/d .	47

Índice de tablas

2.1 Unidades de viscosidad	13
4.1 Resultados de un problema de diseño mediante el uso del CAD Design of Journal Bearing.	52
4.2 Resultados de un problema de diseño mediante la asistencia de RaiboCharts.	53
4.3 Resultados de un problema de diseño mediante la asistencia de RaiboCharts.	53
4.4 Resultados de un problema de diseño mediante el apoyo de RaiboCharts.	54
4.6 Resultados de un problema de diseño mediante el programa RaiboCharts.	55
4.7 Resultados de un problema de diseño mediante el programa RaiboCharts.	55
4.8 Resultados de un problema de diseño mediante la herramienta RaiboCharts.	56
4.9 Variación de los resultados al validar el programa.	57

CAPÍTULO 1

El Problema

En este capítulo se describe el problema, sus causas y su justificación, a partir de lo cual han surgido los objetivos de la presente investigación. Por otra parte, se definen cuáles son los alcances y limitaciones de este trabajo.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En los últimos años las empresas se han visto en la necesidad de tornarse cada vez más eficientes y eficaces en sus procesos; para esto la adquisición y el mantenimiento de maquinarias de alta eficiencia se torna un factor de gran importancia, y es en este punto donde el diseño de elementos mecánicos es parte integral del diseño final.

El diseño de elementos mecánicos es la parte fundamental de un sinnúmero de estudios en el campo de la Ingeniería Mecánica; y una de las ramas o vertientes de este, es el diseño de cojinetes de deslizamiento, que a su vez engloba un sinnúmero de parámetros y cálculos que el diseñador debe definir y llevar a cabo.

El campo de aplicación de los cojinetes de deslizamiento es inmenso, y la cantidad de cálculos y asignaciones de valores que debe realizarse al momento de elegir el diseño correcto, es normalmente realizado por un

humano pudiendo esto alterar en gran magnitud dicho diseño, debido a que el calculista o diseñador debe emplear una gran cantidad de tiempo, para ejecutar cálculos, lecturas en tablas y planos, haciendo que el resultado se pueda ver afectado por imprecisiones en cualquiera de los pasos anteriormente mencionados.

A fin de aplicar los conceptos de mejora continua en el campo de la Ingeniería Mecánica, la utilización de herramientas como el computador ha sido imperativa para la disminución de estos errores (humanos), y para esto es que se crean los programas de computación capaces de tomar decisiones, realizar un sinnúmero de iteraciones, cálculos laboriosos y de gran complejidad, todo esto a fin de lograr una búsqueda de valores de diseño, con una mayor rapidez y menor cantidad de errores que si fuesen realizados por el ingeniero o diseñador, dejando para este último una mayor cantidad de tiempo libre para poder efectuar una mejor elección de los elementos mecánicos involucrados, así como para interactuar con el o los programas utilizados, logrando de esta manera una mejor toma de decisiones, evitando al mismo tiempo un sobre dimensionamiento y cálculos tediosos que arrastran errores, por consiguiente, el diseño del instrumento de soporte para el diseño de cojinetes reviste de mucha importancia o exigencia.

Actualmente los programas de computación forman parte prácticamente inherente de los procesos de ingeniería, sobre todo en la fase de diseño y en el análisis ingenieril; todo esto debido a que las teorías, métodos, y formulas aplicables a determinada situación que anteriormente eran casi imposibles realizar debido a cantidades enormes de iteraciones, ahora con la herramienta de la computación, se pueden realizar en solo momentos, dejando que el ingeniero pueda seguir innovando de manera creativa, sin perder tiempo en cálculos repetitivos y con altas probabilidades de ocurrencia de errores.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Objetivo General:

Construir los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Búsqueda de información referente a los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D.
- Parametrizar las curvas correspondientes a las constantes que intervienen en el diseño de cojinetes.
- Diseñar y realizar el programa de computación a ser utilizado como herramienta al proceso de cálculo.
- Validar el programa.
- Diseñar un tutorial para el programa realizado, con ejemplos prácticos del diseño de cojinetes.

1.3 ALCANCES.

- Permitirá obtener los resultados tanto por pantalla como impreso de los diagramas para distintas relaciones de L/D.

1.4 LIMITACIONES.

- El tiempo para el desarrollo del presente trabajo de investigación es de seis (06) meses.
- Solo se utilizarán diagramas para cojinetes de cubrimiento total ($\beta=360^\circ$).

1.5 JUSTIFICACIÓN.

Los cojinetes son elementos de máquinas de uso frecuente, y estos se utilizan en casi todas, para no decir en todas las máquinas donde existen elementos de movimiento rotatorio de un eje, y para el diseño de los mismos se requiere un tiempo considerable, debido a la cantidad de valores que se necesitan obtener de tablas, y gráficos.

Con el desarrollo de la presente investigación, el diseño de cojinetes mediante la utilización de un programa computacional, viene a representar un gran aporte en la búsqueda de soluciones a la problemática planteada, pues, los usuarios podrán estar beneficiados de los diagramas de Raimondi y Boyd y los cálculos que dicha herramienta facilita, minimizando el tiempo de diseño representando una reducción de costos en la ingeniería.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

En este capítulo se lleva a cabo una descripción general de los diferentes regímenes de lubricación, los parámetros de superficie y de película, la viscosidad de los lubricantes, cojinetes y tipos de cojinetes, con el propósito de presentar una serie de conceptos básicos necesarios para el desarrollo del trabajo.

2.1 TRIBOLOGÍA.

A continuación se señalan las afirmaciones de Linares (2005), hasta que se indique lo contrario.

La tribología es la ciencia y tecnología que estudia la lubricación, la fricción y el desgaste de partes móviles. La lubricación, la fricción y el desgaste tienen una función fundamental en la vida de los elementos de máquinas.

El término tribología viene del término griego *tribos*, que significa frotamiento o rozamiento y *logía* que viene a ser ciencia, por tanto la traducción literal será “la ciencia del frotamiento”.

2.2 LUBRICACIÓN.

El objetivo de la lubricación es reducir el rozamiento, el desgaste y el recalentamiento de las superficies de piezas en movimiento que se hallan en contacto directo. La aplicación típica en la ingeniería mecánica es el cojinete constituido por muñón o eje (Figura 2.1.a). Los ejemplos de aplicación típicos son los cojinetes del cigüeñal y bielas en un motor, los cojinetes de las turbinas de centrales termoeléctricas.

Entre los factores de diseño a considerar se hallan discriminados en factores de orden técnico y factores de orden económico como:

- Los valores de las cargas aplicadas y las condiciones de servicio.
- Las condiciones de instalación y el tipo de mantenimiento.
- Las tolerancias de fabricación permitidas, la duración pretendida.
- Los costos de instalación y de mantenimiento.

Se pueden distinguir cuatro tipos de condiciones de lubricación:

- Lubricación Hidrodinámica.
- Lubricación Elastohidrodinámica.
- Lubricación Marginal.
- Lubricación Parcial.

2.2.1. Lubricación hidrodinámica.

La Lubricación Hidrodinámica es la que se puede observar en los cojinetes con superficies concordantes como en la Figura 2.1.a.

Este tipo de lubricación se caracteriza por poseer una película fluida entre superficies concordantes. Se produce una presión de sustentación en el muñón debido a que las superficies convergen y su movimiento relativo y la viscosidad del fluido separan las superficies.

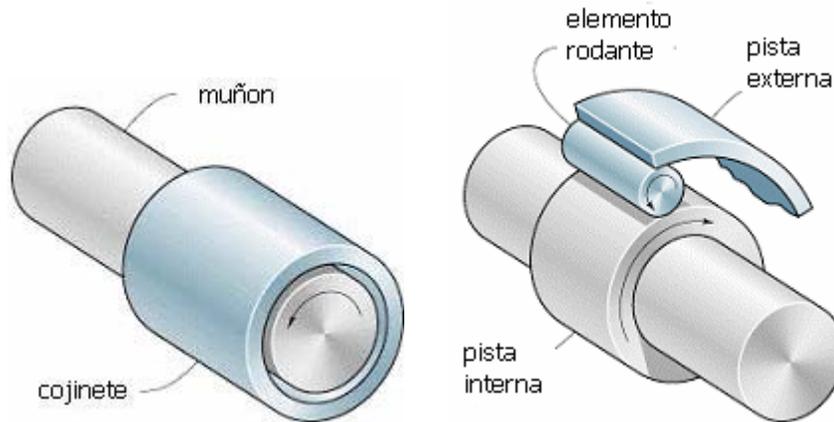


Figura 2.1 (a) Superficie rodantes concordantes (b) superficies rodantes no concordantes. Linares (2005)

Este aspecto se analizará más adelante en detalle. La presencia de tal presión de sustentación permite soportar la carga del eje. La magnitud de la presión no es suficiente como para producir alguna deformación elástica de importancia en la superficie de los componentes.

2.2.2. Lubricación elastohidrodinámica.

La lubricación elastohidrodinámica es más común en superficies rodantes no concordantes como en el caso de los rodamientos, según se ve en la Figura 2.1.b.

Se trata de una forma límite o reducida de la lubricación hidrodinámica, donde la deformación elástica de las superficies en contacto es sustancial. En esta circunstancia la necesidad de lubricación es crucial. Existen dos formas denominadas:

- Lubricación elastohidrodinámica firme (llamada también dura). Sigla LEF.

8 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

- Lubricación elastohidrodinámica suave. Sigla LES.

La primera está relacionada con materiales con módulo de elasticidad alto como en el caso de los metales (aceros, bronce, etc.). En la LEF, la deformación elástica y los efectos de presión y viscosidad son igualmente importantes. El espesor de capa fluida depende de diferentes factores tales como:

- Viscosidad del lubricante.
- Módulos de elasticidad de las partes en contacto.
- Velocidad relativa entre las superficies.
- Carga que se debe soportar.
- Relación geométrica de radios de acuerdo de las superficies en contacto.
- Coeficiente que relaciona la viscosidad del lubricante y la presión que soporta.

La LES está relacionada con superficies en contacto cuyos coeficientes de elasticidad son más bajos como por ejemplo el caucho, la goma, los plásticos, etc. En estos casos las deformaciones son muy grandes incluso con bajos estados de carga. Este tipo de lubricación en particular debe ser considerado en los implantes plásticos para articulaciones del cuerpo humano, como también donde exista contacto entre superficies metálicas y de goma (caucho, plástico, etc.).

2.2.3. Lubricación marginal.

En este caso las superficies de los sólidos no están plenamente separadas por el lubricante y comienza a existir contacto entre las superficies. Aquí es donde comienzan a jugar un papel importante las propiedades moleculares del lubricante para mantener la película fluida y dependiendo de

estas propiedades moleculares el espesor de la película puede tener una variación entre 1 nm y 10 nm.

2.2.4. Lubricación parcial.

Cuando las características de servicio de las superficies en contacto tienen cargas demasiado altas o las velocidades muy bajas, la película de lubricante se pierde y existe un contacto entre las asperezas o rugosidades de las superficies en contacto. El espesor de fluido es menor que $0.01 \mu\text{m}$ a $1 \mu\text{m}$. En la Figura 2.2 se muestran las diferencias entre la lubricación por película fluida, marginal y parcial, respectivamente.

En la Figura 2.3 se muestra el rango de variación de los coeficientes de fricción para las diferentes condiciones de lubricación, mientras que en la Figura 2.4 se muestra la variación del desgaste con el tipo de lubricación y la variación de carga.

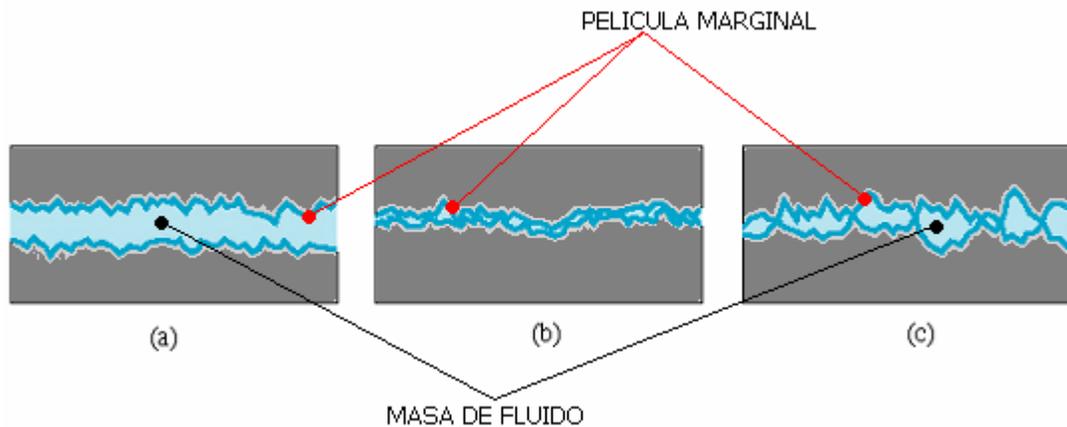


Figura 2.2 Caracterización de los tipos de lubricaciones (a) película fluida (b) marginal (c) Parcial. Linares (2005)

10 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

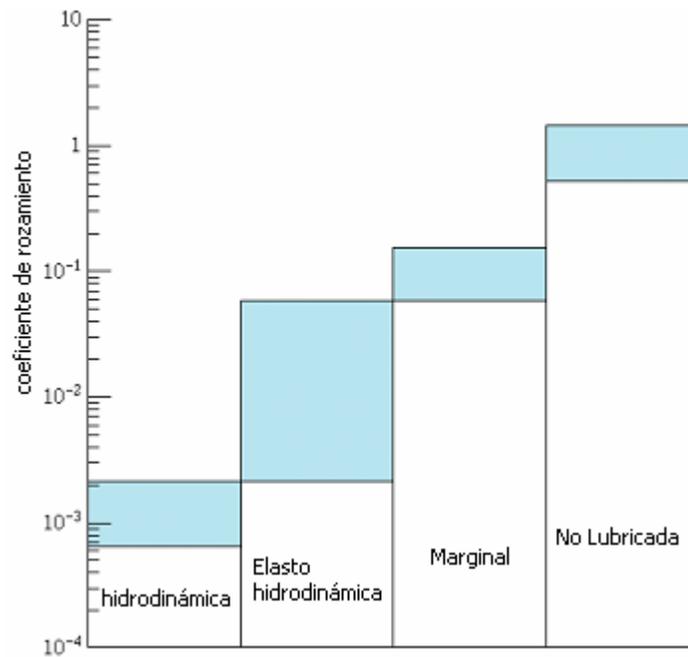


Figura 2.3 Variación del coeficiente de Fricción con el tipo de lubricación Linares (2005)

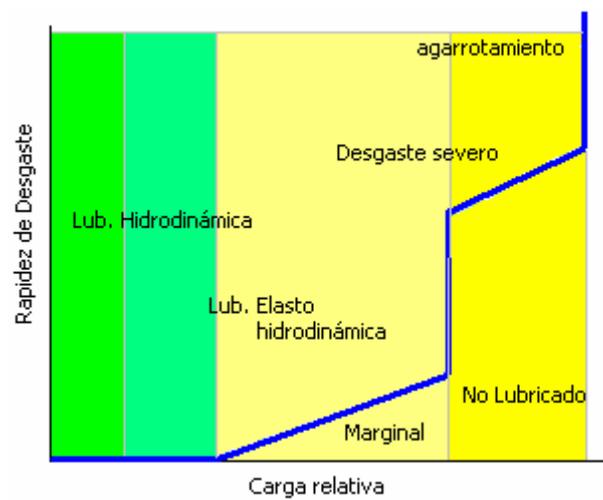


Figura 2.4 Variación del desgaste con respecto a la carga. Linares (2005)

2.3 Lubricantes y propiedades.

Nieto (2007), afirma que un lubricante es una sustancia que tiene por función reducir la fricción y consecuente desgaste entre superficie en deslizamiento relativo. Generalmente los lubricantes son líquidos pero también pueden ser sólidos y gases. A continuación se indican algunos ejemplos:

- Líquidos.

- Aceites minerales
- Esteres líquidos
- Fluidos silicónicos

- Sólidos

Politetrafluoruetileno

- Grasas con aditivos (para los rodamientos)
- Grasas de grafito
- Polvos de molibdeno y grafito (Ejemplo molikote)

- Gases

- Aire (por ejemplo para cojinetes de gas en turbinas)

Los lubricantes líquidos poseen además una serie de propiedades muy deseables que los transforman en los lubricantes por antonomasia. Estas son las siguientes:

- Pueden evolucionar entre las superficies deslizantes conduciendo a una lubricación hidrodinámica.

- Tienen una alta capacidad de disipación térmica del calor generado por el contacto.

- Se pueden mezclar con otros productos químicos (aditivos) para otorgarles mejoras al lubricante, como por ejemplo incrementar la resistencia

a la corrosión de las partes, incrementar la vida útil del lubricante, incrementar la capacidad de carga, etc.

- Se pueden remover las partículas producidas por el desgaste.

Entre las propiedades más representativas de un lubricante se halla la viscosidad. Conceptualmente es la capacidad que tiene un fluido en resistir deformaciones cortantes. La viscosidad absoluta o viscosidad dinámica se define a partir de un modelo geométrico-mecánico elemental como el que se muestra en la Figura 2.5. La viscosidad absoluta, entonces se obtiene con la siguiente relación de esfuerzo tangencial (o cortante):

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

Donde F y A son fuerza de corte y área de la superficie (Figura 2.5), respectivamente y las variables U y h son la velocidad de la superficie superior, y el espesor de película, respectivamente; mientras que μ es una constante de proporcionalidad que se define como viscosidad absoluta; en la Tabla 2.1 se pueden encontrar unidades de viscosidad absoluta.

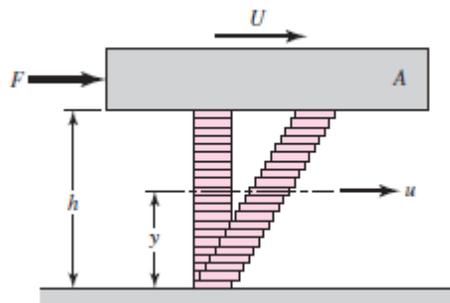


Figura 2.5 Modelo geométrico elemental para interpretar la Viscosidad Absoluta. Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

Tabla 2.1 Unidades de viscosidad. Nieto (2006)

Sistema de Unidades	Viscosidad Absoluta	Viscosidad Cinemática
Internacional	N-s/m ² o Pa-s	m ² /s
CGS	dyn-s/cm ² o centiPoise	cm ² /s o Stoke
Inglés	lbf-s/pul ² o Reyn	pul ² /s

Si se adopta la hipótesis de que la intensidad de esfuerzo deslizante no varía, entonces $du/dy = U/h$, y de la ecuación 2.1,

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h} \quad (2.2)$$

En la figura 2.6 se muestra la viscosidad absoluta en el sistema ips de un cierto número de fluidos que se usan con frecuencia para fines de lubricación, y su variación con la temperatura.

14 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

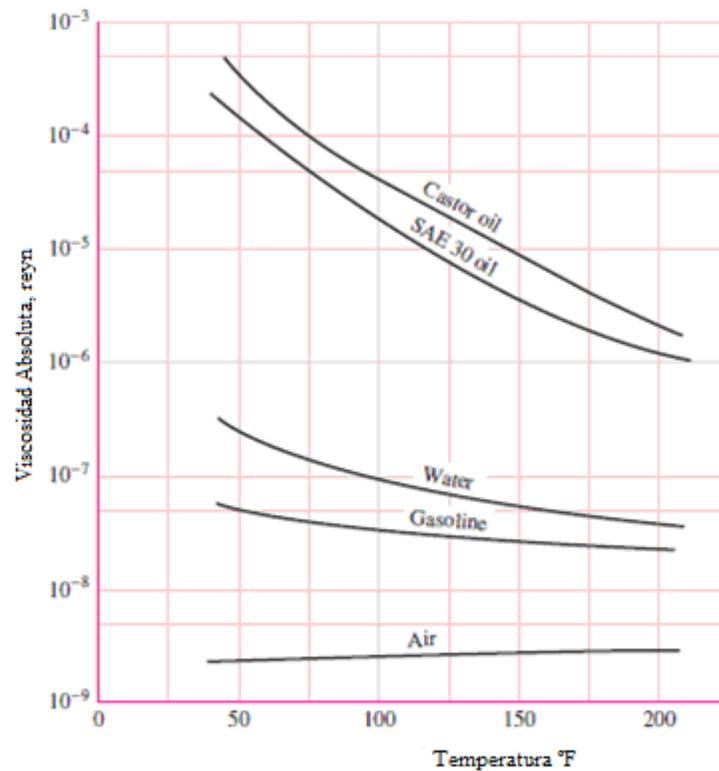


Figura 2.6 Comparación de las viscosidades de diversos fluidos. Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

2.4 Ley Petroff.

A continuación para el resto del capítulo, se encuentran afirmaciones de Shigley & Mischke (1999).

El fenómeno de la fricción en cojinetes fue explicado primero por el investigador Petroff utilizando la hipótesis de que el eje giratorio es concéntrico. Si bien en el presente trabajo no se aplica el método Petroff, es importante pues define grupos de parámetros adimensionales, y porque el coeficiente de fricción pronosticado por esta ley resulta ser muy aceptable, incluso cuando el eje no es concéntrico.

Se considerará ahora un eje vertical rotatorio en una chumacera o cojinete guía. Se supone que este elemento soporta una carga muy pequeña, que el espacio libre entre las piezas está completamente lleno de aceite y que las fugas son despreciables (figura 2.8). Se designa el radio del eje por r , la holgura radial por la c y la longitud del cojinete por l , estado todas las

dimensiones en pulgadas. Si el eje gira a N rev/s, entonces su velocidad periférica es $U = 2\pi rN$ in/s. Puesto que el esfuerzo deslizando o de corte en el lubricante es igual al gradiente de velocidad por la viscosidad, de la ecuación 2.2 se tiene

$$\pi = \mu \frac{U}{h} = \frac{2\pi r \mu N}{c} \quad (2.3)$$

Donde la holgura radial c ha sustituido a la distancia h . La fuerza requerida para deslizar la película es el esfuerzo multiplicado por el área. El momento torsionante es la fuerza multiplicada por el brazo de momento. En consecuencia,

$$T = (\tau A)(r) = \left(\frac{2\pi r \mu N}{c}\right)(2\pi r l)(r) = \frac{4\pi^2 r^3 l \mu N}{c} \quad (2.4)$$

Si ahora se designa una fuerza pequeña que actúa sobre el cojinete por W , en libras-fuerza, entonces la presión P en libras-fuerza por pulgadas de área proyectado es $P = W / 2rl$. El rozamiento es fW , donde f es el coeficiente de fricción, y el momento friccional será

$$T = fWr = (f)(2rlP)(r) = 2r^2 f l P \quad (2.5)$$

Introduciendo el valor del momento torsionante de la ecuación 2.5 en la 2.4 y despejando el coeficiente de fricción, se obtiene

$$f = 2\pi \frac{\mu N}{P} \frac{r}{c} \quad (2.6)$$

16 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

La ecuación 2.6 se llama ley de Petroff y fue publicada por primera vez en 1883. Las dos cantidades $\mu N/P$ y r/c son parámetros muy importantes en la lubricación. La sustitución de dimensiones apropiadas en cada parámetro mostrará que son adimensionales.

El índice (o número característico) de cojinete, o bien número de Sommerfeld, lo define la ecuación

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \frac{\mu N}{P} \quad (2.7)$$

Donde:

S = índice de cojinete

r = radio de muñón, in

c = holgura radial, in

μ = viscosidad absoluta, reyn

N = velocidad significativa, rev/s

P = carga por unidad de área proyectada de cojinete, psi

2.5 Lubricación de película gruesa.

Ahora se examinará como se forma una película de lubricante en un cojinete común o de deslizamiento. La figura 2.7a muestra el muñón de un eje que está a punto de comenzar a girar en el sentido del reloj. En las condiciones iniciales del movimiento, el cojinete estará en seco o por lo menos parcialmente en tal condición, de manera que el muñón rodará o tenderá a subir sobre el lado derecho del cojinete, como se ilustra en la figura 2.7a. En condiciones de sequedad del cojinete tangencial de la carga.

Ahora supóngase que se le introduce un lubricante por la parte superior del cojinete, como se indica en la figura 2.7b. La acción del muñón giratorio es impulsar el lubricante alrededor del cojinete en el sentido del reloj. El

lubricante es empujado a un espacio en forma de cuña y obliga al muñón a desplazarse hacia el otro lado. Se forma así una película de espesor mínimo h_0 , no en el fondo del muñón, sino desplazada en el sentido de rotación a partir de la parte inferior del mismo, como se indica en la figura 2.7b. Esto se explica por el hecho de que, en la mitad convergente de la película, la presión alcanza un máximo en algún punto situado a la izquierda del centro del cojinete.

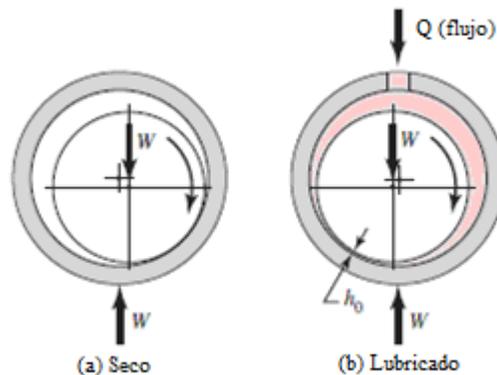


Figura 2.7 Formación de la película de aceite. Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

La figura 2.7 indica como decidir si el muñón con lubricación hidrodinámica está situado excéntricamente hacia el lado derecho o el izquierdo del cojinete. Imagínese que el muñón de eje está comenzando a girar. Determine sobre que lado tiende a rodar. Entonces, si la lubricación es hidrodinámica, ubique mentalmente el muñón en el lado opuesto.

La figura 2.8 contiene la nomenclatura relativa a los cojinetes de deslizamiento. La distancia c es la *holgura radial* y corresponde a la diferencia entre el radio del cojinete y el del muñón. En la figura mencionada el centro del muñón es O , y el centro del cojinete O' . La distancia entre estos puntos es la *excentricidad*, que se designa con e . Al *espesor pelicular mínimo* se le representa por h_0 y ocurre en la línea de centros. Al grosor de la película en cualquier otro punto se le designa con h . También se define una relación de excentricidad ϵ como

18 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D , utilizando como herramienta el computador

$$\epsilon = e/c$$

El cojinete que se ve en la figura se conoce como de cubrimiento parcial. Si el radio de este es igual al del muñón se denomina cojinete de ajuste completo. Si el cojinete cubre todo el muñón, como lo indica las líneas punteadas, recibe el nombre de cojinete de cubrimiento completo. El ángulo β describe la amplitud angular de un cojinete de tipo parcial. Por ejemplo, uno de 120° tendrá un ángulo β igual a 120° .

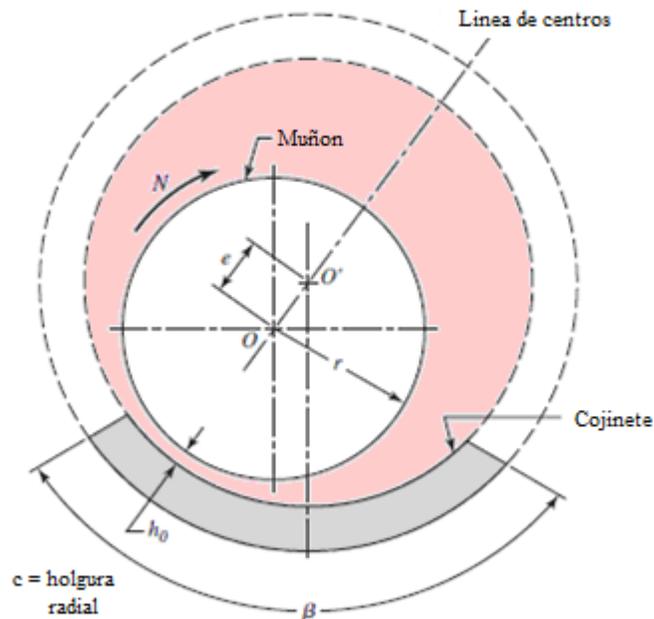


Figura 2.8 Nomenclatura de un cojinete deslizante. Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

2.6 Teoría de la lubricación hidrodinámica.

La teoría actual de la lubricación hidrodinámica tuvo su origen en el laboratorio de Beauchamp Tower, en los primeros años de la década de 1880, en Inglaterra. Este investigador estaba encargado de estudiar la fricción en las chumaceras de los ejes de los vagones o carros de ferrocarril, y de determinar los mejores métodos para lubricarlos. Fue un accidente o un error durante el

curso de esta investigación, lo que llevó a analizar el programa con mayor detalle, y de esto resultó un descubrimiento que finalmente condujo al desarrollo de la teoría.

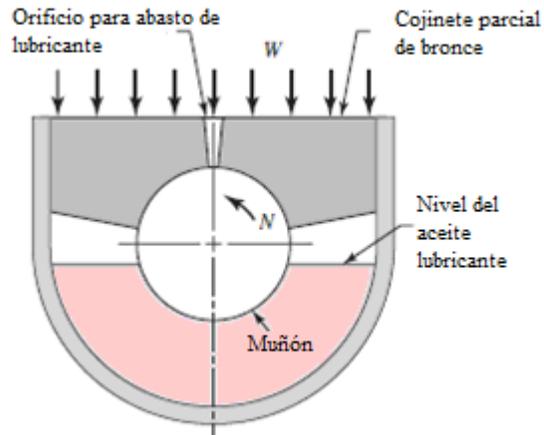


Figura 2.9 Representación esquemática del cojinete parcial empleado por Tower. Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

La figura 2.9 es un esquema del cojinete de muñón que investigó Tower. Es un elemento de tipo parcial que tiene un diámetro de 4in, una longitud de 6in, un arco de cubrimiento de 157° , y lubricación del tipo de baño como se ilustra. Los cojinetes de fricción obtenidos por Tower en su investigación con este cojinete fueron muy bajos, lo que no sorprende ahora. Después de ensayar con dicho elemento, Tower abrió luego un orificio de $\frac{1}{2}$ in de diámetro en la parte superior para introducir el aceite. Pero cuando puso en movimiento el muñón, el aceite brotó por el orificio. En un esfuerzo por impedirlo usó un tapón de corcho, pero este también saltó, y entonces decidió taparlo con un taquete de madera. Cuando también fue expulsado el obturador de madera, Tower se dio cuenta de que, indudablemente, estaba a punto de efectuar un descubrimiento. Después de instalar un manómetro en el agujero de lubricación, el medidor indicó una presión mayor que dos veces la carga unitaria del cojinete. Finalmente, investigó en detalle las presiones de la

20 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D , utilizando como herramienta el computador

película en el cojinete a todo lo ancho y largo, y observó una distribución similar a la de la figura 2.10.

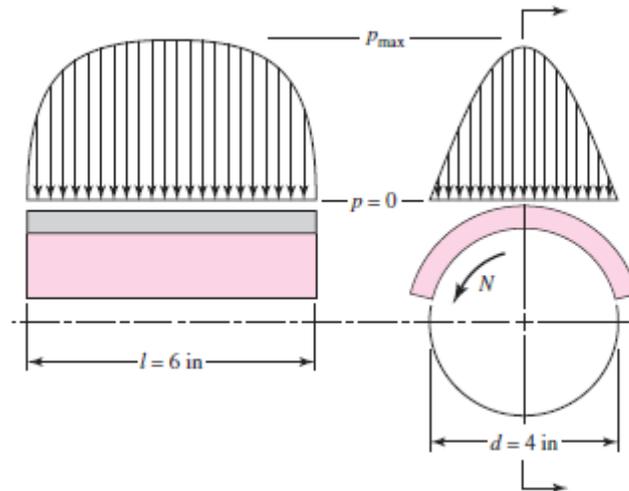


Figura 2.10 Gráfica contenida por Tower, de la distribución aproximada de la presión. Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

Los resultados obtenidos por Tower tenían tal regularidad que Osborne Reynolds llegó a la conclusión de que debía haber una ley definida que relacionara la fricción, la presión y la velocidad. La teoría matemática actual de la lubricación esta basada en el trabajo de Reynolds que siguió a los experimentos efectuados por Tower.

Reynolds imaginó que el lubricante quedaba adherido a ambas superficies, y era impulsado luego por la superficie en movimiento hacia un espacio en forma de cuña con estrechamiento progresivo, lo cual daba origen a un aumento de presión en la película de fluido, de intensidad suficiente para soportar la carga del cojinete. Una de las más importantes hipótesis simplificadoras del problema se originó de la observación de Reynolds de que las películas de fluidos eran tan delgadas, en comparación con el radio del cojinete, que su curvatura podía despreciarse. Esto le permitió sustituir el

cojinete de cubrimiento parcial curvo con uno plano llamado cojinete plano de corredera. Otros supuestos son:

1. El lubricante obedece la ley de Newton del movimiento de una corriente de fluido con viscosidad apreciable.
2. Las fuerzas debidas a la inercia del lubricante son despreciables.
3. Se supone que el lubricante es incompresible.
4. La viscosidad se considera constante en toda la película.
5. La presión no varía en la dirección axial.

La figura 2.11a muestra un muñón que gira en sentido del reloj y está soportado por una película de lubricante de espesor variable h , formada sobre un cojinete parcial fijo. Se especifica que el muñón tiene una velocidad periférica constante U . utilizando la hipótesis de Reynolds de que puede despreciarse la curvatura, en el cojinete inmóvil se establece un sistema de ejes de referencia xyz . Luego, se efectúan las siguientes consideraciones adicionales:

6. El cojinete y el muñón se prolongan o extienden indefinidamente en la dirección z ; esto significa que no puede haber flujo de lubricante en dicha dirección.
7. La presión en la película es constante en la dirección y . en consecuencia, la presión dependerá solo de la coordenada x .
8. La velocidad de una partícula cualquiera del lubricante en la película solo depende de las coordenadas (x, y) .

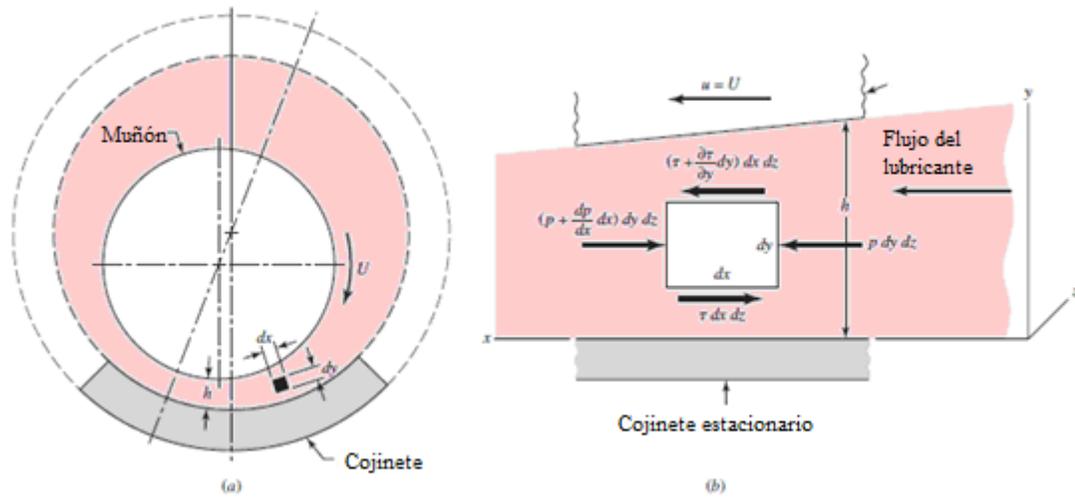


Figura 2.11 Muñón girando en sentido del reloj, soportado por una película de lubricante. Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

A continuación se selecciona un elemento de lubricante en la película (figura 2.11a) de dimensiones dx , dy , dz , y se calculan las fuerzas que actúan en la cara de ese elemento. Como se ilustra en la figura 2.11b, fuerzas presionantes (o normales) debidas a la presión, actúan sobre las caras derecha e izquierda del elemento, fuerzas deslizantes (o cortantes), debidas a la viscosidad y a la velocidad, actúan sobre las caras superior e inferior. La suma de estas fuerzas da

$$\sum F = (p + \frac{dp}{dx} dx) dy dz + \tau dx dz - (\tau + \frac{d\tau}{dy} dy) dx dz - p dy dz = 0 \quad (2.8)$$

Lo anterior se reduce a

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dy} \quad (2.9)$$

De la ecuación 2.1 se tiene

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.10)$$

Donde se emplea la derivada parcial debido a que la velocidad u depende tanto de x como de y , sustituyendo la ecuación (2.10) en la (2.9),

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{d^2u}{dy^2} \quad (2.11)$$

Manteniendo constante x se integrará ahora dos veces esta expresión con respecto a y . Se obtiene así,

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (2.12)$$

Obsérvese que el hecho de mantener a x constante significa que C_1 y C_2 pueden ser funciones de x . se supone ahora que no ocurre deslizamiento alguno entre el lubricante y las superficies confinantes. Ello da dos grupos de condiciones de frontera para evaluar las constantes C_1 y C_2 :

$$\begin{array}{ll} y = 0 & y = h \\ u = 0 & u = -U \end{array} \quad (2.13)$$

Obsérvese, en la segunda condición, que h es función de x . sustituyendo estas condiciones en la ecuación e y despejando las constantes se obtiene

24 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (y^2 - hy) - \frac{U}{h} y \quad (2.14)$$

Esta ecuación de las distribución de la velocidad en la película como función de la coordenada y del gradiente de presión dp/dx . La ecuación indica que la distribución de la velocidad transversalmente a la película (desde $y = 0$ hasta $y = h$) se obtiene superponiendo una distribución parabólica (en primer termino) a una distribución lineal (el segundo). La figura 2.12 indica la superposición de estos dos términos para obtener la velocidad en el caso de valores de x y dp/dx , dependiendo ello del signo del gradiente de presión. Cuando ésta es máxima, $dp/dx = 0$, y la velocidad resulta

$$u = -\frac{U}{h} y \quad (2.15)$$

que es una relación lineal.

En seguida se define Q como el volumen del lubricante que fluye en la dirección x por unidad de tiempo.

Utilizando una anchura igual en la dirección z , el volumen puede obtenerse por la expresión,

$$Q = \int_0^h u dy \quad (2.16)$$

Sustituyendo el valor de u a partir de la ecuación 2.9 e integrando resulta,

$$Q = -\frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{dp}{dx} \quad (2.17)$$

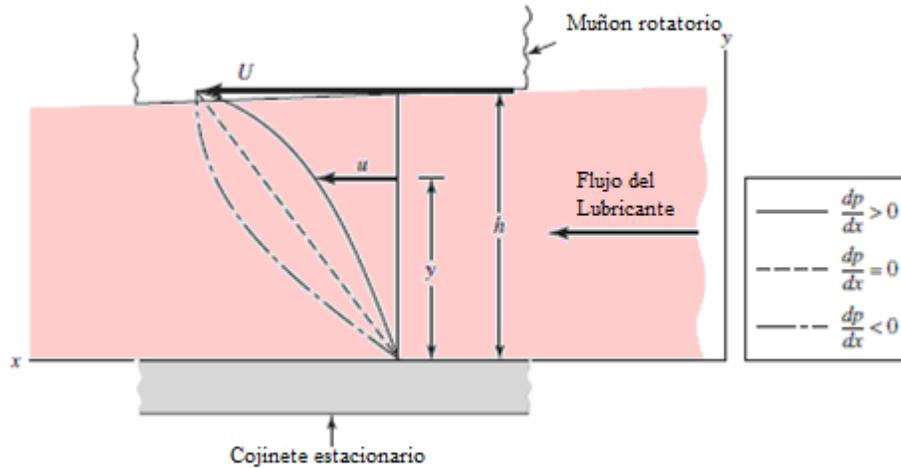


Figura 2.12 Velocidad de flujo del lubricante. Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

En el siguiente paso se utiliza la hipótesis de que el lubricante es incompresible, y se establece que el flujo es igual para cualquier sección transversal. En consecuencia,

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{dp}{dx} \right) = -6U \frac{dh}{dx} \quad (2.18)$$

que es la ecuación clásica de Reynolds para flujo unidimensional. Se desprecian las fugas laterales, es decir, el flujo en la dirección de \$z\$. Un desarrollo similar se usa cuando no se desprecian las fugas. La ecuación resultante es

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{dp}{dx} \right) - \frac{d}{dz} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{dp}{dz} \right) = -6U \frac{dh}{dx} \quad (2.19)$$

No existe solución general para la ecuación (2.19); se han obtenido algunas aproximaciones utilizando analogías eléctricas, sumatorias matemáticas, métodos de relajación y procedimientos numéricos y gráficos.

Una de las soluciones importantes se debe al investigador Sommerfeld y puede expresarse en la forma

$$\frac{r}{c} f = \phi \left[\left(\frac{r}{c} \right)^2 \frac{\mu N}{P} \right] \quad (2.20)$$

Donde indica una relación funcional. Sommerfeld halló las funciones correspondientes a medios cojinetes completos, considerando que no ocurren fugas o escurrimientos laterales.

2.7 Consideraciones para el diseño de cojinetes.

En el diseño de cojinetes de deslizamiento pueden distinguirse dos grupos de variables. En el primer grupo se encuentran aquellas cuyos valores se dan, o están bajo el control del diseñador. Tales son,

1. La viscosidad μ
2. La carga por unidad de área proyectada de cojinete, P
3. La velocidad de rotación N
4. Las dimensiones del cojinete r, c, β , l

Por lo general, de estas cuatro variables el diseñador no tiene control sobre la velocidad, porque la misma depende del diseño global de la máquina. A veces se especifica la viscosidad de antemano, como por ejemplo cuando el aceite se almacena en un depósito y se emplea para lubricar y enfriar diversos cojinetes. Las variables restantes, y a veces la viscosidad, puede controlarlas el diseñador y, por consiguiente, son decisiones personales. En otras palabras, cuando se definen estas cuatro variables, el diseño es completo.

En el segundo grupo están las variables dependientes. El diseñador no puede controlarlas excepto en forma indirecta, cambiando una o mas del primer grupo. Tales son:

1. El coeficiente de fricción f
2. La elevación de temperatura ΔT
3. El flujo de lubricante Q
4. El espesor mínimo de la película de lubricante h_0

Este grupo de variables expresa cuan bien funciona el cojinete y, por tanto, pueden considerarse como factores de funcionamiento. Ciertas limitaciones en sus valores deben ser impuestas por el diseñador para asegurar un funcionamiento satisfactorio. Dichas limitaciones son determinadas por las características de los materiales de cojinetes y del lubricante.

2.8 Relaciones entre las variables.

Es necesario establecer las relaciones que existen entre las variables. Albert A. Raimondi y John Boyd, de Westinghouse Research Laboratories, emplearon una técnica de iteración para resolver la ecuación de Reynolds en computadora digital.

El trabajo de Raimondi y Boyd fue publicado en tres partes, y contiene 45 diagramas detallados y 6 tablas de información numérica. En las tres se emplean diagramas para definir las variables para relaciones de longitud a diámetro (l/d) de 1:4, 1:2, 1:1 y para ángulos beta de 60° a 360° . En ciertas condiciones la solución a la ecuación de Reynolds da presiones negativas en la porción divergente de la película. Puesto que un lubricante no puede soportar un esfuerzo de tensión, la parte III del trabajo de Raimondi y Boyd supone que la película de lubricante se rompe cuando la presión en la misma se vuelve cero. La parte III también contiene datos para el cojinete de longitud infinita; como no tiene extremos, ello significa que no existen fugas. Los diagramas a utilizar en el presente trabajo de grado son para cojinetes de cubrimiento total ($\beta=360^\circ$) solamente.

Diagramas de viscosidad.

Una de las más importantes hipótesis propuestas en el análisis Raimondi - Boyd es que la viscosidad del lubricante no varía a medida que pasa por el cojinete. Pero puesto que se realiza trabajo sobre el lubricante durante este flujo, la temperatura del mismo es mayor cuando sale de la zona de carga que la que tenía a la entrada. Y los diagramas de viscosidad indican claramente que ésta desciende significativamente al elevarse la temperatura (Figuras 2.13 y 2.14).

Algo del lubricante que entra al cojinete emerge como un flujo lateral, que retira algo de calor. El resto del lubricante fluye a través de la zona de carga del cojinete y retira el resto del calor generado. Al determinar la viscosidad por utilizar se empleará una temperatura que sea la media de las temperaturas de entrada y salida:

$$T_{med} = T_1 + \frac{\Delta T}{2} \quad (2.21)$$

Donde T_1 es la temperatura de entrada y ΔT es la elevación de temperatura del lubricante desde la entrada hasta la salida. Desde luego, la viscosidad empleada en el análisis debe corresponder a T_{med} .

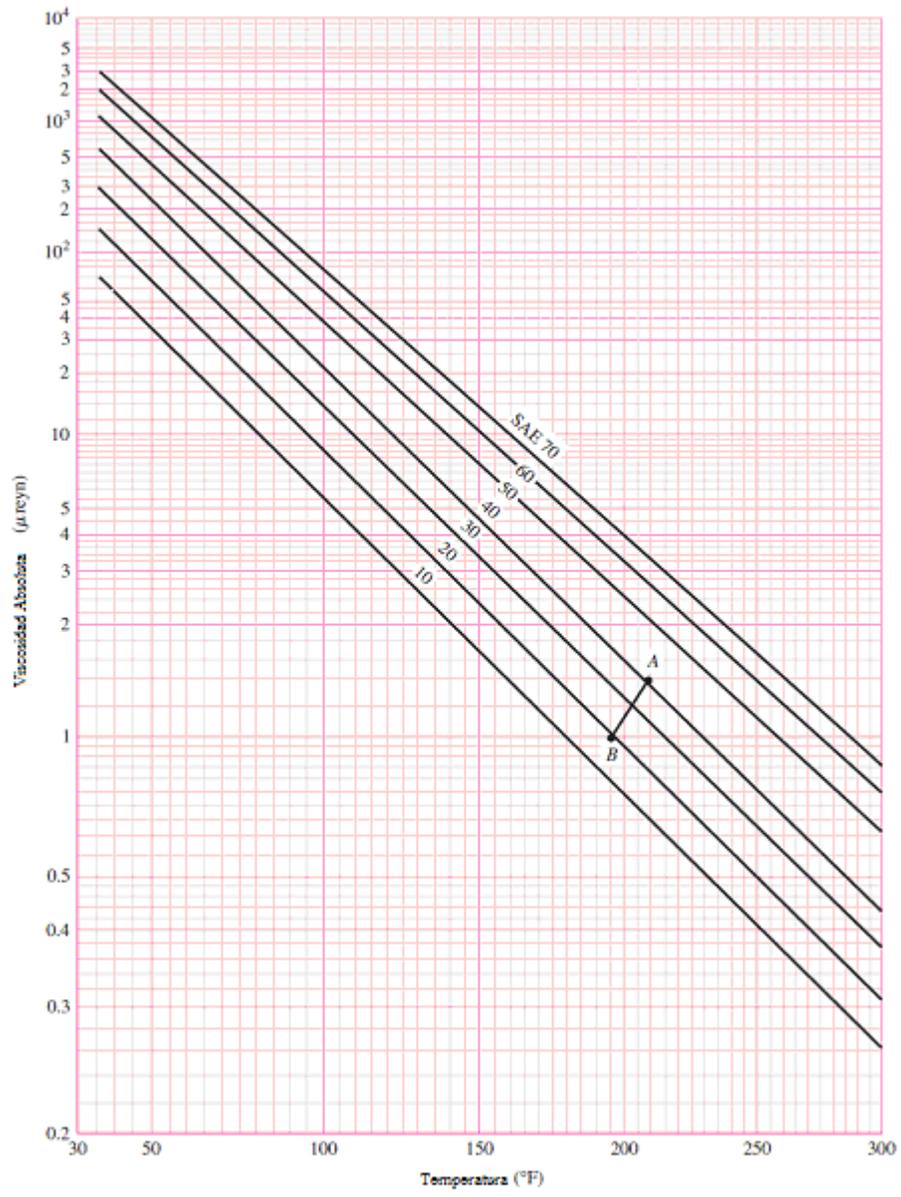


Figura 2.13 Diagrama Viscosidad – Temperatura en unidades IPS (Boyd y Raimondi). Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

30 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

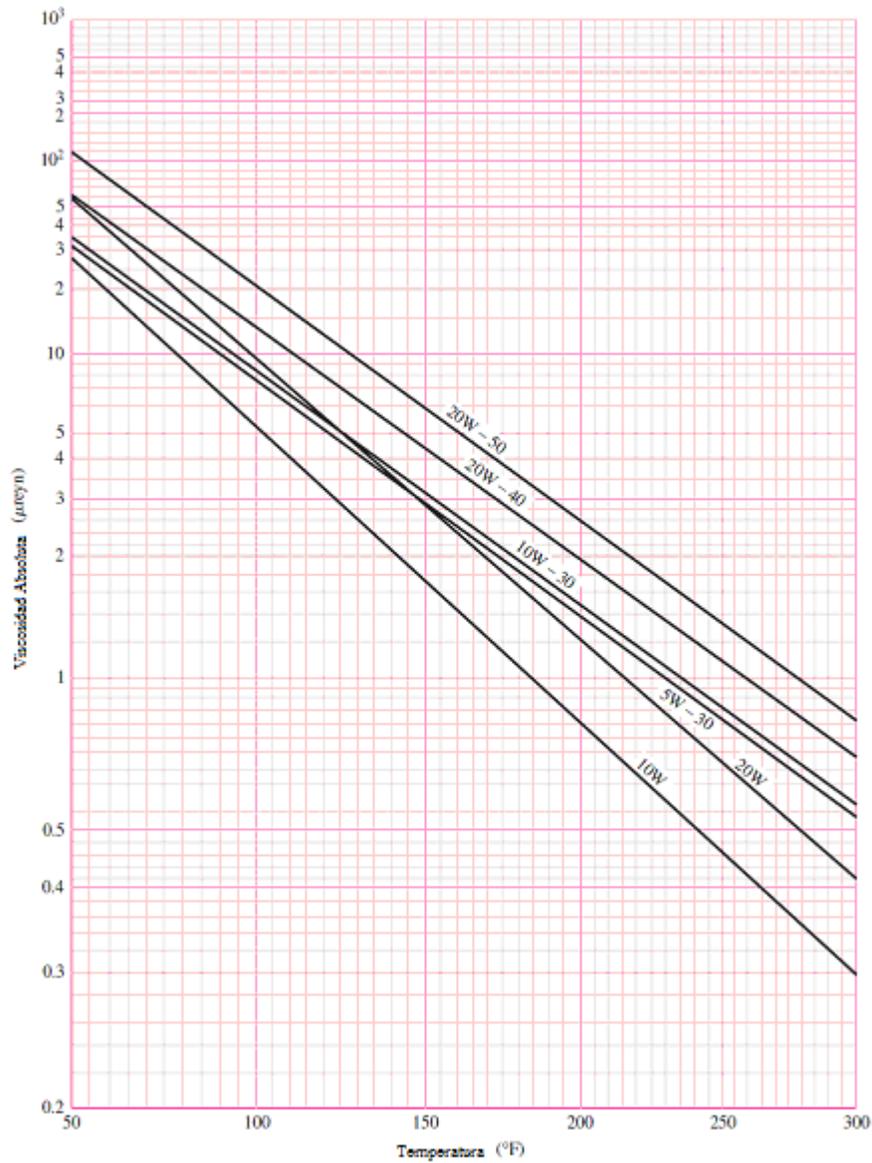


Figura 2.14 Diagrama para lubricantes de grado múltiple de viscosidad. Este diagrama se dedujo a partir de viscosidades conocidas en dos puntos, 100 $^{\circ}\text{F}$ y 210 $^{\circ}\text{F}$, y los resultados se cree que son correctos para otras temperaturas. Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

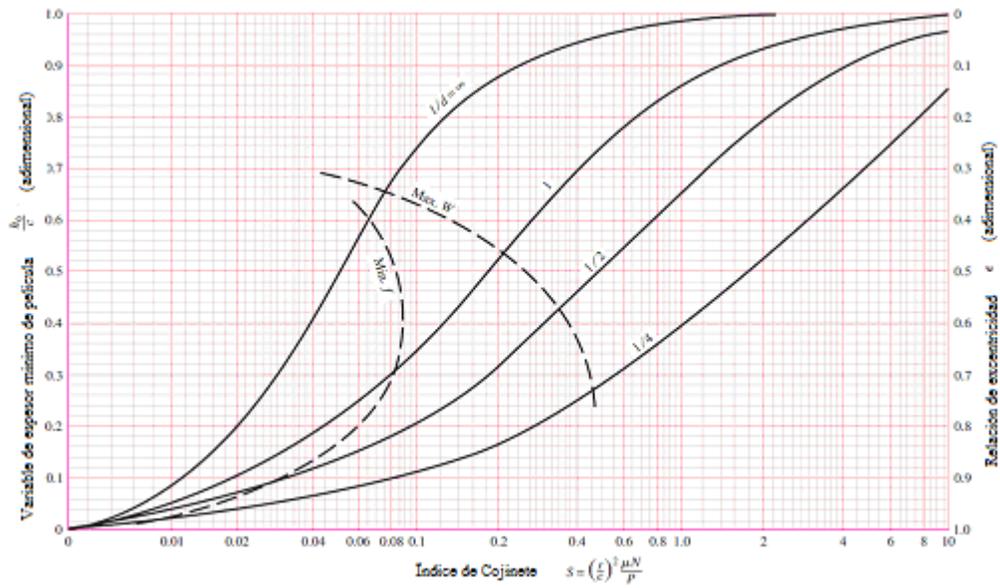


Figura 2.15 Diagrama de la variable de espesor mínimo de la película y la relación de excentricidad. El límite izquierdo de la zona punteada define la h_0 óptima para fricción mínima; el límite derecho es la h_0 óptima para carga máxima. (Raimondi y Boyd). Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

La cantidad h_0 / c se llama variable de espesor mínimo de película.

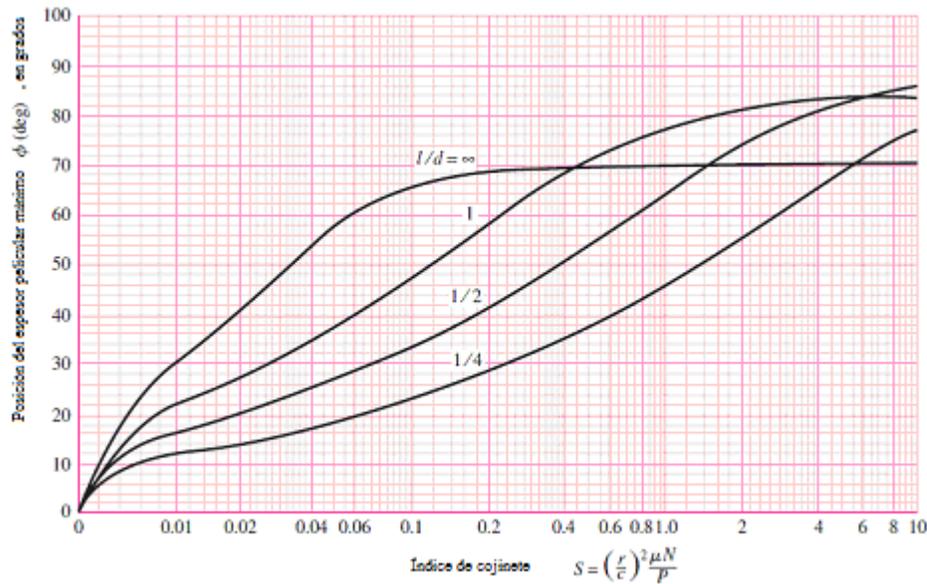


Figura 2.16 Diagrama para determinar la posición del espesor mínimo de película h_0 . (Raimondi y Boyd). Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

32 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

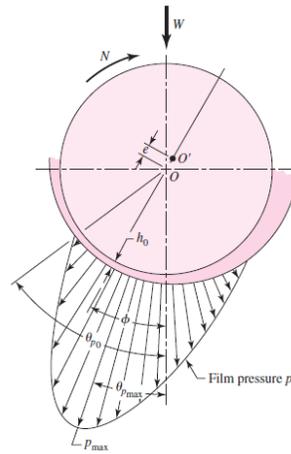


Figura 2.17 Diagrama polar de la distribución de la presión en la película, en el que se indica la notación utilizada. (Raimondi y Boyd). Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

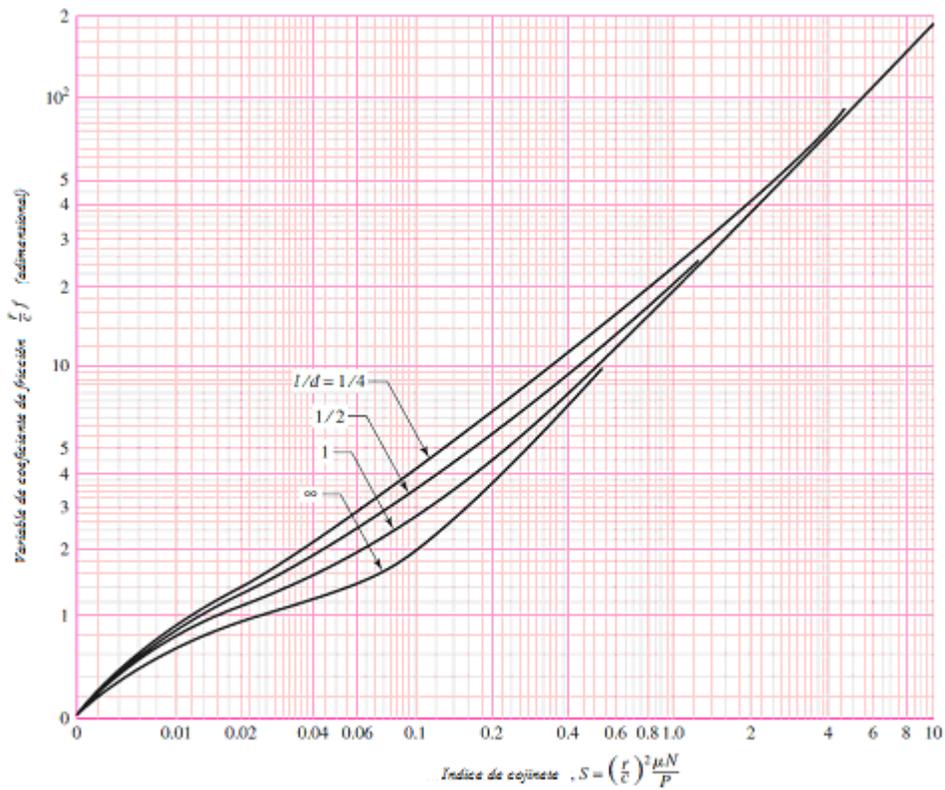


Figura 2.18 Diagrama para el valor variable del coeficiente de fricción. (Raimondi y Boyd). Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

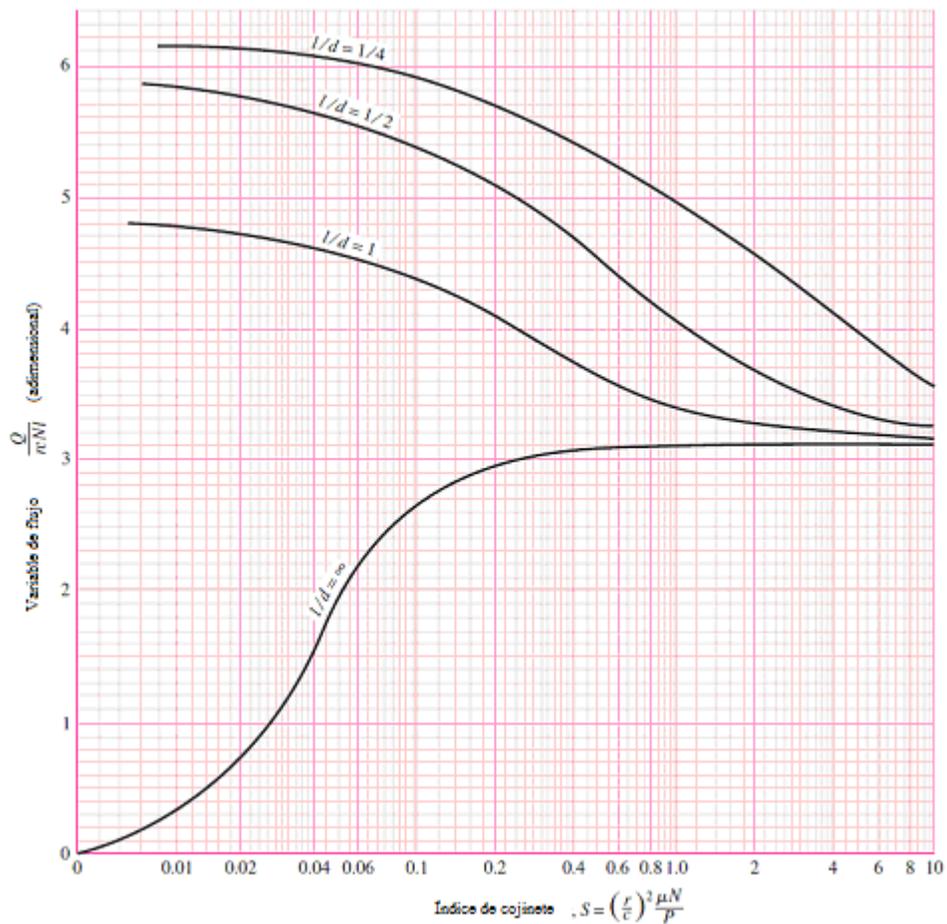


Figura 2.19 Diagrama para la variable de flujo. (Raimondi y Boyd). Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

La Variable de flujo $Q/rcNI$, determinada con el diagrama de la figura 2.19, se utiliza para evaluar el volumen de lubricante, Q que se impulsa al espacio convergente por efecto del muñón e rotación. Este diagrama se basa en la hipótesis de trabajo a la presión atmosférica y la ausencia de las ranuras o agujeros en el cojinete. La cantidad de aceite suministrada al cojinete debe, por lo menos, ser igual a Q si este ha de funcionar de acuerdo con los diagramas.

34 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

De la cantidad de aceite lubricante Q impulsada por el muñón rotatorio una porción Q_s, fluye hacia los extremos y, por lo tanto, se denomina fuga lateral. Esta puede calcularse a partir de la relación de flujo Q_s/Q de la figura 2.20.

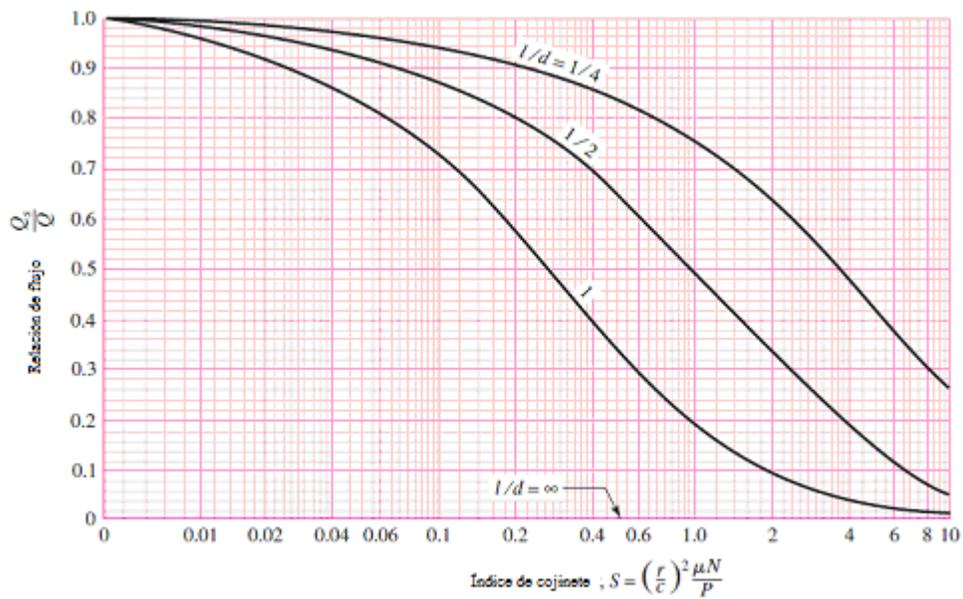


Figura 2.20 Diagrama para determinar la relación del flujo lateral al flujo total. (Raimondi y Boyd). Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

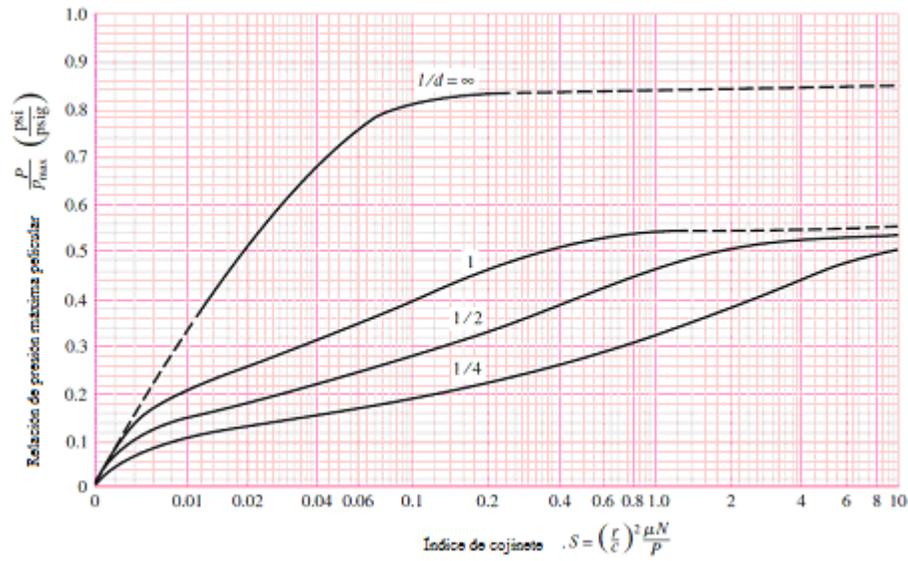


Figura 2.21 Diagrama para determinar la presión máxima en la película de lubricante. (Raimondi y Boyd). Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

La presión máxima desarrollada en la capa de lubricante se puede obtener determinando la relación de presión P/P_{max} con el diagrama de la figura 2.21.

36 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

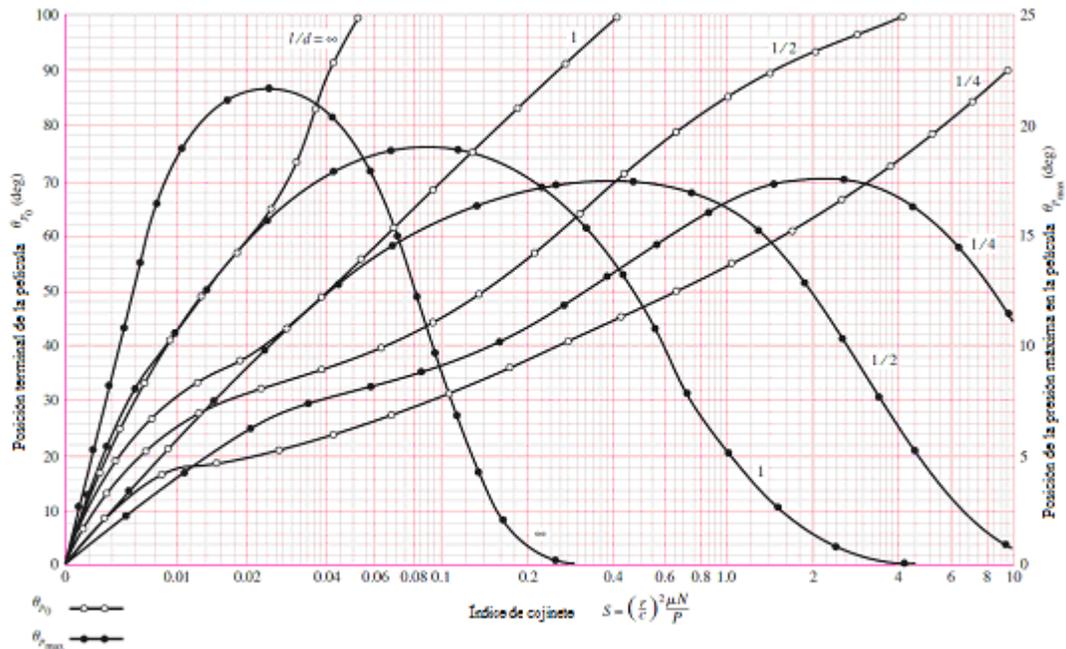


Figura 2.22 Diagrama para determinar la posición terminal de la película de lubricante y de la presión máxima en ella. (Raimondi y Boyd). Shigley, J. & Mischke, C. (2006).

Según Raimondi y Boyd, la interpolación de los datos del diagrama para otros valores de la relación l/d pueden realizarse mediante la ecuación

$$y = \frac{1}{(l/d)^3} \left[-\frac{1}{8} \left(1 - \frac{l}{d}\right) \left(1 - 2\frac{l}{d}\right) \left(1 - 4\frac{l}{d}\right) y_{\infty} + \frac{1}{3} \left(1 - 2\frac{l}{d}\right) \left(1 - 4\frac{l}{d}\right) y_1 - \frac{1}{4} \left(1 - \frac{l}{d}\right) \left(1 - 4\frac{l}{d}\right) y_{1/2} + \frac{1}{24} \left(1 - \frac{l}{d}\right) \left(1 - 2\frac{l}{d}\right) y_{1/4} \right] \quad (2.22)$$

Donde y es la variable deseada dentro del intervalo $\infty > l/d > 1/4$, y y_{∞} , y_1 , $y_{1/2}$, y $y_{1/4}$ son las variables correspondientes a relaciones l/d de ∞ , 1, $1/2$, $1/4$, respectivamente.

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

En el siguiente capítulo se presenta la metodología a seguir para el desarrollo de la investigación, especificando cada paso y actividad a realizar con la finalidad de mostrar claramente el procedimiento a seguir para realización del programa “**RaiboCharts v 1.0**”, y la metodología de cálculo que realiza este último.

3.1 METODOLOGÍA PROPUESTA.

3.1.1 Revisar bibliografía reciente sobre las graficas de Raimondi y Boyd.

Para el desarrollo de la siguiente investigación se parte de una revisión bibliográfica, basada en revistas científicas, libros y sitios de internet con información correspondiente al diseño, e investigaciones de las gráficas de Raimondi y Boyd aplicadas al diseño de cojinetes.

3.1.2 Parametrizar las curvas correspondientes a los diversos factores característicos de los cojinetes.

Una vez concluida la revisión bibliográfica y habiendo establecido que gran parte de los factores característicos de los cojinetes presentes en las curvas de Raimondi y Boyd, no están tabulados en su totalidad, se hizo

necesaria la parametrización de dichas curvas, para poder ser leídos por el programa de computación a realizar.

Para ello se utilizó el software “**TableCurve 2D 5.0**”, con el cual se parametrizaron las curvas correspondientes.

La metodología aplicada fue la de leer la mayor cantidad posible de pares valores (X e Y) de las curvas en cuestión, e introducirlos en el software antes mencionado. El mismo arroja aproximadamente 1000 curvas posibles, con un margen de error aceptable, por cada 20 pares de valores introducidos.

De las curvas arrojadas por “**TableCurve 2D 5.0**” en cada caso, se seleccionó la de menor error indicado por dicho programa.

3.1.3 Diseñar el programa de computación.

Se seleccionó el lenguaje de programación mas acorde para el diseño de este programa de computación y poder cumplir con los objetivos de este trabajo Especial de Grado, permitiendo realizar los diagramas de Raimondi y Boyd, así como cálculos correspondientes al diseño de cojinetes dentro del alcance del trabajo.

3.1.3.1 Desarrollo de la interfaz visual.

Se desarrolló una interfaz que contempló: un ambiente amigable, atractivo visualmente que este ordenado y sea práctico tomando como referencia los programas comerciales, así el usuario podrá identificarse y familiarizarse fácilmente.

3.1.3.2 Desarrollo del código de programación.

Una vez seleccionado el lenguaje de programación, se codifican los algoritmos necesarios y se interconectan con una estructura principal, a fin de compilar todo. El resultado de esta estructura es la herramienta computacional

capaz de graficar los diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de l/d, a la cual se denominó **RaiboCharts v 1.0**.

3.1.3.3 Elaboración del Tutorial.

Se desarrollará un tutorial para el programa realizado, denominado Manual del Usuario con un lenguaje técnico para una correcta utilización de la herramienta computacional con la inclusión de ejemplos ilustrativos, y está disponible dentro la interfaz visual, para que el usuario pueda acceder al mismo durante la utilización del programa, el mismo se encuentra en el apéndice del presente trabajo.

3.1.4 Metodología de cálculo.

3.1.4.1 Calcular las relaciones que existen entre las variables de diseño de cojinetes.

Para ello se especificó una metodología para el cálculo de las variables de diseño de cojinetes especificando los datos necesarios para tal fin, que pudiera ser ejecutada por el programa de computación a realizar.

Dicha metodología fue aplicada en el ejercicio que se presenta en el Capítulo 4.

3.1.4.2 Generación de diagramas de Raimondi y Boyd.

El programa de computación generará las gráficas de Raimondi y Boyd para distintos valores de l/d, basadas en la ecuación de interpolación 2.22, así mismo dicho programa podrá generar las curvas para los valores ya conocidos de $l/d = \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1, \infty$, generados por los autores arriba mencionados y gracias a la parametrización de dichas curvas, la generación podrá ser utilizada mediante la pantalla y también podrá ser impresa si el usuario así lo desee.

3.1.4.3 Validación de los diagramas de Raimondi y Boyd.

La validación de los diagramas resultantes de este programa fue realizada mediante ejercicios ya resueltos así como con información bibliográfica de libros de diseño mecánico y otras publicaciones, entre los que se encuentran, Cavalca, L. K. & Cattaruzzi F. E. (2000), Black, P. & Adams, E. (1968), Kamenets, A.; Toscano, J., & Bernal, A. (2006), Valkonen, A. (2009), Shigley, J. & Mischke, C. (1999 / 2006), así como un *paper* de ElMadany, M. M.; Abdelhamid, G., y Abdul, M. A. (2002). Donde diseñan un programa para el cálculo de cojinetes, bajo la premisa de trabajar el cojinete a su máxima carga y menor fricción, generando varias soluciones dependiendo de ciertas restricciones en las variables del diseño, dicha investigación sirvió también como modelo para validar el programa RaiboCharts V1.0., como se aprecia en el Capítulo 4.

El programa RaiboCharts fue validado con la información anteriormente mencionada, sin embargo se colocaron en el capítulo 4, las comparaciones realizadas con Black (1968), Shigley (1999 / 2006) y ElMadany (2002). Dicha selección se realizó debido a que en estas bibliografías se tenía la mayor cantidad de variables para cada uno en los problemas utilizados.

3.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Se aplicó la documentación directa con el lenguaje de programación, lo que hace necesario que el lector o usuario conozca o tenga algún adiestramiento en cursos especializados y al mismo tiempo se requiere una comprensión teórica mínima sobre diseño de cojinetes, en especial la relación entre las variables aplicando las graficas de Raimondi y Boyd, de tal manera que pueda realizar la resolución de problemas de dichos diseños de forma escrita.

3.3 Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

Las variables involucradas en el presente estudio se modelarán por las ecuaciones o expresiones matemáticas establecidas en el marco teórico, para ello se empleará la programación orientada a objetos y a interfaces graficas, lo que constituye actualmente la tendencia de diversos lenguajes de programación por la facilidad de comprensión y manejo de datos.

CAPÍTULO 4

Análisis de Resultados

En esta etapa se hace una breve referencia al resultado de la parametrización de las curvas, así como del lenguaje de programación elegido y se realiza el análisis de los resultados del presente trabajo, mediante la validación de la herramienta computacional desarrollada RaiboCharts v 1.0, al comparar los resultados obtenidos de problemas desarrollados de manera manual, con las soluciones arrojadas por dicho programa.

4.1 PARAMETRIZACIÓN DE LAS CURVAS.

Una vez realizada la parametrización cuya metodología se explicó en el capítulo anterior, el programa TableCurve v 5.0, generó por medio de la pantalla, aproximadamente 1000 curvas posibles, en respuesta a una serie de coordenadas (x, y) de la base de datos obtenida por el autor de este trabajo, y para cada curva de las variables que intervienen en el diseño de cojinetes, se obtuvo una ecuación, la misma se pudo apreciar en la pantalla del programa que arroja la curva más probable junto con la ecuación de la misma y las constantes para cada caso.

Tal como se puede observar en la figura 4.1, en la que se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en esta etapa, el resto de las imágenes

42 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

para cada relación de l/d de cada curva involucrada, se encuentran en conjunto con la base de datos generada, disponible como anexo II en el CD entregado con el presente trabajo a la Escuela de Ingeniería Mecánica.

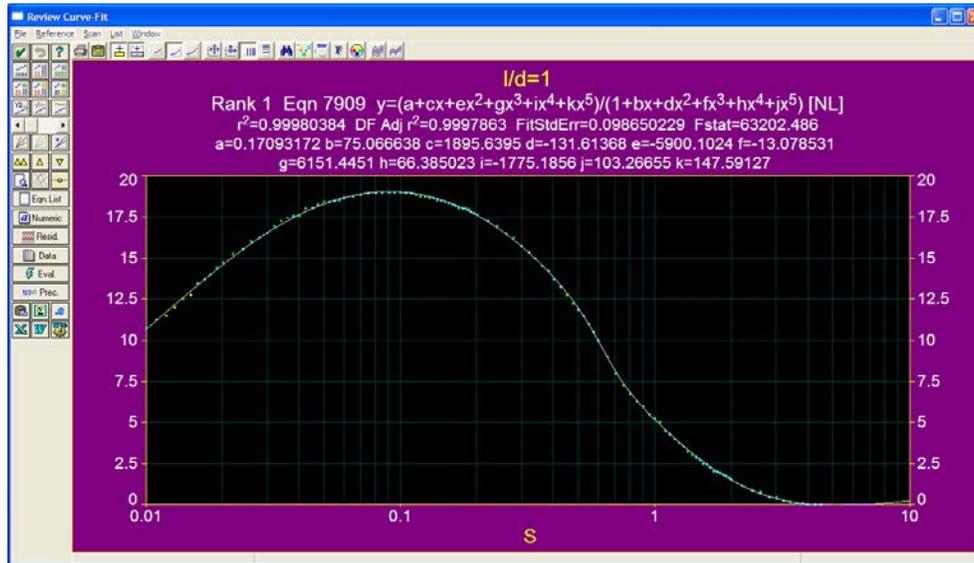


Figura 4.1 Resultado de la parametrización de la curva de Posición de Presión Máxima Pelicular para un $l/d = 1$, arrojada por el programa TableCurve v5.0

4.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA PARA LA CONSTRUCCION DE LOS DIAGRAMAS DE RAIMONDI Y BOYD PARA DISTINTAS RELACIONES DE L/D.

4.2.1 Lenguaje de programación.

Actualmente en el mercado existen una gran variedad de lenguajes de programación que nos permitirían realizar tal investigación; entre todas las posibilidades del lenguaje se selecciona el programa **Matlab R2011**, por su versatilidad y conocimiento del autor de esta investigación. Anteriormente para el desarrollo de aplicaciones como la realizada, se requería de programadores expertos en C y centenares de líneas de código para una tarea relativamente sencilla y corta. Sin embargo con dicho programa, la

interfase máquina-usuario es excelente, debido entre otros, a que la programación se realiza por medio de pantallas y el orden de la programación no es vital para el desarrollo de la aplicación.

Matlab, además de ser uno de los programas más actualizados actualmente y conocido por el autor, permite la incorporación de menús, botones de orden, casillas de verificación, cuadros de texto, botones de opción, cuadro de lista, etc. El mismo, también puede manejar datos tabulados para comunicarse con otras aplicaciones y acceder a bases de datos, logrando obtener varias ventanas en una pantalla debido a estar en un ambiente bajo Windows.

4.2.2 Estructura del programa.

El programa se diseñó siguiendo una estructura que consta de dos procesos básicos: ventana y evento.

Una ventana es una región rectangular con sus propios límites; hay varios tipos de ventanas por ejemplo: una ventana del explorador de Windows 7, una ventana de un documento dentro de su programa de texto o un cuadro de diálogo que emerge para recordarle una cita. Aunque estos son ejemplos muy comunes existen muchos otros tipos de ventanas. Mientras que los eventos son las acciones del usuario, ejemplo hacer clic con el ratón o presionar una tecla, mediante programación o incluso como resultado de acciones de otras ventanas.

La estructura anteriormente descrita se puede decir que es desde el punto de vista de la interfaz gráfica, no obstante un programa de computación también está estructurado de acuerdo a los archivos que lo componen:

- Un archivo que realiza el llamado de todos los componentes.
- Un archivo para cada formulario.

El archivo principal, que posee una lista de todos los archivos asociados con el programa, y es quien realiza el llamado a el resto de los archivos dependiendo del evento realizado por el usuario.

Un formulario es una ventana, la ventana de Windows de cualquier aplicación, los módulos de formularios pueden contener descripciones en forma de texto del formulario y sus controles, incluyendo los valores de sus propiedades. También pueden contener declaraciones a nivel de formulario de constantes, variables y procedimientos externos, procedimientos de evento y procedimientos generales.

Un modulo es un archivo de Matlab donde se escribe parte del código de nuestro programa, y se dice parte, porque puede haber código en el formulario también. Las rutinas incluidas dentro de los módulos pueden ser ejecutadas desde los formularios de la aplicación.

Para cada ventana se encuentra un *Archivo.m*: que contiene los módulos necesarios para la ejecución del programa, cálculos realizados y rutinas o funciones que se ejecutan según la interacción del usuario, tales como click en un botón, selección de una lista desplegable, etc.

Debido a la característica del lenguaje de programación basado en responder a los eventos realizados sobre un determinado control contenido dentro de una ventana, o sobre ella misma, no existe una rutina principal que controle toda la ejecución del programa. Cada rutina o procedimiento es llamada en el momento que se realice un determinado evento y se necesite de ella para la consecución del programa. Por lo que ha de definirse una serie de sub-rutinas para la ejecución del programa.

El *Archivo.fig*, posee los módulos necesarios para la visualización gráfica de los componentes de interacción del usuario, tales como botones, cajas de texto, etc.

Se diseñaron tres tipos de ventana según la función que las mismas deben realizar:

- Ventana principal.
- Entrada de datos
- Salida de datos: Puede ser por pantalla o por impresoras.
- Información general y manual del usuario.

Las ventanas mencionadas anteriormente son las siguientes:

La ventana principal contiene las demás ventanas. Esta guardada con el nombre Principal.m.

La ventana de entrada de datos y selección de la curva a graficar, esta guardada con el nombre Grafica.m.

Analítico.m, es el formulario usado para la resolución de un problema de diseño de cojinetes, por medio de la parte analítica del programa, es decir utilizando las ecuaciones ya conocidas y la programación de RaiboCharts.

La ventana de salida de datos que muestra la gráfica realizada con la o las curvas seleccionadas, esta guardada con el nombre Grafica.m.

La ventana de información general y manual del usuario, esta guardada con el nombre manual.m.

Los formularios para la generación de cada una de las gráficas se utilizaron tienen la siguiente estructura:

Entrada de datos:

Principal.fig: primera pantalla que se muestra al usuario, en ella se selecciona el tipo de acción a realizar, ya sea la construcción de los gráficos de distintos valores de l/d , o la resolución de un problema de manera analítica.

Entrada y Salida de datos

Grafica.m: es el formulario de resolución por la vía gráfica, donde se selecciona el tipo de curvas a generar.

Análítico.m: es el formulario de resolución por la vía analítica (formulas) donde se realiza paso a paso la resolución de un problema de diseño de cojinetes.

Entre las principales rutinas se tienen:

[nombre_de_grafica_11].m: Contiene las variables y las fórmulas para generar la gráfica para un $l/d = 1/4$

Un ejemplo de esta rutina, se encuentra en el Anexo I del presente trabajo.

[nombre_de_grafica_12].m: Contiene las variables y las fórmulas para generar la gráfica para un $l/d = 1/2$

[nombre_de_grafica_13].m: Contiene las variables y las fórmulas para generar la gráfica para un $l/d = 1$

[nombre_de_grafica_14].m: Contiene las variables y las fórmulas para generar la gráfica para un $l/d = \infty$

[nombre_de_grafica_Todas].m: Contiene el cálculo total y la secuencia de programación para hacer posible la generación de la grafica con todas las curvas anteriormente descritas, en un mismo Plot.

[formato2].m: Contiene las rutinas necesarias para generar la grafica cuando se desconoce el valor de L/D, a su vez se establece el formato de las gráficas, tales como grosor de línea, tipo de texto a utilizar, escala, etc.

[formato3].m: Contiene las rutinas necesarias para generar la grafica cuando se conoce el valor de L/D, a su vez se establece el formato de las gráficas, tales como grosor de línea, tipo de texto a utilizar, escala, etc.

Para una mayor comprensión, a continuación se presenta un diagrama del procedimiento general desarrollado por la herramienta computacional RaiboCharts v 1.0, para graficar los diagramas de Raimondi y Boyd, tanto para las relaciones esenciales ($1/4, 1/2, 1, \infty$) como para distintos valores de l/d , figura 4.2.

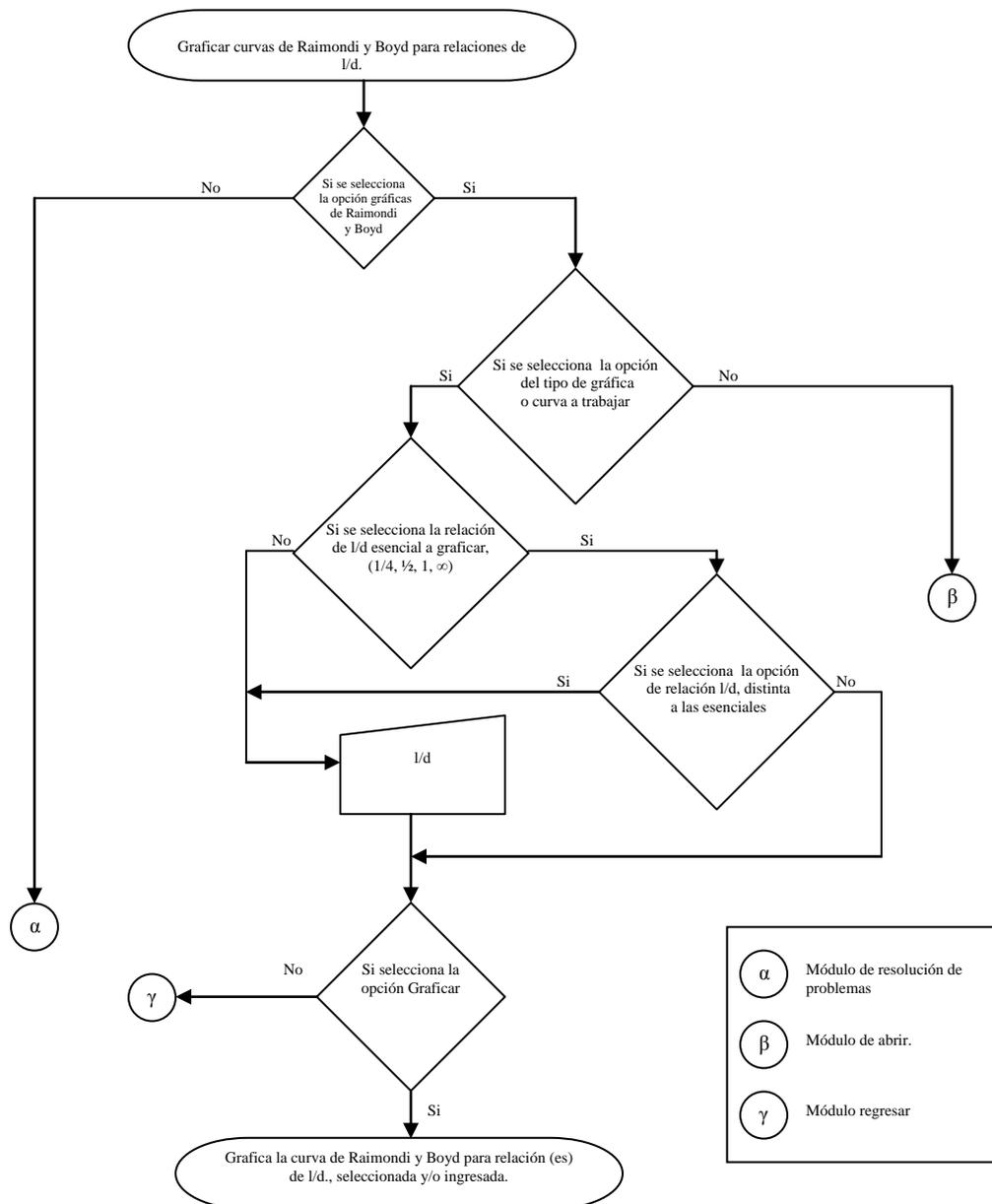


Figura 4.2 Subrutina: Graficar curvas de Raimondi y Boyd para relaciones de l/d .

4.3 RESULTADOS.

A continuación se presentan problemas que implica el cálculo de variables de diseño de cojinetes de forma manual y con la herramienta computacional RaiboCharts V1.0.

4.3.1 Resolución manual de problemas:

4.3.1.1 Problema tipo 1.

Para un cojinete de muñón completo, se especifican las siguientes cantidades:

$$\mu = 4 \mu\text{reyn}$$

$$N = 30 \text{ rev/s}$$

$$W = 500\text{lb (carga de cojinete)}$$

$$r = 0.75 \text{ in}$$

$$c = 0.0015 \text{ in}$$

$$l = 1.50 \text{ in}$$

La carga unitaria es:

$$P = \frac{W}{2rl} = \frac{500}{2(0.75)(1.50)} = 222 \text{ psi}$$

El número característico es:

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \left(\frac{\mu N}{P}\right) = \left(\frac{0.75}{0.0015}\right)^2 \left[\frac{4(10)^{-6}(30)}{222}\right] = 0.135$$

$$\text{Así mismo } l/d \text{ es: } 1.5/(2)(0.75) = 1.$$

Entrando a la Figura 2-16 con $S = 0.135$ y $l/d = 1$ se tiene que: $h_0/c = 0.42$ y $\epsilon = 0.58$.

Entonces:

$$h_o = 0.42 (0.0015) = 0.00063 \text{ in}$$

Entrando a la Figura 2-17 con $S = 0.135$ y $l/d = 1$ se tiene que: $\phi = 53^\circ$

Entonces:

$$\epsilon = e / c = 0.58$$

$$e = 0.58 (0.0015) = 0.00087 \text{ in}$$

Entrando a la Figura 2-19 con $S = 0.135$ y $l/d = 1$ se tiene que: $\frac{r}{c} f = 3.50$

Entonces:

$$f = 0.007$$

$$T = fWr = 0.007(500)(0.75) = 2.62 \text{ lb.in}$$

$$H = \frac{TN}{1050} = \frac{2.62(30)}{1050} = 0.0748 \text{ hp}$$

Entrando a la Figura 2-20 con $S = 0.135$ y $l/d = 1$ se tiene que: $\frac{Q}{rcNI} = 4.28$

Por consiguiente:

$$Q = 4.28rcNI = 4.28(0.75)(0.0015)(30)(1.5) = 0.216 \text{ in}^3 / \text{s}$$

Entrando a la Figura 2-21 con $S = 0.135$ y $l/d = 1$ se tiene que: $\frac{Q_s}{Q} = 0.655$

En consecuencia, la fuga lateral vale:

$$Q_s = 0.655Q = 0.655(0.216) = 0.142 \text{ in}^3 / \text{s}$$

Entrando a la Figura 2-22 con $S = 0.135$ y $l/d = 1$ se tiene que: $\frac{P}{P_{\text{máx}}} = 0.42$

Entonces, ya que $P = 222$ psi, la presión máxima se determina como:

$$P_{\text{máx}} = P / 0.42 = 222 / 0.42 = 529 \text{ psi}$$

Entrando a la Figura 2-23 con $S = 0.135$ y $l/d = 1$ se tiene que: $\varphi_{\text{pmáx}} = 18.5^\circ$ y

$$\varphi_{\text{po}} = 75^\circ$$

4.3.1.2 Problema tipo 2.

Para un cojinete de muñón completo, se especifican las siguientes cantidades:

$$\mu = 2.10^{-6} \text{ reyn}$$

$$N = 30 \text{ rev/s}$$

$$W = 585 \text{ lb (carga de cojinete)}$$

$$d = 2.25 \text{ in}$$

$$c/r = 0.001$$

$$l = 3.375 \text{ in}$$

La carga unitaria es:

$$P = \frac{W}{2rl} = \frac{585}{3.375 \times 2.25} = 77 \text{ psi}$$

El número característico es:

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \left(\frac{\mu N}{P}\right) = (10^3)^2 \left[\frac{2(10)^{-6}(30)}{77}\right] = 0.78$$

$$\text{Así mismo } l/d \text{ es: } 3.375/2.25 = 1.5$$

Entrando a la Figura 2-16 con $S = 0.78$ y $l/d = 1.5$ se tiene que: $h_o/c = 0.87$ y

$$\epsilon = 0.13.$$

Entonces:

$$h_o = 0.87 (0.001125) = 0.000979 \text{ in}$$

Entrando a la Figura 2-17 con $S = 0.78$ y $l/d = 1.5$ se tiene que: $\varphi = 75^\circ$

Entonces:

$$\epsilon = e / c = 0.13$$

$$e = 0.13 (0.001125) = 0.00014625 \text{ in}$$

Entrando a la Figura 2-19 con $S = 0.78$ y $l/d = 1.5$ se tiene que: $\frac{r}{c} f = 16$

Entonces:

$$f = 0.0016$$

$$T = fWr = 0.0016(585)(1.125) = 1.053 \text{ lb.in}$$

$$H = \frac{TN}{1050} = \frac{1.053(30)}{1050} = 0.030086hp$$

Entrando a la Figura 2-20 con $S = 0.78$ y $l/d = 1.5$ se tiene que: $\frac{Q}{rcNI} = 3.23$

Por consiguiente:

$$Q = 3.23rcNI = 3.23(1.125)(0.001125)(30)(3.375) = 0.415 \text{ in}^3 / \text{s}$$

Entrando a la Figura 2-21 con $S = 0.78$ y $l/d = 1.5$ se tiene que: $\frac{Q_s}{Q} = 0.16$

En consecuencia, la fuga lateral vale:

$$Q_s = 0.16Q = 0.16(0.415) = 0.0664 \text{ in}^3 / \text{s}$$

Entrando a la Figura 2-22 con $S = 0.78$ y $l/d = 1.5$ se tiene que: $\frac{P}{P_{m\acute{a}x}} = 0.56$

Entonces, ya que $P = 77$ psi, la presión máxima se determina como:

$$P_{m\acute{a}x} = P / 0.56 = 77 / 0.56 = 138 \text{ psi}$$

Entrando a la Figura 2-23 con $S = 0.78$ y $l/d = 1.5$ se tiene que: $\varphi_{p_{m\acute{a}x}} = 5^\circ$ y

$$\varphi_{p_0} = 122^\circ$$

4.3.1.3 Problema tipo 3.

A continuación se muestran los resultados de un ejercicio presentado por EIMadany, M. M.; Abdelhamid, G., y Abdul, M. A. (2002), el cual se utilizó también, para la validación del programa.

Tabla 4.1 Resultados de un problema de diseño mediante el uso del CAD Design of Journal Bearing.

l/d	l	SAE	To (c)	c (mm)	S	ho/c	f(r/c)	Q/(rcNI)	Qs/Q
0.9	72	60	70.87	0.119	0.224	0.521	5.349	4.217	0.593

4.3.2 Resolución de problemas utilizando las curvas generadas por RaiboCharts:

A continuación se realizará la resolución de problemas con el soporte de la herramienta computacional, y se comparará con cada uno de los resultados anteriores.

4.3.2.1 Problema tipo 1.

Para un cojinete de muñón completo, se especifican las siguientes cantidades:

$$\mu = 4 \mu_{\text{reyn}}$$

$$N = 30 \text{ rev/s}$$

$$W = 500\text{lb (carga de cojinete)}$$

$$r = 0.75 \text{ in}$$

$$c = 0.0015 \text{ in}$$

$$l = 1.50 \text{ in}$$

Al utilizar la herramienta RaiboCharts como soporte se obtienen los resultados mostrados en la tabla 4.2.

Para mayor información acerca de la obtención de resultados de este problema por medio de la herramienta RaiboCharts, puede consultar el

manual del usuario encontrado en el apéndice, donde se describe paso a paso el procedimiento para la obtención de resultados.

Tabla 4.2 Resultados de un problema de diseño mediante la asistencia de RaiboCharts.

ho/c	ε	ho	φ	e	r*f / c	f	T	H
0,4185	0,5823	0,00062775	51,57	0,00087345	3,183	0,006366	2,38725	0,06820714
Q / (rcNI)	Q	Qs / Q	Qs	P / Pmax	Pmax	φpmax	φpo	
4,28	0,216	0,6702	0,1447632	0,4218	526,31579	18,75	75,63	

4.3.2.2 Problema tipo 2.

Para un cojinete de muñón completo, se especifican las siguientes cantidades:

$\mu = 2.10^{-6}$ reyn

$N = 30$ rev/s

$W = 585$ lb (carga de cojinete)

$d = 2.25$ in

$c/r = 0.001$

$l = 3.375$ in

Al utilizar la herramienta RaiboCharts como soporte se obtienen los resultados mostrados en la tabla 4.3.

Para mayor información acerca de la obtención de resultados de este problema por medio de la herramienta RaiboCharts, puede consultar el manual del usuario encontrado en el apéndice, donde se describe paso a paso el procedimiento para la obtención de resultados.

Tabla 4.3 Resultados de un problema de diseño mediante la asistencia de RaiboCharts.

ho/c	ε	ho	φ	e	r*f / c	f	T	H
0,8947	0,1158	0,00100654	76,46	0,00013028	15,64	0,001564	1,0293075	0,02940879
Q / (rcNI)	Q	Qs / Q	Qs	P / Pmax	Pmax	φpmax	φpo	
3,262	0,4638832	0,1495	0,06935054	0,6065	126,957956	3,958	100	

4.3.2.3 Problema tipo 3.

A continuación se muestran los resultados de un ejercicio mediante el apoyo RaiboCharts v 1.0.

Para el mismo ejercicio, de la Tabla 4.1, se utilizará a manera académica y para comparar los resultados, un $l/d = 0.9$ y un S de 0.224.

Tabla 4.4 Resultados de un problema de diseño mediante el apoyo de RaiboCharts.

h_0/c	r^*f/c	$Q/(rcNI)$	Q_s/Q
0,5221	5,015	4,165	0,5912

4.3.3 Resolución de problemas utilizando la opción de resolución de problemas por RaiboCharts:

A continuación se realizará la resolución de problemas con la herramienta computacional, RaiboCharts V1.0, y se comparará con cada uno de los resultados anteriores, para más información el usuario deberá leer en el manual, el detalle de los mismos.

4.2.3.1 Problema tipo 1.

Para un cojinete de muñón completo, se especifican las siguientes cantidades:

$$\mu = 4 \mu\text{reyn}$$

$$N = 30 \text{ rev/s}$$

$$W = 500\text{lb (carga de cojinete)}$$

$$r = 0.75 \text{ in}$$

$$c = 0.0015 \text{ in}$$

$$l = 1.50 \text{ in}$$

Al utilizar la herramienta RaiboCharts como soporte se obtienen los resultados mostrados en la tabla 4.6.

Para mayor información acerca de la obtención de resultados de este problema por medio de la herramienta RaiboCharts, puede consultar el manual del usuario encontrado en el apéndice, donde se describe paso a paso el procedimiento para la obtención de resultados.

Tabla 4.6 Resultados de un problema de diseño mediante el programa RaiboCharts.

ho/c	ε	ho	φ	e	r*f / c	f	T	H
0,4185	0,5823	0,00062775	51,57	0,00087345	3,183	0,006366	2,38725	0,06820714
Q / (rcNI)	Q	Qs / Q	Qs	P / Pmax	Pmax	φpmax	φpo	
4,28	0,216	0,6702	0,1447632	0,4218	526,31579	18,75	75,63	

4.3.3.2 Problema tipo 2.

Para un cojinete de muñón completo, se especifican las siguientes cantidades:

$$\mu = 2.10^{-6} \text{ reyn}$$

$$N = 30 \text{ rev/s}$$

$$W = 585 \text{ lb (carga de cojinete)}$$

$$d = 2.25 \text{ in}$$

$$c/r = 0.001$$

$$l = 3.375 \text{ in}$$

Al utilizar la herramienta RaiboCharts como soporte se obtienen los resultados mostrados en la tabla 4.7.

Para mayor información acerca de la obtención de resultados de este problema por medio de la herramienta RaiboCharts, puede consultar el manual del usuario encontrado en el apéndice, donde se describe paso a paso el procedimiento para la obtención de resultados.

Tabla 4.7 Resultados de un problema de diseño mediante el programa RaiboCharts.

ho/c	ε	ho	φ	e	r*f / c	f	T	H
0,8947	0,1158	0,00100654	76,46	0,00013028	15,64	0,001564	1,0293075	0,02940879
Q / (rcNI)	Q	Qs / Q	Qs	P / Pmax	Pmax	φpmax	φpo	
3,262	0,4638832	0,1495	0,06935054	0,6065	126,957956	3,958	100	

4.3.3.3 Problema tipo 3.

A continuación se muestran los resultados de un ejercicio mediante el uso de la opción resolución de problemas de RaiboCharts v 1.0.

Para el mismo ejercicio, de la Tabla 4.1, se utilizará a manera académica y para comparar los resultados, un $l/d = 0.9$ y un S de 0.224.

Tabla 4.8 Resultados de un problema de diseño mediante la herramienta RaiboCharts.

ho/c	r*f / c	Q / (rcNI)	Qs / Q
0,5221	5,015	4,165	0,5912

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

La tabla 4.9, muestra los resultados obtenidos de cada uno de los problemas, utilizados para la validación, además se muestra la variación de los resultados obtenidos manualmente, con respecto a los resultados obtenidos con la herramienta computacional, cabe destacar que para la obtención del porcentaje de variación, se divide la variación entre el mayor de los resultados.

Tal como se muestra en la tabla 4.9, por medio de RaiboCharts es posible realizar los ejercicios de dos maneras, una es utilizando el la opción graficas de Raimondi y Boyd, y tomando los valores de manera manual, pero de las graficas generadas por el programa, y la otra manera es utilizando la opción de resolución de problemas; ambos procedimientos se encuentran detallados en el apéndice, dentro del manual del usuario.

Tabla 4.9 Variación de los resultados al validar el programa.

Problema	Variable	Resultado Manual	Resultado de RaiboCharts Grafico	Resultado de RaiboCharts Analitico	Variación (Manual vs RaiboCharts, Grafico)	Error relativo (Manual vs RaiboCharts, Grafico)	Variación (Manual vs RaiboCharts, Analitico)	Error relativo (Manual vs RaiboCharts, Analitico)
1 (l/d=1; S=0.135)	ho/c	0,42	0,4185	0,427666667	0,0015	0,36	0,007666667	1,79
	ε	0,58	0,5823	0,5734	0,0023	0,39	0,0066	1,14
	ho	0,00063	0,00062775	0,0006415	2,25E-06	0,36	0,0000115	1,79
	φ	53	51,57	52,1486	1,43	2,70	0,8514	1,61
	e	0,00087	0,00087345	0,0008601	0,00000345	0,39	9,9E-06	1,14
	r*f / c	3,5	3,183	3,5	0,317	9,06	0	0,00
	f	0,007	0,006366	0,007	0,000634	9,06	0	0,00
	T	2,62	2,38725	2,625	0,23275	8,88	0,005	0,19
	H	0,0748	0,068207143	0,08035	0,006592857	8,81	0,00555	6,91
	Q / (rcNI)	4,28	4,28	4,28	0	0,00	0	0,00
	Q	0,216	0,216	0,216675	0	0,00	0,000675	0,31
	Qs / Q	0,655	0,6702	0,654897889	0,0152	2,27	0,000102111	0,02
	Qs	0,142	0,1447632	0,1419	0,0027632	1,91	1E-04	0,07
	P / Pmax	0,42	0,4218	0,419584226	0,0018	0,43	0,000415774	0,10
	Pmax	529	526,3157895	529,0952	2,6842105	0,51	0,0952	0,02
	φpmax	18,5	18,75	18,664	0,25	1,33	0,164	0,88
φpo	75	75,63	76,4566	0,63	0,83	1,4566	1,91	
2 (l/d=1.5; S=0.78)	ho/c	0,87	0,8947	0,8747	0,0247	2,76	0,0047	0,54
	ε	0,13	0,1158	0,128	0,0142	10,92	0,002	1,56
	ho	0,000979	0,001006538	0,00096538	2,7538E-05	2,74	1,362E-05	1,41
	φ	75	76,46	75,34	1,46	1,91	0,34	0,45
	e	0,00014625	0,000130275	0,00014	0,000015975	10,92	6,25E-06	4,46
	r*f / c	16	15,64	15,638	0,36	2,25	0,362	1,41
	f	0,0016	0,001564	0,0015368	0,000036	2,25	0,0000632	0,45
	T	1,053	1,0293075	1,058	0,0236925	2,25	0,005	4,46
	H	0,030086	0,029408786	0,030412045	0,000677214	2,25	0,000326045	2,31
	Q / (rcNI)	3,23	3,262	3,245	0,032	0,98	0,015	0,46
	Q	0,415	0,463883203	0,413487	0,048883203	10,54	0,001513	0,37
	Qs / Q	0,16	0,1495	0,157809	0,0105	6,56	0,002191	1,39
	Qs	0,0664	0,069350539	0,064327	0,002950539	4,25	0,002073	3,22
	P / Pmax	0,56	0,6065	0,583589	0,0465	7,67	0,023589	4,04
	Pmax	138	126,9579555	132,345636	11,0420445	8,00	5,654364	4,27
	φpmax	5	3,958	4,12765	1,042	20,84	0,87235	17,45
φpo	122	100	114,6546	22	18,03	7,3454	6,41	
3 (l/d=.9; S=0.224)	ho/c	0,521	0,5221	0,521	0,0011	0,21	0	0,00
	r*f / c	5,349	5,015	5,315	0,334	6,24	0,034	0,64
	Q / (rcNI)	4,217	4,165	4,2101	0,052	1,23	0,0069	0,16
	Qs / Q	0,593	0,5912	0,59312	0,0018	0,30	0,00012	0,02

Al observar los resultados obtenidos, se tiene lo siguiente:

En el primer problema el porcentaje de variación de mayor magnitud entre las variables es de 9,06% de manera grafica y de 6,91% por la resolución analítica del programa, con un promedio para ambos casos de alrededor de 2.78% y 1.05% respectivamente, lo que indica que la herramienta computacional diseñada objeto de esta validaciones precisa en cuanto a este tipo de problemas de calculo, por otra parte los resultados se pueden decir que son confiables, ya que se validaron con una bibliografía

utilizada en la materia Elementos de Máquinas de Ingeniería Mecánica de la UC, Shigley, J. & Mischke, C. (1999), con esto se comprueba que los resultados obtenidos por medio de la herramienta son de gran exactitud.

En el segundo problema los porcentajes de error, son un poco mas altos y tienen el mismo comportamiento que en el problema numero uno, esto se atribuye a la diferencia de los gráficos empleados entre las bibliografías utilizadas. Para este caso la bibliografía fue de Black, P. & Adams, E. (1968).

En el tercer ejercicio los errores son prácticamente despreciables y el programa muestra una gran precisión respecto a la bibliografía de EIMadany, M. M.; Abdelhamid, G., y Abdul, M. A. (2002).

Para los 3 casos, se demuestra que la desviación entre la resolución manual y la resolución por medio de la herramienta RaiboCharts posee una gran exactitud y precisión ya que al ser comparado con los resultados anteriores las desviaciones son relativamente bajas, considerando la gran cantidad de datos que se tomaron para la elaboración de dicho programa.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

En este Capítulo se presentan las conclusiones obtenidas y las recomendaciones importantes a tener en cuenta para futuras investigaciones sobre la construcción de los diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador.

5.1 CONCLUSIONES.

Por medio de la implementación de la herramienta computacional RaiboCharts, se puede simplificar significativamente el trabajo y a su vez incrementar la precisión y exactitud, cuando se resuelven problemas de cojinetes de cubrimiento total, ya que se elimina el proceso de aproximación en curvas de papel lo cual resulta tedioso y a la vez presenta errores de apreciación durante la toma de las variables.

El tiempo empleado en el diseño de cojinetes con el programa, es bastante corto en comparación con la realización en forma manual, se reduce aproximadamente en un 90%.

Los resultados obtenidos al realizar el diseño con el programa dan una diferencia con respecto al diseño manual, de aproximadamente un 5%. Esto es muy alentador en vista de la cantidad de tablas y curvas que se tuvieron que parametrizar. También el número de cifras significativas juega un papel importante en la disminución de estas diferencias.

El manual del usuario, el cual se encuentra en el apéndice, es una guía primordial para comprender el funcionamiento del programa RaiboCharts; además en el mismo se explica detalladamente como resolver también un problema sencillo de diseño de cojinetes con la herramienta computacional, y se presentan ejemplos resueltos por medio del programa, lo que le permite al usuario aprender a utilizar la herramienta de la manera mas recomendable.

5.2 RECOMENDACIONES.

Se recomienda la elaboración de un Trabajo Especial de Grado, donde se incluyan en el diseño de cojinetes el análisis térmico.

Expandir el estudio a cojinetes de recubrimiento parcial (β distinto a 360°).

Se recomienda al estudiantado que amplíe los estudios en el diseño de cojinetes mediante las curvas, usando como herramienta el programa RaiboCharts V1.0.

Se recomienda al usuario en especial si es estudiante, realizar una gran cantidad de ejercicios, utilizando la herramienta computacional, para desarrollar las destrezas necesarias para el manejo de la misma.

Se recomienda el uso del programa en las materias, Elementos de Maquinas II, así como en Lubricación y Cojinetes, de la escuela de ingeniería mecánica, a fin que el estudiantado pueda aprovechar la herramienta desarrollada.

Es importante que se realicen pruebas al programa a fin de recibir cualquier sugerencia o mejora que se considere conveniente.

Es recomendable que para el buen uso de la herramienta, el usuario lea en su totalidad el manual adjunto, de esta manera utilizará el programa de la forma correcta.

APENDICE

Manual de usuario

MANUAL DE USUARIO DE RAIBOCHARTS
(Herramienta computacional para la asistencia en el diseño de cojinetes, mediante las curvas de Raimondi y Boyd, para distintos valores de l/d).

1. Definición de RaiboCharts.

RaiboCharts es un programa computacional diseñado para la construcción de los diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes de cubrimiento total ($\beta=360$) para distintos valores de l/d , con el fin de simplificar el trabajo durante el diseño por dicho método.

Adicionalmente, RaiboCharts permite la resolución de problemas básicos de diseño de cojinetes, tal como se encuentran los ejemplos en el presente manual.

Cabe destacar que la herramienta computacional solo sirve de asistencia durante la resolución de problemas o diseño de cojinetes, es decir se recomienda que el usuario tenga un mínimo de conocimientos con respecto al diseño de maquinas, en especial en el tema tratado “Diseño de Cojinetes”, para la fácil comprensión de la terminología usada y manejo del programa así como la obtención de resultados satisfactorios.

Cumpliendo con los requisitos anteriores el adiestramiento en el programa no requiere de mucho tiempo.

A continuación se describe un Tutorial, para el uso de la herramienta computacional, con ejemplos prácticos de diseño.

2. Requisitos mínimos del sistema para la aplicación.

- Se requiere el siguiente hardware y software:
- Microsoft Windows 7 Starter o posterior.
- Matlab v R2011a o posterior.
- Intel ® Atom™ CPU N270 @ 1.6GHz, 1600Mhz.
- 2GB RAM (Memoria física instalada).
- Pantalla de resolución compatible con la versión del Microsoft Windows.

3. Instalación del programa.

Inserte el disco que contiene el programa de computación en la unidad correspondiente del equipo.

El disco contiene un archivo de auto iniciación, el cual generará la instalación automáticamente. Si en el supuesto caso, no se inicia dicho archivo, continúe con los siguientes pasos:

- A través del administrador de archivos de Windows haga “click” con el Mouse sobre el icono de la unidad donde se encuentre el programa.
- Ubique el archivo “setup.exe” y luego haga doble click o pulse enter encima del mismo para comenzar la aplicación de instalación del programa.
- Al parecer la pantalla de instalación, indique la ubicación donde se va a instalar el programa (ej: C:\Archivos de programa\Raibocharts).

Siguiendo el procedimiento antes mencionado, el programa se ejecutará perfectamente con todos los archivos para su ejecución.

4. Manejo del programa.

Una vez ejecutado el programa, se abrirá la pantalla principal del mismo, tal como se muestra en la Figura A-1.



Figura A-1 Ventana Principal de RaiboCharts

Como se observa en la Figura A-1, RaiboCharts tiene una interfaz grafica que puede ser muy familiar con la mayoría de los usuarios, pues presenta ventanas y botones que son muy utilizados en la mayor parte de los programas bajo ambiente Windows.

4.1 Pasos generales a seguir para obtener las curvas de Raimondi y Boyd, para diferentes I/d .

1. Se selecciona, la opción: Curvas de Raimondi y Boyd y se hace "click" en continuar. (Figura A-2)

70 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

Grafico indicador de selección

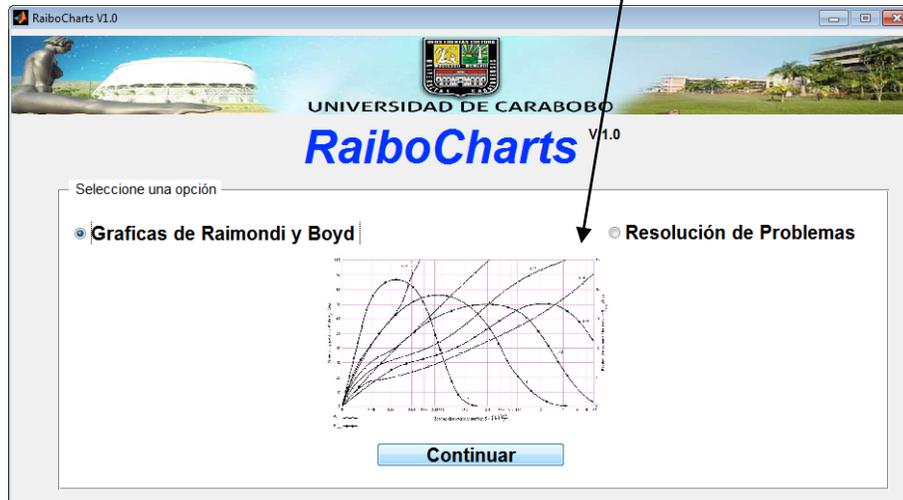


Figura A-2 Ventana Principal de RaiboCharts, con selección grafica.

Tal como muestra la figura A-2, una vez seleccionada la opción grafica, un grafico tipo aparecerá en la pantalla indicando que la selección de graficas fue realizada.

2. En la Ventana siguiente (Figura A-3), se muestran las opciones de graficas a elegir, la relación l/d a utilizar, para la selección del usuario.



Figura A-3 Ventana de selección de curva a graficar

Como se muestra en la Figura A-4, el usuario puede elegir si solo desea graficar una sola curva o varias, puede graficar desde 1 hasta 5 graficas simultáneamente, siempre de un mismo tipo, pero de distintas relaciones de l/d ; en esta pantalla, se encuentran predefinidas las cuatro relaciones de l/d conocidas y manejadas ($l/d=1/4$, $l/d=1/2$, $l/d=1$, $l/d= \infty$), el usuario solo tiene que tildar la curva de su gusto y pulsar el botón graficar para obtener las curvas solicitadas.



Figura A-4 Ventana de selección del tipo de curva

En caso de necesitar solo la curva con la relación l/d distinta a las predefinidas, debe tildar en la casilla de selección l/d , y luego colocar el número de la relación, el usuario debe ingresar en la casilla un número mayor o igual a 0.25, (la separación decimal debe ser realizada por un punto no por una coma). Posteriormente se debe hacer click en el botón graficar. Inmediatamente se abrirá una nueva ventana con la grafica solicitada.

En caso de equivocación o cambio de opinión del usuario, se puede deseleccionar, con solo tildar la celda de nuevo o pulsar el botón “Limpiar”, el cual borrará todas las selecciones anteriormente realizadas.

72 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

El usuario también podrá volver al menú de inicio o pantalla principal (Figura A-1) tan solo pulsando el botón “regresar”.



Figura A-5 Ventana de selección del tipo de curva

3. Una vez pulsado el botón “graficar” aparecerá una ventana emergente tal y como lo muestra la Figura A-6.

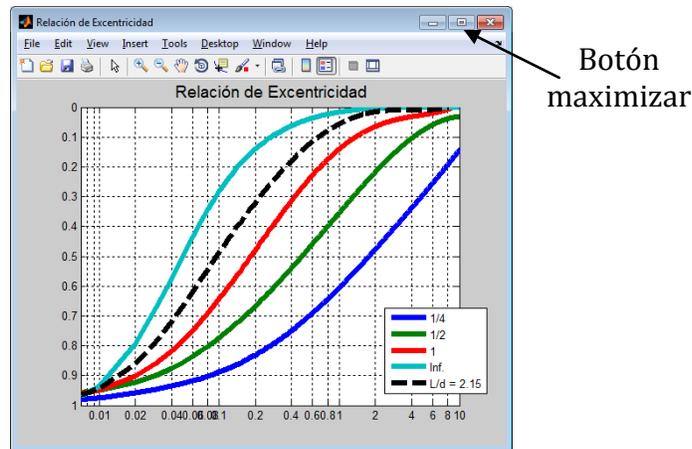


Figura A-6 Ventana de grafica generada

El usuario deberá pulsar el botón de maximizar y la grafica se mostrará en su forma ideal (Figura A-7)

Barra de herramientas

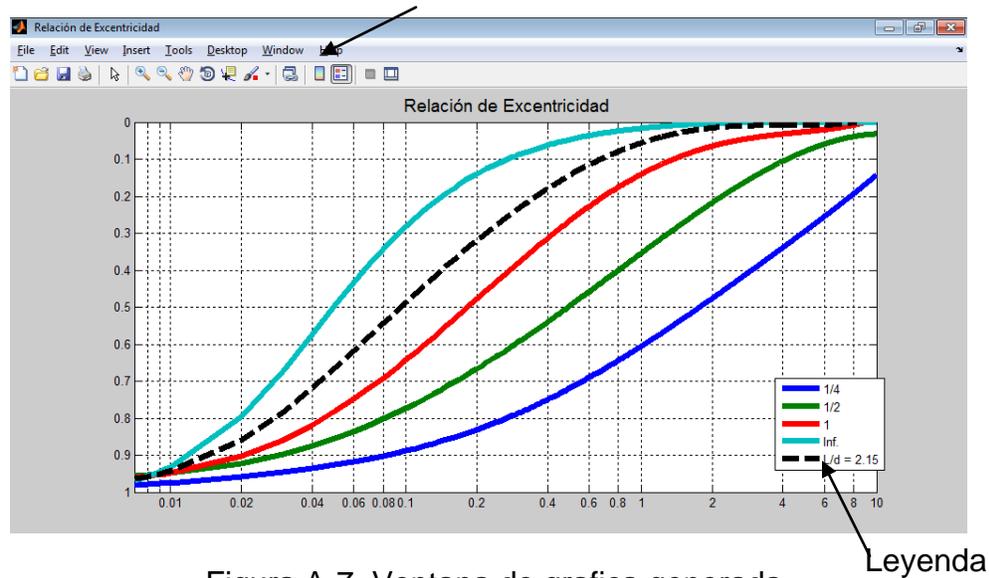


Figura A-7, muestra la grafica generada con la selección realizada, en dicha grafica se observan las curvas y la leyenda de cada una de las mismas, de igual manera, posee una barra de herramientas principal o un menú de inicio como se señala en la Figura A-8.

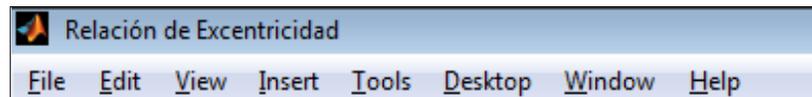


Figura A-8 Barra principal de herramientas en la ventana de grafica generada

Cada ventana de grafica generada posee, tal y como muestra la figura A-8, una barra principal de herramienta, la misma sirve para indicar las opciones principales necesarias para el funcionamiento de la parte grafica de RaiboCharts, en la misma se presentan las opciones estándares, como lo son archivo (file), edición (edit), ver (view), insertar (insert), herramientas (Tools), escritorio (desktop), ventana (Window) y ayuda (help), la cual se explica detalladamente en el punto siguiente.

Nota: debido a que la herramienta computacional RaiboCharts v1.0, esta basada en el programa Matlab, la misma posee las herramientas y los menús de dicho programa, en el presente manual, el autor hace referencia a las funciones principales para el uso de las graficas y su aplicación practica, por ende se deja al usuario con destreza en Matlab la posibilidad de expandir el uso de dicha herramienta al máximo posible, así mismo se encuentra disponible la opción de ayuda de dicho programa comercial.

Menú archivo (file) de la barra de herramienta principal: al pulsarlo aparecen opciones, como se muestra en la figura A-9



Figura A-9 Menú de archivo de la barra de herramienta principal (file)

Entre las opciones que muestra el menú de archivo, se encuentran: open, save, save as, print preview, y print (Ctrl+P).

Opción open: sirve para abrir una archivo previamente guardado, al pulsarlo aparece una ventana tal como lo muestra la figura A-10, donde el usuario solo debe seleccionar el archivo que desee abrir y pulsar el botón abrir, posteriormente, aparecerá en una nueva ventana la grafica solicitada.

Nota: para poder abrir desde este programa el usuario debe verificar que la extensión del archivo es *.fig*, caso contrario el archivo no se abrirá.

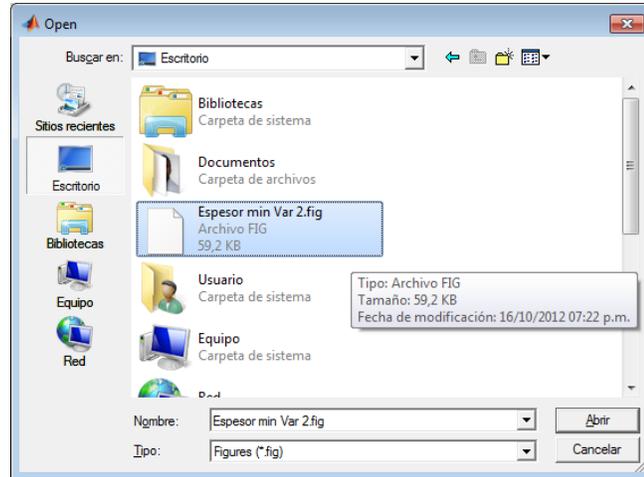


Figura A-10 Ventana de la opción abrir (open)

Opción close: sirve para cerrar la ventana en la cual se encuentre, el usuario solo debe pulsar con el ratón y la ventana se cerrará.

Opción save: sirve para guardar el archivo que se encuentra abierto en ese instante, si lo esta pulsando por primera vez, aparecerá una ventana como la figura mostrada abajo (Figura A-11), caso contrario el archivo se guardará en la ultima dirección seleccionada por el usuario.

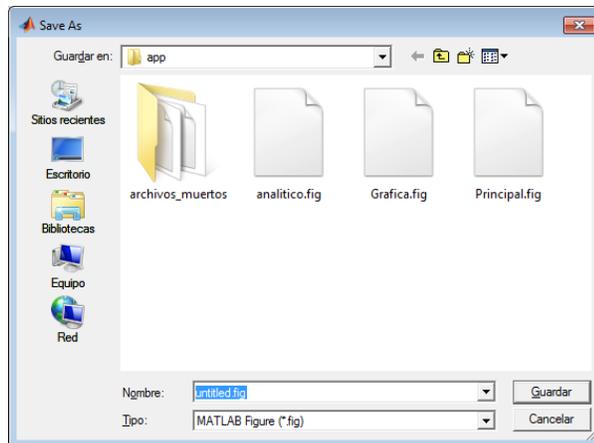


Figura A-10 Ventana de la opción guardar (save)

Opción save as: El usuario adicional a escoger donde guardar el archivo, también tiene la posibilidad de nombrar el archivo como lo desee para su posterior uso, colocando el nombre en la celda *nombre*., tal como lo muestra la Figura A-10, así mismo puede cambiar la extensión del archivo en una lista desplegable disponible en la celda *tipo*., ver Figura A-11, el archivo puede ser guardado, tipo PDF, tipo JPG, y otras opciones como se muestra, sin embargo si el usuario desea volver a utilizar el archivo en el programa RaiboCharts debe tener la extensión *.fig*.

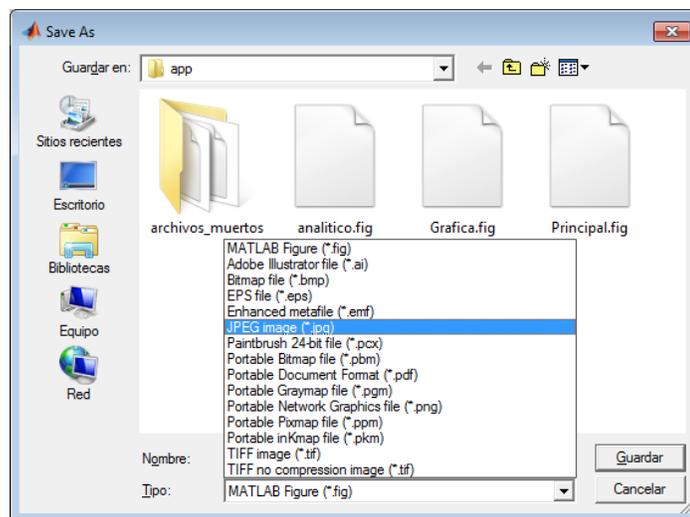


Figura A-11 Ventana de la opción guardar como (save as)

Opción print preview: sirve para generar una vista previa de la impresión a realizar; pulsando esta opción aparecerá una ventana como la mostrada en la Figura A-12, el usuario debe pulsar la opción *Landscape*, para que la grafica se imprima de manera horizontal, adicional pulsando la casilla de *fill page*, la grafica ocupará la mayor área posible dentro de la página de impresión. Posteriormente, con solo pulsar el botón imprimir se enviara el documento a la impresora predeterminada.

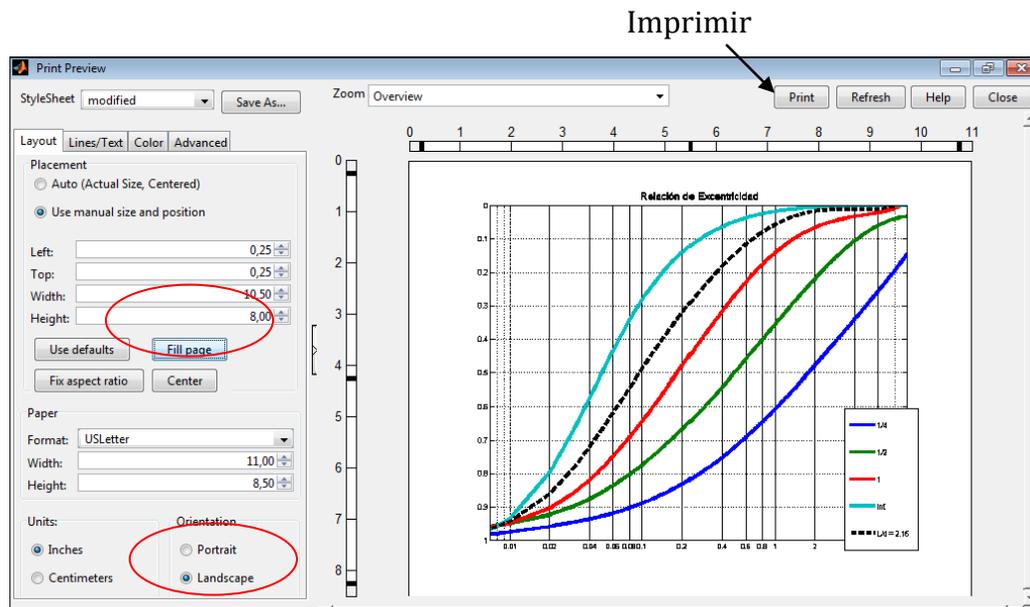


Figura A-12 Ventana de la opción vista previa de impresión (print preview)

Opción print: sirve para imprimir el archivo abierto, en el cual se podrá seleccionar la impresora a utilizar, las opciones de la misma, y el número de copias de la impresión, ver figura A-13.

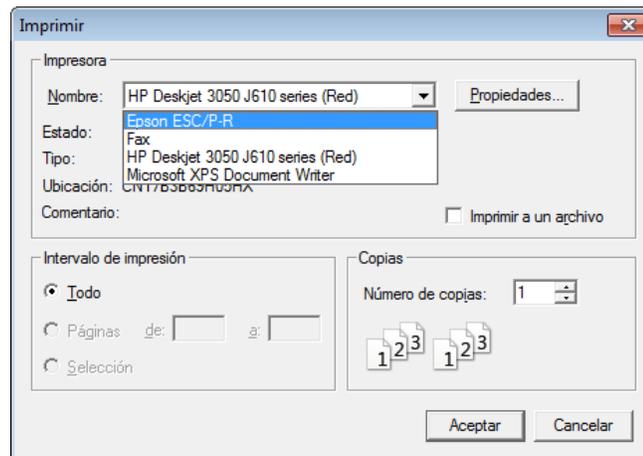


Figura A-13 Ventana de la opción de impresión (print)

Menú editar de la barra de herramienta principal: al pulsarlo aparecen opciones, como se muestra en la figura A-14.

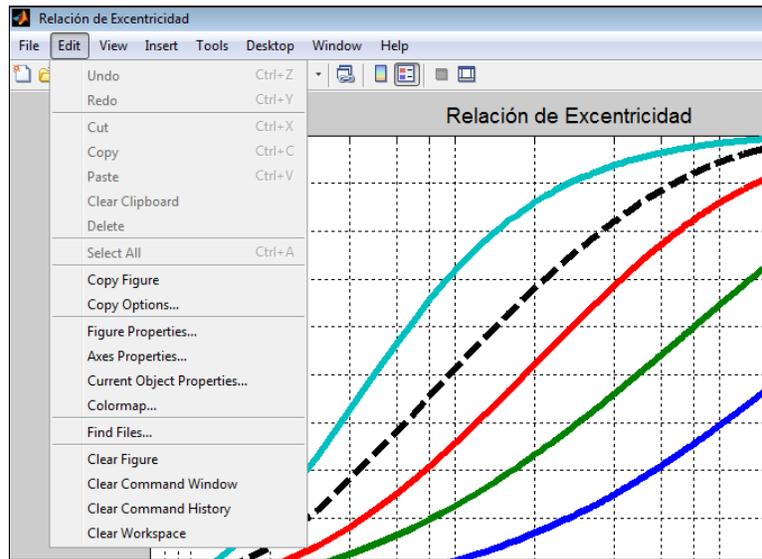


Figura A-14 Ventana del menú editar (edit)

Opción copy figure: sirve para copiar la figura del grafico generado, y usarlo en otra aplicación, solo se copiará el área de la grafica, tal como muestra la Figura A-15, copiada en una presentación de PowerPoint.

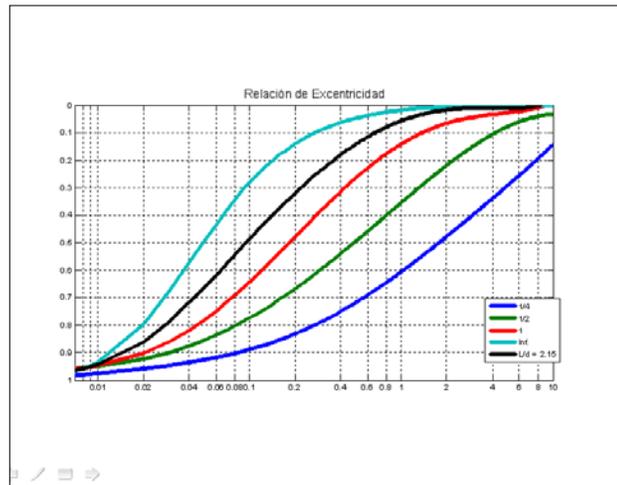


Figura A-15 Imagen copiada con la opción copy figure.

Opción axes properties: sirve cambiar, las propiedades de los ejes de las graficas, modificar escalas, tamaño de las letras, colores, y otras

propiedades, tal como se muestra en la figura A-16, se recomienda a los usuarios no realizar modificaciones en estos parámetros a fin de no alterar las graficas, generadas.

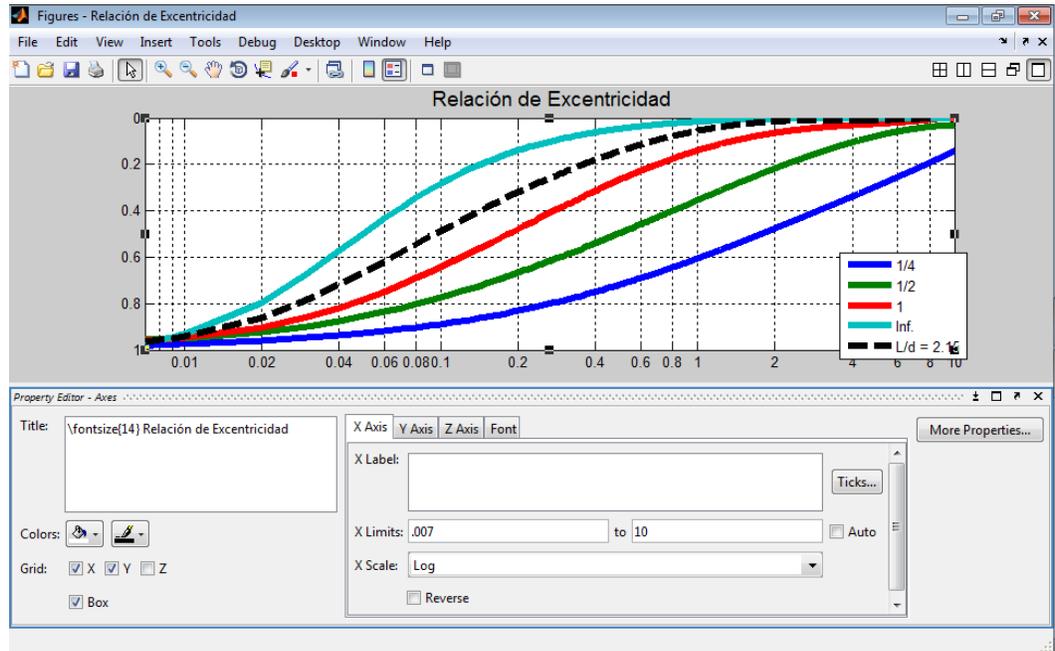


Figura A-16 Ventana de la opción propiedades de los ejes

Menú ver (view) de la barra de herramienta principal: al pulsarlo aparecen opciones, como se muestra en la figura A-17.

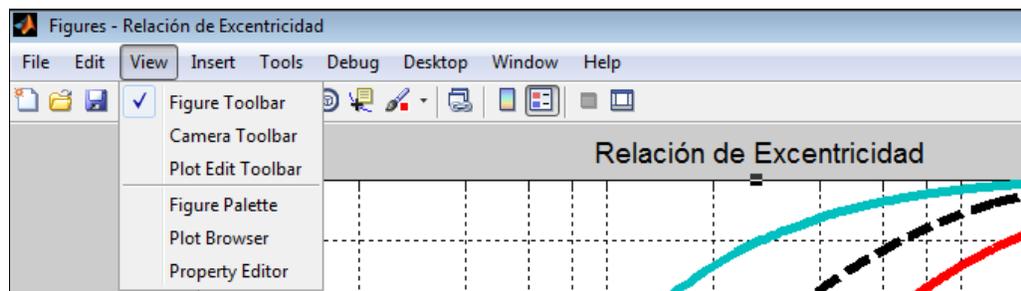


Figura A-17 Ventana de la opción propiedades de los ejes

80 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

Opción figure palette: sirve añadir líneas, flechas, cuadros de textos, y otras funciones de interés para el usuario, tal como se muestra en la figura A-18.

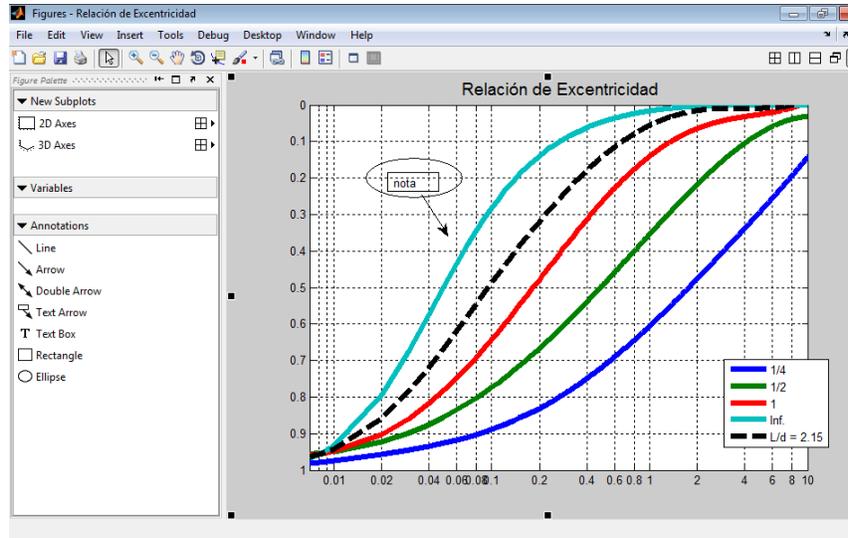


Figura A-18 Ventana de la opción propiedades de los ejes

Opción Plot browser: sirve para seleccionar, que curvas desea ocultar, de la grafica generada, ver Figura A-19.

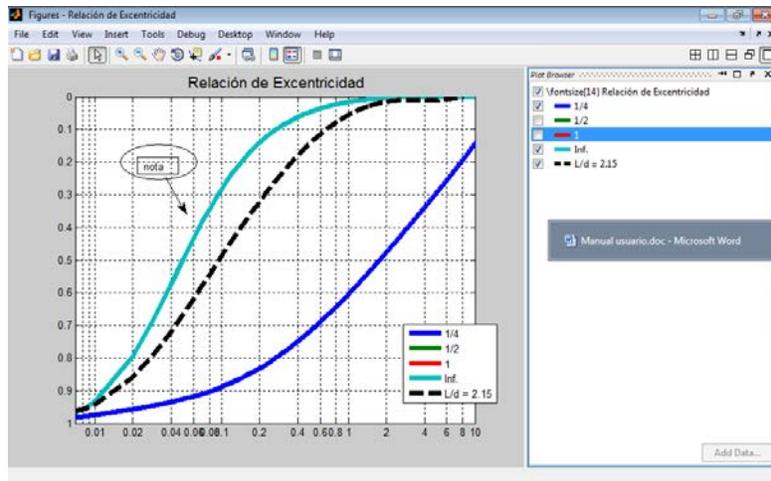


Figura A-19 Ventana de la opción propiedades de los ejes

Menú insertar (insert) de la barra de herramienta principal: al pulsarlo aparecen opciones, como se muestra en la figura A-20, el autor deja a disposición del usuario la exploración de estas herramientas, donde puede insertar líneas, flechas sencillas y de doble punta, rectángulos, elipses, cuadros de textos y otras opciones.

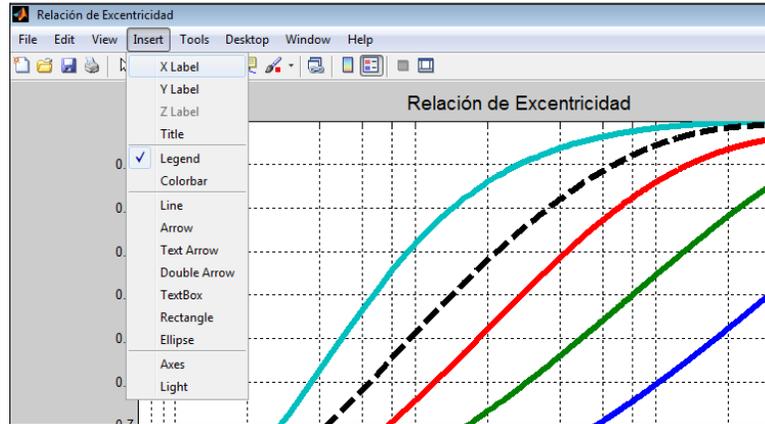


Figura A-20 Ventana del menú insertar

Menú herramientas (tool) de la barra de herramienta principal: al pulsarlo aparecen opciones, como se muestra en la figura A-21.

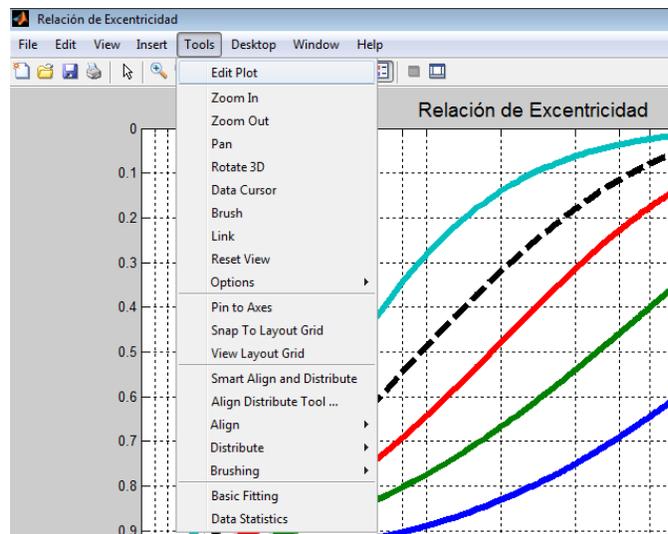


Figura A-21 Ventana del menú herramientas

Opción zoom in: sirve para acercar, la imagen según se seleccione con el puntero de mouse, el usuario debe recordar que si guarda la grafica, con la extensión .JPG, mientras se encuentre en este estado se guardará tal y como se muestra en pantalla. Ver Figura A-22.

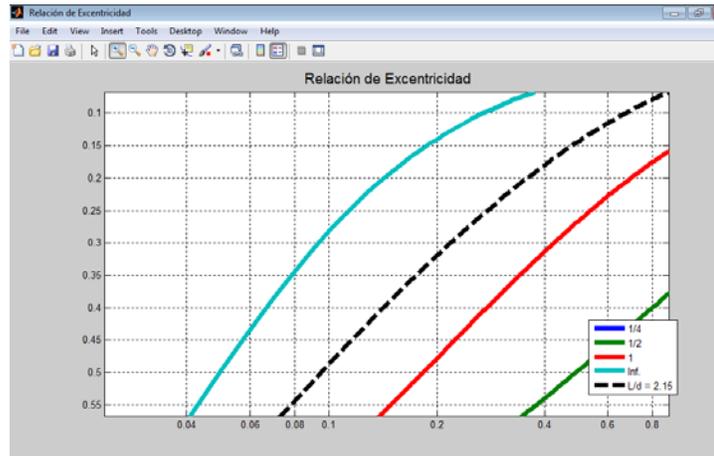


Figura A-22 Ventana de la opción zoom in

Opción zoom out: sirve para alejar, la imagen según se seleccione con el puntero de mouse, el usuario debe recordar que si guarda la grafica, con la extensión .JPG, mientras se encuentre en este estado se guardará tal y como se muestra en pantalla. Ver Figura A-23.

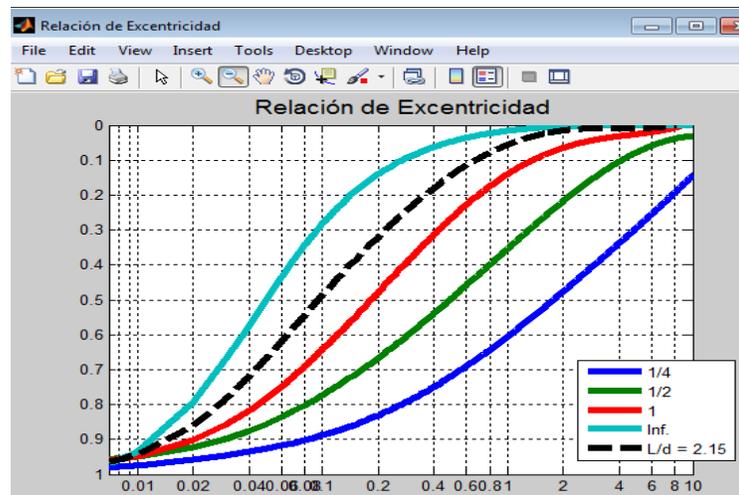


Figura A-23 Ventana de la opción zoom out

Opción zoom out: sirve para alejar, la imagen según se seleccione con el puntero de mouse, el usuario debe recordar que si guarda la grafica, con la extensión .JPG, mientras se encuentre en este estado se guardará tal y como se muestra en pantalla. Ver Figura A-24.

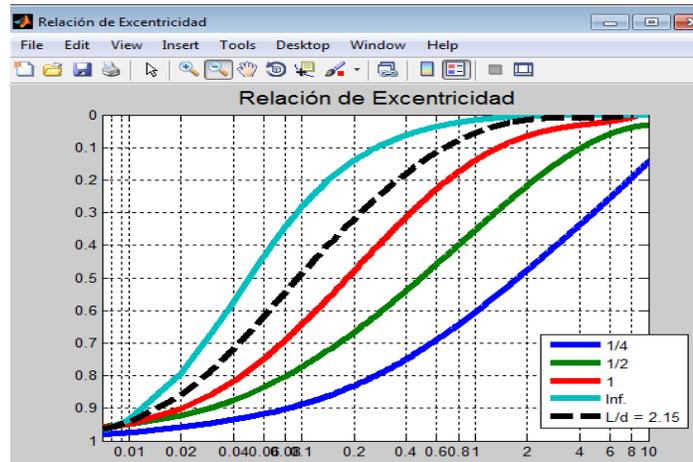


Figura A-24 Ventana de la opción zoom out

Opción brush: esta opción se usa para marcar un punto específico de la curva que desee resaltar, tal como se muestra en la grafica de la Figura A-25.

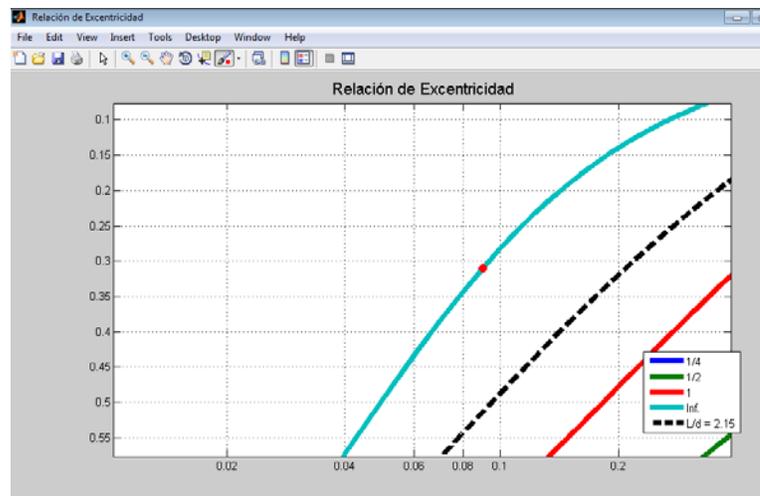


Figura A-25 Ventana de la opción brush

84 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

Opción data cursor: esta opción se usa para marcar un punto específico de la curva que desee resaltar y obtener la coordenada del mismo, tal como se muestra en la grafica de la Figura A-26.

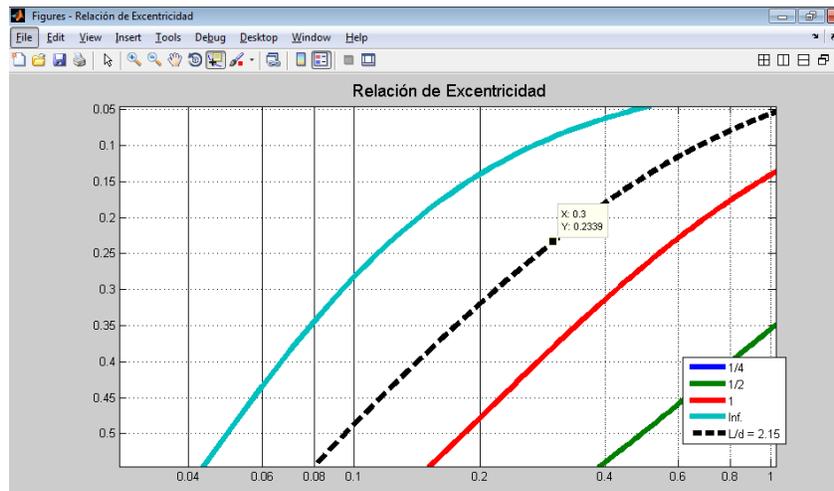


Figura A-26 Ventana de la opción data cursor

Opción data cursor: esta opción se usa para marcar un punto específico de la curva que desee resaltar y obtener la coordenada del mismo, tal como se muestra en la grafica de la Figura A-27.

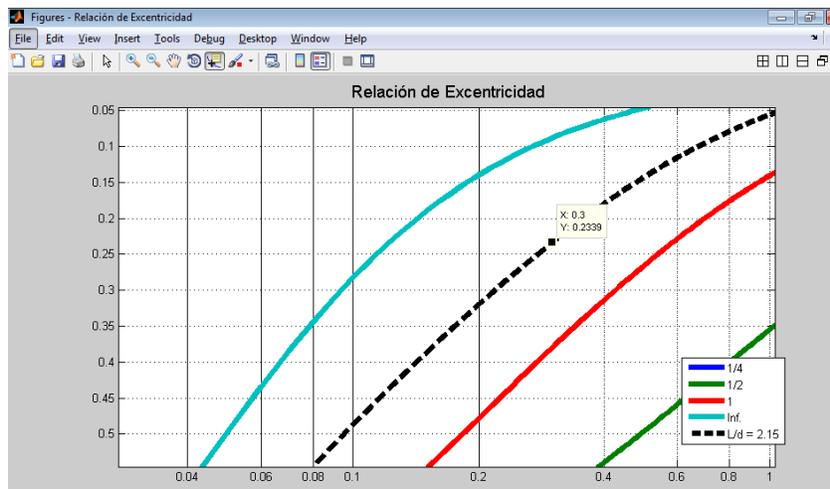


Figura A-27 Ventana de la opción data cursor

Menú Ventana (window) de la barra de herramienta principal: al pulsarlo aparecen opciones, como se muestra en la figura A-28, el usuario puede seleccionar desde este menú, si desea ir a otra de las ventanas abiertas por el programa o a la pantalla principal.

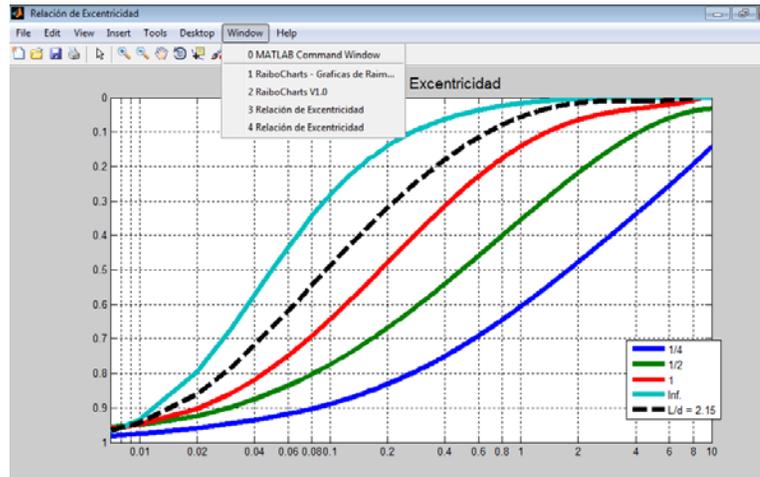


Figura A-28 Ventana del menú Ventana (Window)

Menú ayuda (help) de la barra de herramienta principal: al pulsarlo aparecen opciones, como se muestra en la figura A-29, el usuario debe tener en cuenta que estas ayudas pertenecen al programa Matlab ver R2011.

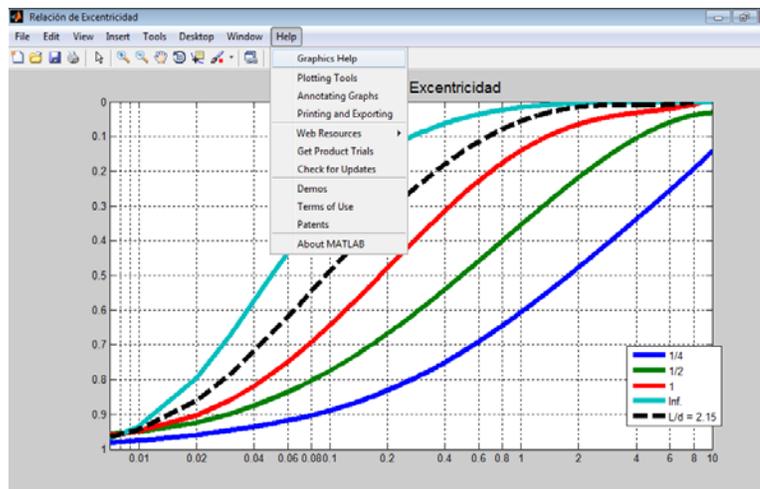


Figura A-29 Ventana del menú Ventana (Window)

Menú ayuda (help) de la barra de herramienta principal: al pulsarlo aparecen opciones, como se muestra en la figura A-29, el usuario debe tener en cuenta que estas ayudas pertenecen al programa Matlab ver R2011.

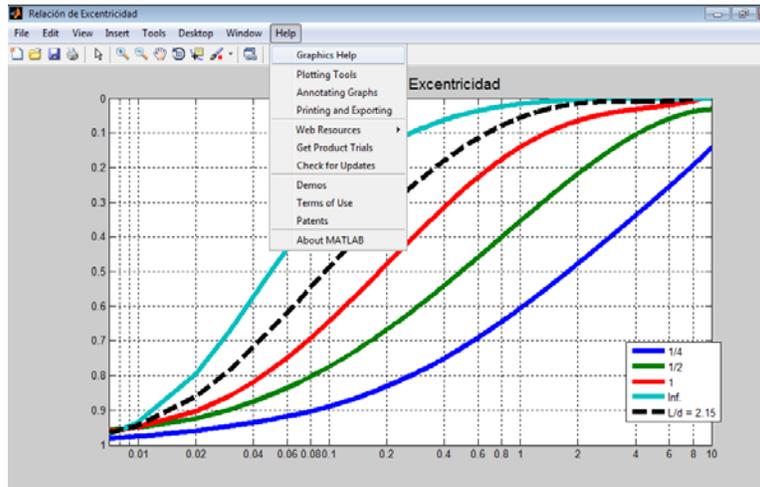


Figura A-29 Ventana del menú Ventana (Window)

Resolución de ejercicios mediante RaiboCharts.

RaiboCharts es un programa que tiene la posibilidad de resolver problemas básicos de diseño de cojinetes, tal y como se muestra a continuación.

El usuario tiene la posibilidad de resolver un ejercicio de diseño con RaiboCharts como soporte, para ello solo debe realizar los gráficos correspondiente a las relaciones l/d y S . posteriormente se debe continuar con los despejes de las variables para cada una de las variables tal como se señala a continuación.

Primero se selecciona la opción de Graficas de Raimondi y Boyd, como muestra la figura A-30, y se tilda la opción continuar.

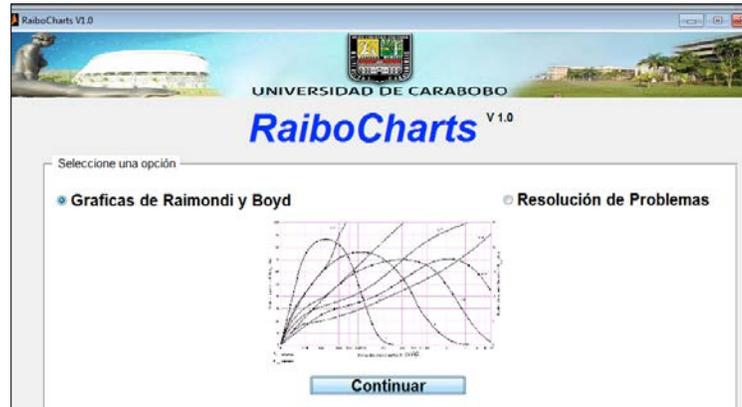


Figura A-30 Ventana del principal de RaiboCharts

A manera didáctica se realizará la resolución de un ejercicio con el soporte de la herramienta paso a paso.

Resolución de problemas utilizando como soporte la herramienta RaiboCharts:

Problema tipo 1.

Para un cojinete de muñón completo, se especifican las siguientes cantidades:

$$\mu = 4 \mu\text{reyn}$$

$$N = 30 \text{ rev/s}$$

$$W = 500\text{lb (carga de cojinete)}$$

$$r = 0.75 \text{ in}$$

$$c = 0.0015 \text{ in}$$

$$l = 1.50 \text{ in}$$

La carga unitaria es:

88 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

$$P = \frac{W}{2rl} = \frac{500}{2(0.75)(1.50)} = 222 \text{ psi}$$

El número característico es:

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \left(\frac{\mu N}{P}\right) = \left(\frac{0.75}{0.0015}\right)^2 \left[\frac{4(10)^{-6}(30)}{222}\right] = 0.135$$

Así mismo l/d es: $1.5/(2)(0.75) = 1$.

El usuario debe realizar estos cálculos de manera manual, y posteriormente con ayuda del programa, encontrar cada uno de los valores a utilizar de las graficas o curvas correspondientes.

Entrando en el programa RaiboCharts con $S = 0.135$ y $l/d = 1$, se selecciona el tipo de curva graficar, (ver figura A-31), en este caso es variable de espesor mínimo), después se tilda en el botón graficar y se genera la grafica de la figura a-32, de donde se tiene que: $h_o/c = 0,4185$ y $\epsilon = 0,5823$



Figura A-30 Ventana del principal de RaiboCharts

Con el uso de las herramientas anteriormente descritas, zoom in y data cursor, se tienen las curvas mostradas en la figura A-31.

Nota: el usuario debe tomar en cuenta que la herramienta data cursor solo se mueve en una escala de 0,1. Entonces el valor de S igual a 0,135, no lo puede señalar con dicha herramienta, el autor a manera demostrativa realiza el ejercicio tomando el mas cercano inferior, es decir $S = 0,3$.



Figura A-31 Ventana de la variable de espesor mínimo de película

Entonces:

$$h_o = 0,4185 (0.0015) = 0,00062775 \text{ in}$$

Realizando la grafica de posición de espesor mínimo (ver figura A-32) con $S = 0.135$ y $l/d = 1$ se tiene que: $\phi = 51,57^\circ$



Figura A-32 Ventana de la posición de espesor mínimo de película

Entonces:

$$\epsilon = e / c = 0,5823$$

$$e = 0,5823 (0.0015) = 0,00087345 \text{ in}$$

Realizando la grafica de coeficiente e fricción (ver figura A-33) con $S = 0.135$ y

$$l/d = 1 \text{ se tiene que: } \frac{r}{c} f = 3.183$$

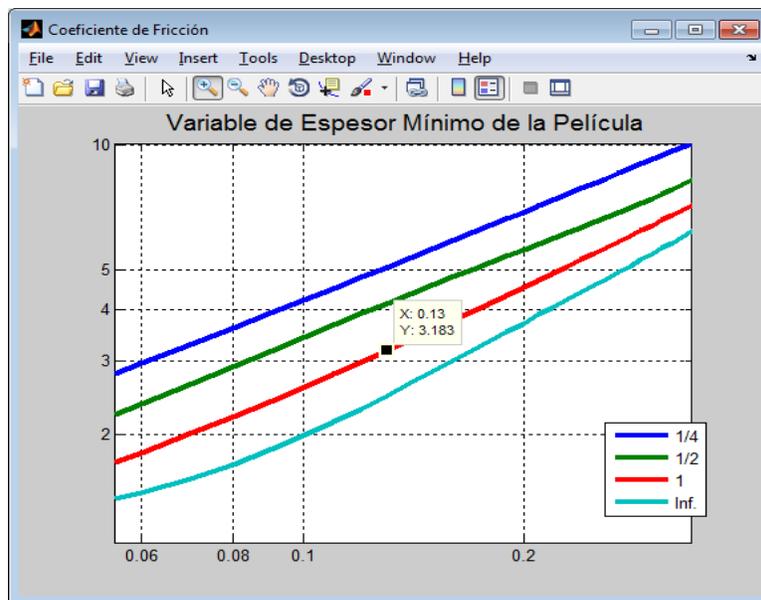


Figura A-33 Ventana de las curvas de variable de espesor mínimo de película

Entonces:

$$f = 0.007$$

$$T = fWr = 0.007(500)(0.75) = 2.625 \text{ lb.in}$$

$$H = \frac{TN}{1050} = \frac{2.62(30)}{1050} = 0.0748 \text{ hp}$$

Realizando la grafica de variable de flujo (ver figura A-34) con $S = 0.135$ y l/d

$$= 1 \text{ se tiene que: } \frac{Q}{rcNI} = 4.28$$

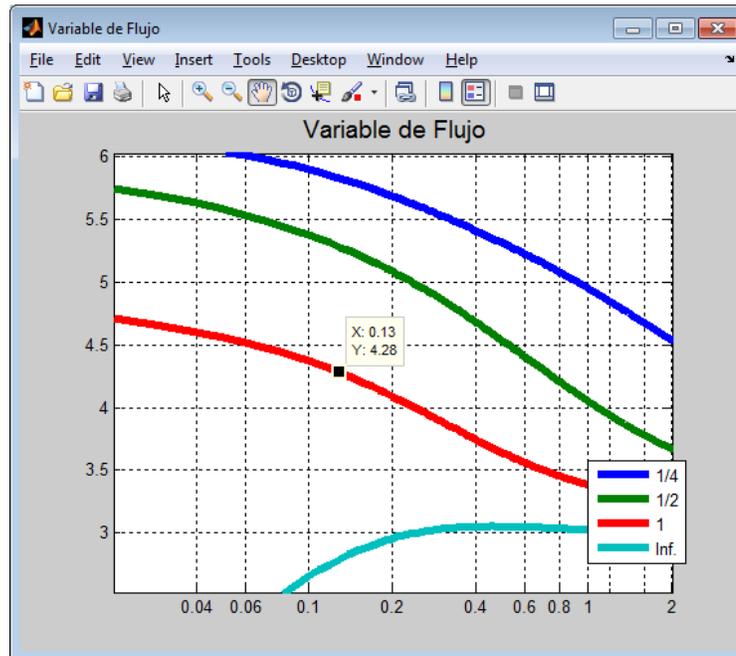


Figura A-34 Ventana de la curva de variable de flujo

Por consiguiente:

$$Q = 4.28rcNI = 4.28(0.75)(0.0015)(30)(1.5) = 0.216 \text{ in}^3 / \text{s}$$

Realizando la grafica de variable de flujo (ver figura A-35) con $S = 0.135$ y l/d

$$= 1 \text{ se tiene que: } \frac{Q_s}{Q} = 0.6702$$

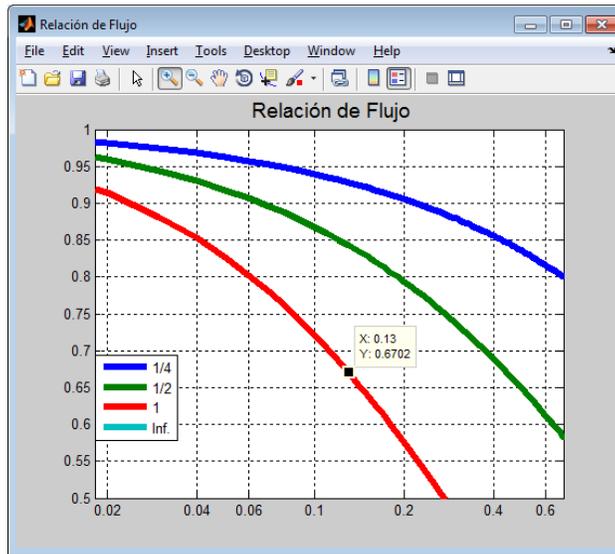


Figura A-35 Ventana de la relación de flujo

En consecuencia, la fuga lateral vale:

$$Q_s = 0.6702Q = 0.6702(0.216) = 0.1447632 \text{ in}^3 / \text{s}$$

Realizando la grafica de relación máxima pelicular (ver figura A-36)

Entrando a la Figura 2-22 con $S = 0.135$ y $l/d = 1$ se tiene que: $\frac{P}{P_{m\acute{a}x}} = 0.4218$

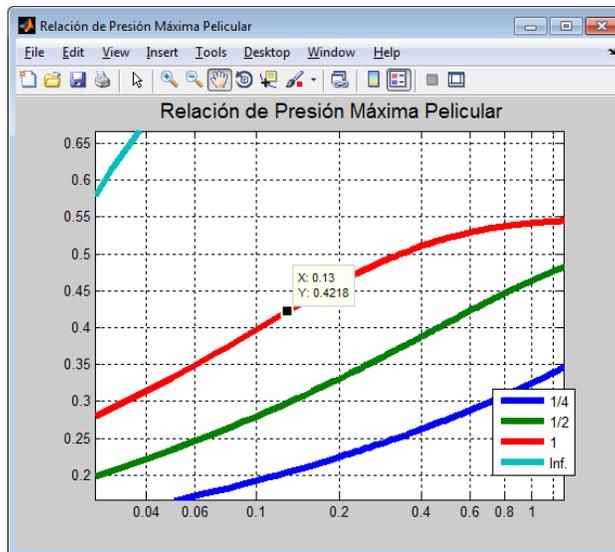


Figura A-36 Ventana de curva de Presión máxima pelicular

Entonces, ya que $P = 222$ psi, la presión máxima se determina como:

$$P_{\text{máx}} = P / 0.42 = 222 / 0.4218 = 529.0952 \text{ psi}$$

Realizando la grafica de Presión Máxima de la película (ver figura A-37) y

Realizando la grafica de Presion Maxima de la pelicula (ver figura A-38)

Entrando a las Figuras A-37 y A-38 con $S = 0.135$ y $l/d = 1$ se tiene que: $\phi_{\text{pmáx}} = 18.75^\circ$ y $\phi_{\text{po}} = 75,63^\circ$

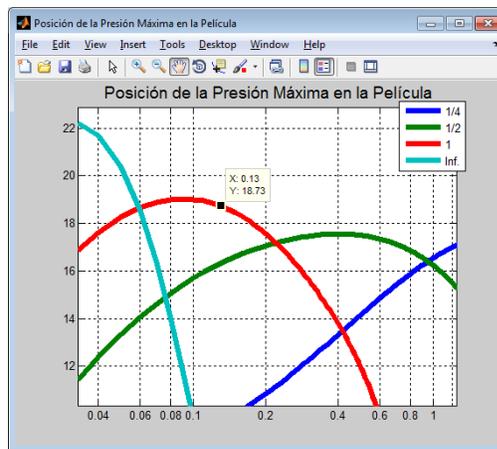


Figura A-37 Ventana de curva de Presión máxima pelicular

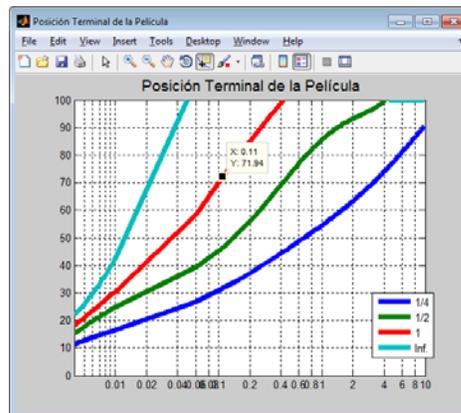


Figura A-38 Ventana de curva de Presión máxima pelicular.

Resolución de problemas utilizando la herramienta computacional

RaiboCharts:

A continuación se realizará la resolución de problemas con la opción de resolución de problemas del programa.

Problema tipo 1.

Para un cojinete de muñón completo, se especifican las siguientes cantidades:

$$\mu = 4 \mu\text{reyn}$$

$$N = 30 \text{ rev/s}$$

$$W = 500\text{lb (carga de cojinete)}$$

$$r = 0.75 \text{ in}$$

$$c = 0.0015 \text{ in}$$

$$l = 1.50 \text{ in}$$

Para utilizar la herramienta RaiboCharts se debe seleccionar la opción resolución de problemas, tal como se señala en la figura A-39.

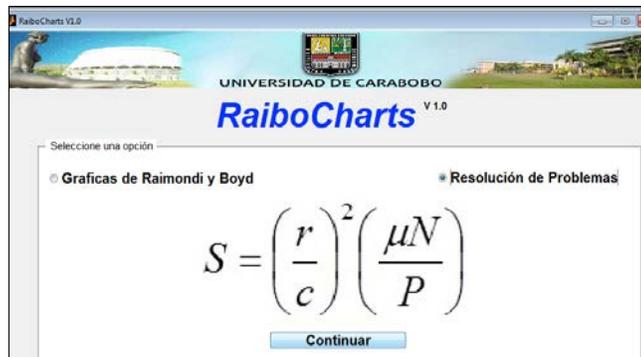


Figura A-39 Ventana principal de RaiboCharts

Después de pulsar el botón continuar, aparecerá un menú como el mostrado en la figura A-40.

Resolución de Problemas

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Resolución de Problema

Cálculo de Variables

L/D	ho	H	Omax
M	f	Q	Opo
N	T	Qs	Oho
W	e	Pmax	E
r	c	S	p
L	D		

Calcular Guardar Limpiar

Tipo de Gráfica

Pos. de la pre. máx. en la película. Rel. de pre. máxima película. Pos. del espesor película mínimo.

Posición terminal de la película. Variable de flujo. Relación de excentricidad.

Relación de flujo. Var. de coeficiente de fricción. Var. de espesor mínimo de película.

Generar todas las gráficas

Graficar

Legenda

Valores Calculados

Valores Ingresados

Figura A-40 Ventana de Resolución de problemas

El usuario deberá cargar todos los datos suministrados en las celdas señaladas para tal fin, una vez cargados todos los valores se debe pulsar el botón calcular, y aparecerá una pantalla como la figura A-41, donde se obtienen los valores de cada valor pendiente por ingresar, así mismo se señalará de color distinto la celda que fue utilizada como dato a los valores calculados, para seguimiento del usuario.

En caso de necesitar borrar todos los datos, puede el usuario pulsar el botón limpiar en las opciones presentadas.

El botón de guardar, tal como su nombre lo indica permite guardar el archivo para su posterior uso.

96 Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador

El usuario también tiene la posibilidad de generar las curvas de su agrado, con el menú de opciones mostrado en la parte inferior de la ventana, dichas graficas se generaran con el dato suministrado en dicho problema (l/d).

Variable	Valor
L/D	1
ho	6.3
H	0.065
Omax	17.6475
M	4
f	2.9152
Q	0.2167
Opo	75.7435
N	30
T	2.62
Qs	0.142
Oho	54.8867
W	500
e	0.00087
Pmax	529
E	0.5734
r	0.75
c	0.0015
S	0.135
P	222
L	1.50
D	1.50

Figura A-41 Ventana de resultados en la resolución de problemas

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidad
A	Área de superficie	in ²
c	Holgura radial	in
e	Excentricidad	in
f	Coefficiente de fricción	adimensional
H	Potencia perdida en el cojinete	hp
h _o	Espesor pelicular mínimo	in
l	Longitud del cojinete	in
N	Velocidad significativa	rev/s
P	Carga por unidad de área proyectada de cojinete	psi
P _{máx}	Presión máxima	psi
Q	Flujo de lubricante	in ³ /s
Q _s	Fuga lateral	in ³ /s
r	Radio del muñón	in

Viii *Construcción de los Diagramas de Raimondi y Boyd de diseño de cojinetes para distintas relaciones de L/D, utilizando como herramienta el computador*

S	Número de Sommerfeld o índice de cojinete	adimensional
T	Momento de torsión	lb.in
W	Carga del cojinete	lb
β	Amplitud angular	grados
ΔF	Elevación de temperatura	$^{\circ}F$
μ	Viscosidad absoluta	reyn
θ	Posición del espesor mínimo	grados
θ_{p0}	Posición terminal de la película	grados
$\theta_{p\text{máx}}$	Posición de la presión máxima	grados

ANEXO I

Sub-rutinas del programa

A continuación se muestran 2 subrutinas, del programa Raibocharts v 1.0.

```
function y1 = F_em_21(x)

a=-0.0056254734;
b=0.27604825;
c=0.43621494;
d=-0.49578859;
e=0.2296077;
f=-0.050491321;
g=0.0043073184;

y=0;

    if x<=0.005
        y1=0;
    else

        y1=a+((b*(x^0.5)) + (c*x) + (d*(x^1.5)) + (e*(x^2)) +
(f*(x^2.5)) + (g*(x^3)))

    end
```

```

function out = F_Todas(var, Cantidad)

y=0;
x1=0;

    for x=0.000:0.005:0.01

        y=y+1;
        y1=F_em_21(x);
        y2=F_em_22(x);
        y3=F_em_23(x);
        y4=F_em_24(x);

        y5(y) = (1/(var)^3)*((-1/8)*(1-(var))*(1-(2*var))*(1-
(4*var))*y4 + ((1/3)*(1-(2*var))*(1-(4*var))*y3) - ((1/4)*(1-var)*(1-
(4*var))*y2) + ((1/24)*(1-var)*(1-(2*var))*y1))

        ya(y)=F_em_21(x);
        yb(y)=F_em_22(x);
        yc(y)=F_em_23(x);
        yd(y)=F_em_24(x);

        x1(y)=x;

    end

    for x=0.01:0.01:10

        y=y+1;
        y1=F_em_21(x);
        y2=F_em_22(x);
        y3=F_em_23(x);
        y4=F_em_24(x);

        y5(y) = (1/(var)^3)*((-1/8)*(1-(var))*(1-(2*var))*(1-
(4*var))*y4 + ((1/3)*(1-(2*var))*(1-(4*var))*y3) - ((1/4)*(1-var)*(1-
(4*var))*y2) + ((1/24)*(1-var)*(1-(2*var))*y1))

        ya(y)=F_em_21(x);
        yb(y)=F_em_22(x);
        yc(y)=F_em_23(x);
        yd(y)=F_em_24(x);

        x1(y)=x;
    end
    if var >0
        formato3(x1,ya,yb,yc,yd,y5,Cantidad,var);
    else
        formato2(x1,ya,yb,yc,yd,Cantidad);
    end
end

```