



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE DESGASTE ABRASIVO EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS Y HELICOIDALES CON PERFIL EVOLVENTE, CON UNA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO (GUI) DE MATLAB

JOSÉ MIGUEL MENA CHAVARREA

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN DISEÑO MECÁNICO

Riobamba - Ecuador

Junio 2021

©2021, José Miguel Mena Chavarrea

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado “CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE DESGASTE ABRASIVO EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS Y HELICOIDALES CON PERFIL EVOLVENTE, CON UNA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO (GUI) DE MATLAB”, de responsabilidad del Sr José Miguel Mena Chavarrea ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes; Mag
PRESIDENTE

Ing. José Antonio Granizo; PhD
DIRECTOR

Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila; Mag
MIEMBRO

Ing. Mario Efraín Audelo Guevara; Mag
MIEMBRO

Riobamba, junio 2021

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, JOSÉ MIGUEL MENA CHAVARREA, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

JOSÉ MIGUEL MENA CHAVARREA

N.º Cédula: 0604053447

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, JOSÉ MIGUEL MENA CHAVARREA declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, 03 de junio de 2021

JOSÉ MIGUEL MENA CHAVARREA

N.º Cédula: 0604053447

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi familia, mis padres, hermana, esposa e hijo que han sido en todo este tiempo la principal fuente de fortaleza y superación; gracias a ellos con su aporte, encuentro la manera de salir adelante y siempre me apoyaron a lo largo de mi vida profesional y estudiantil.

A mis maestros que formaron parte de mi vida estudiantil, y que aportaron con sus conocimientos para poder cumplir una etapa de mi vida.

JOSÉ MIGUEL

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por darme la oportunidad de obtener la profesión de Cuarto Nivel; además, a mis docentes que con sus enseñanzas aportaron a que sea una persona que busque ayudar con ideas al convivir de la sociedad.

A mi familia por su apoyo, comprensión y ayuda en el transcurso del presente trabajo de titulación.

JOSÉ MIGUEL

CONTENIDO

	Páginas
RESUMEN.....	xv
SUMMARY	xvii
CAPÍTULO I.....	18
1. INTRODUCCIÓN.....	18
1.1. Tema de investigación	18
1.2. Planteamiento del problema	18
1.3. Formulación del problema.....	19
1.4. Sistematización del problema	19
1.5. Justificación de la investigación	19
1.6. Objetivos de la investigación.....	20
1.6.1. Objetivo General.....	20
1.6.2. Objetivos Específicos	20
1.7. Hipótesis	21
CAPÍTULO II	22
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1. Concepto de tribología.....	22
2.2. Contacto mecánico	22
2.3. Fricción.....	23
2.4. Desgaste.....	23
2.4.1. Clasificación del desgaste.....	23
2.5. Desgaste Abrasivo	26
2.5.1. Clasificación del desgaste abrasivo	27
2.5.2. Importancia del estudio del desgaste abrasivo.....	29
2.6. Ecuación de Kragelsky	30
2.7. Engranajes	31
2.7.1. Terminología de engranajes.....	31

2.7.2.	Línea de engrane.....	33
2.7.3.	Ley de engranajes	34
2.7.4.	Características de servicio	34
2.8.	La lubricación.....	34
2.8.1.	Lubricación ante la fricción.....	34
2.8.2.	Refrigeración	35
2.8.3.	Protección anticorrosiva	35
2.8.4.	Capa de lubricación	35
2.8.5.	Lubricación hidrodinámica.....	36
2.8.6.	Lubricación de capa límite.....	36
2.8.7.	Lubricación elastohidrodinámica.....	36
2.8.8.	Principales tipos de lubricación	37
2.9.	Tipos de fallo en engranajes	37
2.9.1.	Modos de fallo en engranajes	38
2.9.2.	Condiciones de fallo en engranajes por lubricación	39
2.9.3.	Tipos de engranajes	39
2.10.	Engranajes con perfil evolvente.....	43
2.10.1.	Engranajes rectos de perfil evolvente	43
2.11.	Engranajes helicoidales de perfil evolvente.....	45
2.12.	Materiales comunes para la fabricación de engranajes.....	46
2.12.1.	Engranajes de bronce.....	47
2.12.2.	Engranajes de hierro fundido.....	47
2.12.3.	Engranajes de acero	48
2.13.	Tratamientos térmicos a ruedas dentadas	48
2.13.1.	Carburación	49
2.13.2.	Nitruración.....	49
2.13.3.	Cianuración.....	50
2.14.	Matlab.....	51
2.14.1.	Introducción al software	51

2.14.2.	Introducción a la herramienta GUI.....	52
CAPÍTULO III.....		57
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	57
3.1.	Modalidad de la Investigación.....	57
3.2.	Técnicas de Investigación.....	57
3.3.	Diseño del proyecto	58
3.4.	Presupuesto.....	58
CAPÍTULO IV.....		59
4.	RESULTADOS	59
4.1.	Ecuación de Archard	59
4.2.	Ecuación de Kragelsky	63
4.2.1.	Parámetros que intervienen en la Ecuación	63
4.3.	Diseño de la herramienta gráfica de usuario Matlab	65
4.3.1.	Declaración de variables.....	67
4.3.2.	Propuesta final interfaz gráfica.....	67
CAPÍTULO V.....		73
5.	PROPUESTA	73
5.1.	Comparación de los modelos matemáticos.....	73
5.2.	Resultados y discusión.....	77
5.3.	Comprobación de la Hipótesis.....	78
5.3.1.	Evaluación del modelo matemático de Kraglesky con un caso investigativo.	79
CONCLUSIONES		84
RECOMENDACIONES		85
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2. Tipos de lubricación	37
Tabla 2-2. Causas de fallo en engranajes	38
Tabla 3-3. Presupuesto	58
Tabla 4-4. Valores referenciales de Constantes de desgaste.	62
Tabla 5-4. Tamaño de los tipos de partículas abrasivas	64
Tabla 6-5. Velocidad de desgaste con número de dientes del engranaje 2 variable, ejemplo 1..	74
Tabla 7-5. Velocidad de desgaste con dureza del diente del engranaje 2 variable, ejemplo 2....	75
Tabla 8-5. Tabla de datos de la medición de rotación.....	80
Tabla 9-5. Tabla de datos de la medición de rotación.....	81
Tabla 10-5. Tabla de cálculo del error medio cuadrático.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Área de contacto real vs aparente.....	22
Figura 2-2. Esquema desgaste adhesivo.....	24
Figura 3-2. Desgaste por fatiga en engranajes.....	24
Figura 4-2. Elemento de máquina atacado por el desgaste corrosivo.....	25
Figura 5-2. Mecanismos de desgaste por erosión.....	25
Figura 6-2. Mecanismo de desgaste por abrasión.....	26
Figura 7-2. Tipos de desgaste abrasivo.....	27
Figura 8-2. Mecanismos de abrasión.....	28
Figura 9-2. Línea de engrane.....	33
Figura 10-2. Mecanismos de abrasión.....	33
Figura 11-2. Capa de lubricación.....	35
Figura 12-2. Modos de falla.....	38
Figura 13-2. Engranajes de dientes rectos de eje paralelo.....	40
Figura 14-2. Engranaje helicoidal de ejes paralelos.....	40
Figura 15-2. Engranaje doble helicoidal.....	41
Figura 16-2. Engranajes helicoidales cruzados.....	41
Figura 17-2. Engranaje cónico de dientes rectos.....	42
Figura 18-2. Engranaje cónico helicoidal.....	42
Figura 19-2. Engranaje hipoides.....	42
Figura 20-2. Perfil evolvente de un engrane.....	43
Figura 21-2. Circunferencias constitutivas de un engranaje recto.....	44
Figura 22-2. Terminología engrane recto.....	44
Figura 23-2. Vista isométrica de un engranaje helicoidal.....	45
Figura 24-2. Terminología engranajes helicoidales.....	46
Figura 25-2. Engranaje de bronce de un distribuidor.....	47
Figura 26-2. Engranaje de hierro fundido en la industria.....	48
Figura 27-2. Engranaje de acero.....	48
Figura 28-2. Esquema tratamiento de carburización.....	49
Figura 29-2. Esquema de un horno para nitrurado de aceros.....	50
Figura 30-2. Flama de cianuración.....	50
Figura 31-2. Temple por inducción en un engranaje recto.....	51
Figura 32-2. Ventana de inicio GUIDE.....	53
Figura 33-2. Ventana de trabajo GUIDE.....	54

Figura 34-2. Interfaz gráfica APP Designer.....	54
Figura 35-2. Librería de componentes APP Designer.....	55
Figura 36-2. Opciones de desarrollador APP Designer	55
Figura 37-2. Inspector de propiedades APP Designer.	56
Figura 38-3. Diagrama de proceso del proyecto	58
Figura 39-4. Rango de constantes de desgaste.....	62
Figura 40-4. Versión 1 App cálculo de la velocidad de desgaste.....	65
Figura 41-4. Versión 2 App cálculo de la velocidad de desgaste.....	66
Figura 42-4. Propuesta final de herramienta gráfica para el cálculo de velocidad de desgaste ..	68
Figura 43-4. Caracterización del sistema de análisis.	68
Figura 44-4. Caracterización de los engranajes.	69
Figura 45-4. Tipo de modelo matemático	69
Figura 46-4. Caracterización de la partícula abrasiva.	70
Figura 47-4. Tipos de partícula abrasiva que permite la herramienta.	70
Figura 48-4. Cálculo y presentación de resultados.	70
Figura 49-4. Botones complementarios	71
Figura 50-4. Desplegable Manual versión beta.....	71
Figura 51-4. Tabla de conversión de durezas.....	72
Figura 52-5. Velocidad de desgaste engranaje recto 1 vs número de dientes	74
Figura 53-5. Velocidad de desgaste en engranaje recto 2 vs número de dientes	74
Figura 54-5. Velocidad de desgaste en engranaje helicoidal 1 vs número de dientes.....	75
Figura 55-5. Velocidad de desgaste en engranaje helicoidal 2 vs número de dientes.....	75
Figura 56-5. Velocidad de desgaste en engranaje recto 1 vs Dureza	76
Figura 57-5. Velocidad de desgaste en engranaje recto 2 vs Dureza	76
Figura 58-5. Velocidad de desgaste en engranaje helicoidal 1 vs Dureza	76
Figura 59-5. Velocidad de desgaste en engranaje helicoidal 2 vs Dureza	77
Figura 60-5. Resultados de la profundidad de desgaste: experimento y modelo.	80
Figura 61-5. Resultados de la comparación de datos entre paper y datos calculados	82

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-2. Pérdida de volumen por abrasión HOLM.	30
Ecuación 2-2. Archard y Hirst desgaste abrasivo.	30
Ecuación 3-2. Velocidad de desgaste abrasivo Kraglesky.	31
Ecuación 4-4. Modelo inicial de desgaste (Archard)	59
Ecuación 5-4. Fuerza en un engranaje, en función de la potencia.	60
Ecuación 6-4. Diámetro exterior del engranaje.	60
Ecuación 7-4. Fuerza normal en un engranaje helicoidal.	60
Ecuación 8-4. Longitud de contacto.	60
Ecuación 9-4. Diámetro de paso	61
Ecuación 10-4. Ecuación de Archard Velocidad De Desgaste Engranaje Recto	61
Ecuación 11-4. Ecuación de Archard Velocidad de Desgaste Engranaje Helicoidal.	61
Ecuación 12-4. Velocidad de desgaste abrasivo Kraglesky.	63
Ecuación 13-4. Propiedades de la partícula abrasiva Kragelsky.	63
Ecuación 14-4. Parámetro propiedades mecánicas del material. Kragelsky	64
Ecuación 15-4. Ecuación de Kraglesky Velocidad de Desgaste Engranaje Recto.	65
Ecuación 16-4. Ecuación de Kraglesky velocidad de desgaste engranaje helicoidal.	65
Ecuación 17-5. Ecuación del error medio cuadrático	82

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Código de Matlab	91
Anexo B. Manual del Usuario.....	99
Anexo C. Valores de tamizaje.....	103
Anexo D. Valores de distribución de Chi Cuadrado.....	104

RESUMEN

La presente investigación se origina bajo el objetivo de diseñar un software con Matlab mismo que permita calcular la velocidad de desgaste abrasivo de engranajes de perfil evolvente rectos y helicoidales. Para ello, se expone el entorno teórico que compone el estudio basado en los principales componentes como: engranajes, lubricación, el acero, los tratamientos térmicos a ruedas dentadas y la programación realizada en el software Matlab. Posteriormente se establecieron las fórmulas del cálculo de desgaste que fueron adaptadas a las circunstancias del problema y en base a esta información formular un software capaz de calcular la velocidad de desgaste abrasivo de ruedas dentadas mediante una herramienta gráfica de usuario de Matlab. Lográndose establecer las variables y construir el interfaz, seleccionando dos modelos matemáticos de Archard y Kraglesky, con los que se identificó correctamente las variables necesarias y la utilidad de cada uno de estos para el cálculo de la velocidad de desgaste por abrasión, además se cumplió con los requisitos necesarios para calcular la velocidad de desgaste abrasivo en ruedas dentadas, dando resultados cuantitativos que a través del software pueden ser tabulados, y graficados en Excel. Así se logra cumplir con los objetivos y dar respuesta a la hipótesis, generando conclusiones del estudio para la comprobación de los datos experimentales de un paper de investigación con los datos calculados en el software para un mejor uso del programa y para la determinación efectiva de las variables para los cálculos necesarios.

PALABRAS CLAVES: <VELOCIDAD DE DESGASTE>, <ENGRANAJES>, < MATLAB
(SOFTWARE)>, <ECUACIÓN DE ARCHARD>, <ECUACIÓN DE KRAGLESKY>.



0060-DBRAI-UPT-IPEC-2021

SUMMARY

The present research originates from the objective of designing a software with Matlab itself that allows to calculate the abrasive wear rate of spur and helical spur gears. For this, the theoretical environment that makes up the study based on the main components such as: gears, lubrication, steel, heat treatments to sprockets and the programming carried out in the Matlab software is exposed. Subsequently, the wear calculation formulas were established that were adapted to the circumstances of the problem and based on this information formulated a software capable of calculating the abrasive wear rate of sprockets using a Matlab graphical user tool. Being able to establish the variables and build the interface, selecting two mathematical models of Archard and Kraglesky, with which the necessary variables and the usefulness of each of these were correctly identified for the calculation of the speed of wear by abrasion, in addition, the the necessary requirements to calculate the speed of abrasive wear on sprockets, giving quantitative results that through the software can be tabulated, and plotted in Excel. Thus, it is possible to meet the objectives and respond to the hypothesis, generating study conclusions for the verification of the experimental data of a research paper with the data calculated in the software for a better use of the program and for the effective determination of the variables for necessary calculations.

KEY WORDS: <WEAR SPEED>, <GEARS>, <MATLAB SOFTWARE>, <ARCHARD EQUATION>, <KRAGLESKY EQUATION>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo presenta de forma clara el problema existente, el planteamiento del mismo, formular y justificar la investigación necesaria para solventar el problema, así como, declarar el objetivo general, la hipótesis y los objetivos específicos de la investigación.

1.1. Tema de investigación

El tema por desarrollarse en el presente proyecto de tesis es “CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE DESGASTE ABRASIVO EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS Y HELICOIDALES CON PERFIL EVOLVENTE, CON UNA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO (GUI) DE MATLAB”

1.2. Planteamiento del problema

En las últimas décadas, la importancia del estudio del proceso de desgaste de los engranajes va en aumento por ser los elementos de transmisión mecánica de mayor utilización en los diversos campos y condiciones de trabajo; desde engranajes diminutos utilizados en relojes hasta ser una parte que conforma toda una máquina independientemente de su dimensionado. Las generalidades no estudiadas sobre el diseño de engranajes han generado consecuencias negativas en la funcionalidad y ha generado fallas que son catastróficas y que han producido paras imprevistas de procesos mecánicos; por lo cual entender las causas de los mismos se vuelve fundamental.

En la industria el desgaste es uno de los problemas frecuentes que se producen en los sistemas que contienen engranajes, sin tomar en cuenta el trabajo que se encuentren realizando; los abrasivos son elementos que se encuentran en el medio ambiente y son característicos en elementos de maquinaria pesada, tales como equipo caminero, maquinaria agrícola, maquinaria de la construcción, maquinaria de la industria minera, etc. Siendo las partículas abrasivas un factor determinante para que la vida útil del engranaje se reduzca de forma significativa.

Se indica que el desgaste abrasivo de los pares tribológicos de la maquinaria pesada depende del grado de trituración o tamaño de las partículas abrasivas, la dureza de las mismas, del material del engrane base, el régimen de lubricación y las condiciones geométricas que determinen la naturaleza del contacto tribológico, así como el tiempo y velocidad de uso de la maquinaria pesada. El artículo de Martínez & Arzola (2014) presenta que “Los aspectos más importantes a

tener en cuenta en el diseño de los perfiles de los dientes de engranajes, son relacionadas con la capacidad de carga, diseño de perfil de los dientes, error de transmisión, ángulo de presión, el desgaste y el análisis de fallos.”

El no aporte y revisión de los criterios de análisis para los diseñadores y encargados de mantenimiento de maquinaria cuyo motor principal de diseño sean engranajes rectos o helicoidales de perfil evolvente que se encuentre en presencia constante de elementos abrasivos; ha generado que sufran daños en los mecanismos, para innecesarias hasta la no implementación de procesos de investigación de laboratorio que son extremadamente tardados y costosos.

1.3. Formulación del problema

¿Es factible mejorar el tiempo de cálculo de la velocidad del desgaste abrasivo en engranajes de dientes rectos y helicoidales a partir de las propiedades del material abrasivo y del material en contacto para los engranajes con perfil evolvente?

1.4. Sistematización del problema

- ¿Cuáles son los parámetros involucrados en el desgaste abrasivo de engranajes rectos y helicoidales con perfil evolvente?
- ¿Cuáles son las ecuaciones necesarias para calcular la velocidad de desgaste por abrasión en los engranajes propuestos?
- ¿Cómo debe plantearse la resolución de dichas ecuaciones para que el resultado arrojado sea útil para el usuario?
- ¿De qué manera se tiene que implementar una herramienta gráfica de usuario con el software Matlab para satisfacer las demandas planteadas?
- ¿Cuáles son las variables indispensables que permitan hacer el proceso de cálculo de desgaste más sencillo al utilizar la herramienta gráfica de usuario planteada?

1.5. Justificación de la investigación

La sustitución de ruedas dentadas en 90% se debe a la pérdida de la eficiencia de las mismas, producto del desgaste de los dientes, para combatir este fenómeno por lo regular se utilizan los siguientes mecanismos:

- Optimización de los parámetros geométricos a partir del diseño.
- Mejora de la calidad de la superficie de los dientes y el engrane de sus partes.
- Selección adecuada del material y los parámetros de tratamiento térmico.
- Selección adecuada del lubricante y optimización del proceso de lubricación.

Cuando surge movimiento de las ruedas dentadas el punto de contacto, el perfil del diente se desplaza a lo largo de la línea de engranaje, trayendo como consecuencia una variación puntual de la velocidad de deslizamiento desde el valor máximo de la cabeza y pie del diente, pasando por un valor de la velocidad de deslizamiento igual a 0 en el polo del engranaje; es decir, en el punto en el que se produce el rodamiento puro.

De aquí, se deduce que en la zona del polo de engranaje existirá la mayor posibilidad de formación de una película hidrodinámica, en el caso que el proceso tribológico sea con presencia de lubricante, entonces en esta zona ocurrirá el menor desgaste en las transmisiones dentadas.

En el presente trabajo se propone la utilización de una interfaz gráfica de usuario con la finalidad de realizar un cálculo teórico de la velocidad de desgaste en engranajes que presentan dientes con perfil evolvente para proveer al diseñador de los sistemas herramientas que permitan predecir el comportamiento del sistema tribológico, evaluar la validez de sus teorías de diseño y generar planes de mantenimiento oportunos.

1.6. Objetivos de la investigación

1.6.1. Objetivo General

Diseñar un software mediante la herramienta gráfica de usuario de Matlab que permita calcular la velocidad de desgaste abrasivo de engranajes de perfil evolvente rectos y helicoidales.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Establecer los modelos matemáticos y las variables necesarias en cada caso que permitan el cálculo de la velocidad de desgaste por abrasión en engranajes.
- Construir una herramienta gráfica de usuario con Matlab capaz que resuelva y presente la velocidad de desgaste por abrasión de un engranaje en base a los modelos matemáticos encontrados.

- Hacer la herramienta de software lo más amigable posible para la utilización del usuario.
- Comparar la diferencia y tendencia del comportamiento de la velocidad de desgaste, variando los parámetros involucrados en el proceso, con los dos modelos matemáticos planteados.

1.7. Hipótesis

El desarrollo de una interfaz gráfica de usuario (GUI) si acelerará el cálculo de la velocidad de desgaste abrasivo en engranajes de dientes rectos y helicoidales con perfil evolvente.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Concepto de tribología

Según Marinescu & Rowe (2012) el término tribología proviene de los vocablos griegos “tribos” con significado fricción y “logos” estudio. Por lo cual este término se utiliza para denominar a la ciencia que estudia las superficies con movimientos relativos entre sí.

Es por ello que terminologías y fenómenos como la fricción, el desgaste de las diferentes superficies y la presencia o ausencia de lubricante entre las partes en contacto es algo indispensable para lograr obtener máquinas y procesos con menor pérdida de energía, evitar tiempos de para excesivos que limiten la eficiencia de la actividad productiva, mejorar los tiempos de vida de máquinas, materiales y superficie y sobre todo para tener una herramienta bastante confiable para generar buenas prácticas de reparación y mantenimiento.

2.2. Contacto mecánico

La expresión contacto mecánico hace referencia a las características geométricas bajo las cuales dos o más superficies en contacto deslizan una con respecto a la otra generándose de esta manera dos áreas de contacto. El área aparente, correspondiente a toda la superficie de las piezas en contacto, y el área real que tiene las consideraciones que las superficies presentan rugosidades que provoca que el contacto ocurra únicamente en algunos puntos donde coinciden las crestas respectivas de cada una de las superficies involucradas en el movimiento. Estas consideraciones provocan que el área real de contacto es mucho menor que el área aparente, y por ende los esfuerzos involucrados en el proceso son mucho mayores como consecuencia de un incremento de la fuerza normal como lo afirma Stachowiak (2005).

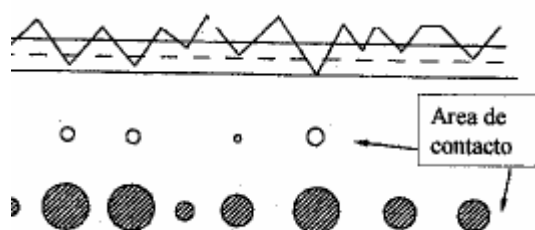


Figura 1-2. Área de contacto real vs aparente.

Fuente: Stachowiak (2005).

2.3. Fricción

El término fricción comúnmente se define como la fuerza que se resiste al movimiento producto de la interacción entre dos cuerpos, es tangencial a la superficie de contacto y contraria al sentido del movimiento. Stachowiak (2005) afirma que la fricción también se puede definir al trabajo de la fuerza de fricción como la diferencia entre la energía interna y la energía disipada.

De este modo es importante rescatar las tres principales leyes que gobiernan el fenómeno de la fricción.

- 1ra Ley. La fricción es independiente del área aparente de contacto.
- 2da Ley. La fuerza de fricción, es proporcional a la carga normal aplicada.
- 3ra Ley. La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.

Un parámetro importante para este caso es medir el coeficiente de fricción de un fenómeno, como lo indica Stachowiak (2005) para ello existen varios métodos, entre los más aceptados es la experimentación, que ha arrojado como resultado pruebas Estándar como ASTM, ANSI entre otras que permiten evaluar la calidad de los resultados obtenidos.

2.4. Desgaste

De acuerdo a la Norma ASTM el desgaste se define como el daño a una superficie sólida (que generalmente implica una pérdida progresiva de material), causado por el movimiento relativo entre esa superficie y una sustancia o sustancias en contacto.

2.4.1. Clasificación del desgaste

- a. Desgaste adhesivo:** Ocurre cuando dos superficies se deslizan una contra otra bajo la acción de una fuerza. Se caracteriza porque el deslizamiento causa altos esfuerzos localizados en los puntos de contacto de las superficies, ocasionando que el material más débil se fracture y las partículas desgarradas se transfieran al otro material involucrado en el par de contacto.

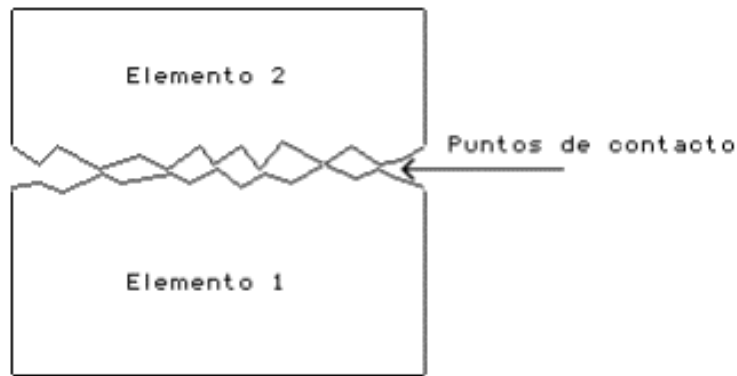


Figura 2-2. Esquema desgaste adhesivo

Fuente: Díaz delCastillo (2017)

Este proceso de desgaste se caracteriza por las fuertes uniones entre las partículas desprendidas y las superficies de contacto denominadas soldaduras en frío.

- b. Desgaste por fatiga:** Como su nombre lo indica es producto de las repetidas cargas de deslizamiento, impacto, y rotación, lo cual genera esfuerzos cíclicos en los elementos involucrados en el contacto. Producto de esta acción se generan esfuerzos en la superficie que terminan en un desprendimiento muy característico en el material base (Suarez, 2015).

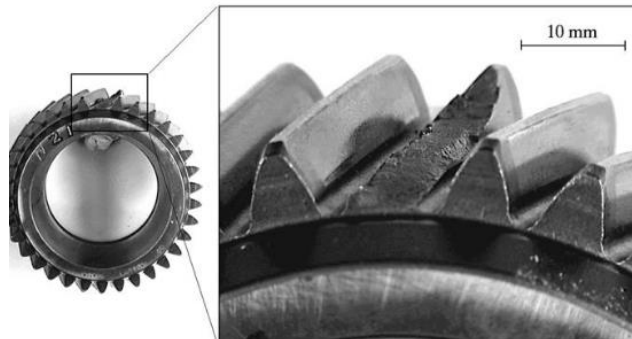


Figura 3-2. Desgaste por fatiga en engranajes.

Fuente: Benítez (2017)

Como se muestra en la figura la característica principal de este tipo de desgaste es el desprendimiento de material en proporciones notablemente altas y deja marcas características que indican los ciclos de trabajo bajo los cuales fue sometido la pieza afectada.

- c. Desgaste corrosivo:** El desgaste corrosivo, es un proceso por el cual se combinan la corrosión que debilita la estructura de la superficie del elemento del par tribológico, y cualquier otro proceso de desgaste, la característica principal de este proceso de

desgaste como lo menciona (Stachowiak, 2005) es que la superficie metálica sufre un proceso corrosivo lo cual trae como consecuencia que se torne demasiado frágil para poder soportar el trabajo para el cual fue diseñado y termina en un desprendimiento del material de manera muy acelerada. La figura es una muestra de un fenómeno de desgaste corrosivo.



Figura 4-2. Elemento de máquina atacado por el desgaste corrosivo.

Fuente: Benítez (2017)

- d. **Desgaste erosivo:** Para ser considerado desgaste por erosión se tiene que cumplir con una sollicitación específica, la pérdida de material se genera porque la superficie se expone a repetidos impactos de partículas sólidas o líquidas (Caballero, Aperador, & Delgado, 2014).

La superficie debido a la mezcla de un flujo constante, con partículas sólidas a altas velocidades se ve expuesto a esfuerzos constantes que hacen que los impactos de las pequeñas partículas sólidas desgarran o corten el material. Los mecanismos de desgaste erosivo según Robles (2016) se muestran en la figura.

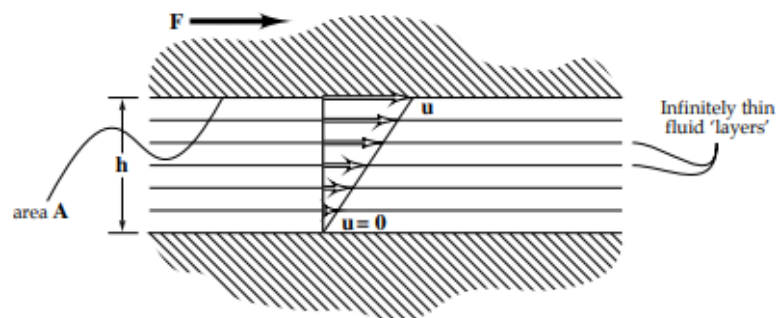


Figura 5-2. Mecanismos de desgaste por erosión.

Fuente: Robles (2016)

- e. **Desgaste por abrasión:** Este mecanismo de desgaste, se caracteriza por la presencia de partículas duras que interactúan con superficies que se deslizan una contra otra, bajo este sistema es importante caracterizar que este tipo de desgaste provoca imperfecciones, micro cortes, entre otros por acción de partículas extremadamente duras y pequeñas, en comparación con la superficie base. (Gómez, 2015).

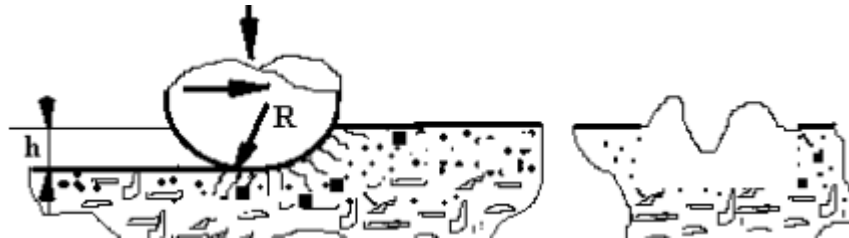


Figura 6-2. Mecanismo de desgaste por abrasión.

Fuente: Gómez (2015)

2.5. Desgaste Abrasivo

Como se mencionó anteriormente el desgaste abrasivo es aquel donde las partículas duras atrapadas entre las superficies deslizantes provocan desprendimiento del material en forma de viruta. Estas partículas son producto de la contaminación de la interface entre las superficies, o son producto del desgaste de las partes del sistema tribológico.

El desgaste abrasivo se define como el desgaste o desprendimiento de residuos de una superficie como resultado de interactuar con el paso de fluidos, gases o con el roce de un sólido. En sólidos, el desgaste abrasivo se produce cuando una superficie irregular rígida roza una superficie menos dura. La Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales, es decir, ASTM, explica el desgaste abrasivo como la función de pérdida del material debido a que los materiales rígidos o las prominencias ásperas se empujan en sentido contrario a un área determinada. Para el cálculo del desgaste abrasivo se puede calcular como pérdida de materia mediante la prueba de abrasión Taber que se especifica en la norma internacional 9352 y la norma estadounidense D 4060.

Las condiciones o características de este tipo de desgaste de acuerdo a lo expuesto por Stachowiak (2005) no solo se debe a las propiedades del material y condiciones superficiales, también se encuentra gran incidencia en factores como la velocidad de contacto, medio ambiente, y sobre todo a factores relevantes con el abrasivo, como la concentración y naturaleza del mismo.

2.5.1. Clasificación del desgaste abrasivo

El proceso de desgaste abrasivo según Castillo & Topanta (2012) se puede clasificar por la naturaleza del contacto en dos tipos, el primero desgaste abrasivo de dos cuerpos, donde la superficie abrasiva entra directamente en contacto con el material base, y de tres cuerpos donde las partículas abrasivas se encuentran suspendidas en la interface entre dos componentes mecánicos del mismo tipo como se ilustra en la figura.

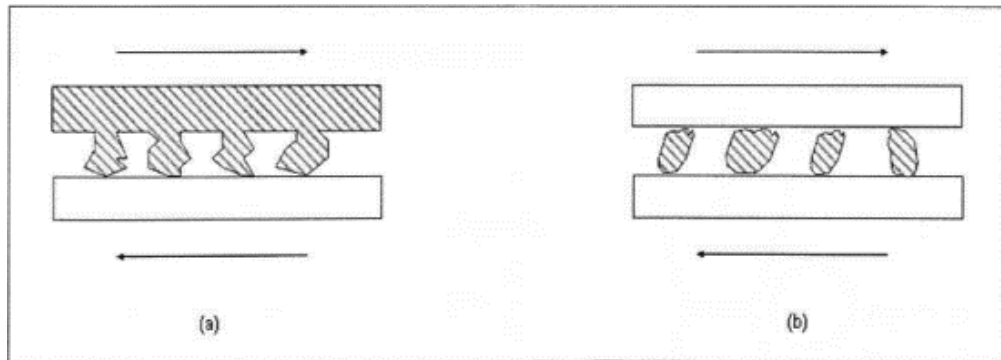


Figura 7-2. Tipos de desgaste abrasivo

Fuente: Gutierrez y otros (2015)

Bajo este contexto es importante hacer varias aclaraciones en las diferencias existentes entre este tipo de desgaste. Los rangos de abrasión en el mecanismo de tres cuerpos son relativamente mucho más bajos que el de dos cuerpos, esto se debe a la distribución de las fuerzas y sobre todo que las partículas abrasivas tienen libertad de movimiento, pueden girar y deslizarse entre las superficies de contacto haciendo que el daño generado sea menor.

El desgaste abrasivo de dos cuerpos, generalmente se utiliza como mecanismo de mecanizado, para obtener resultados específicos en una superficie determinada, mientras que el desgaste abrasivo de tres cuerpos es producto de la contaminación de la interface entre dos superficies, por ejemplo, la contaminación del lubricante con partículas externas, lo cual hace que sea más difícil de monitorear, predecir y controlar ya que es involuntaria. Es por eso, que este estudio se centrará básicamente en este tipo de proceso.

Otra manera de clasificar al desgaste abrasivo según lo expone Gutiérrez y otros (2015), puede realizarse en función del esfuerzo de trabajo al que son sometidas las superficies del par tribológico involucrado. De esta manera el primer modo de abrasión, se denomina de bajo esfuerzo, caracterizado porque las partículas deslizan con las superficies sin sufrir impactos mayores, como en el caso de bandas transportadoras, rampas, entre otros.

El segundo modo de desgaste se denomina abrasión de alto esfuerzo y se presenta cuando un elemento de alta dureza es retenido entre dos superficies de contacto, para ser triturado, y finalmente la abrasión severa cuando los daños provocados en las superficies son notables a simple vista producto de la intensidad del proceso (Instituto Azteco, 2017).

Como se manifestó antes los procesos de abrasión se pueden dar por muchos motivos en los elementos del par tribológico; sin embargo, el tipo de daño que provocan va en función del efecto que la partícula abrasiva ocasiona en los materiales base (Castillo & Toapanta, 2019), siendo los mecanismos expuestos en la figura a continuación los más comunes.

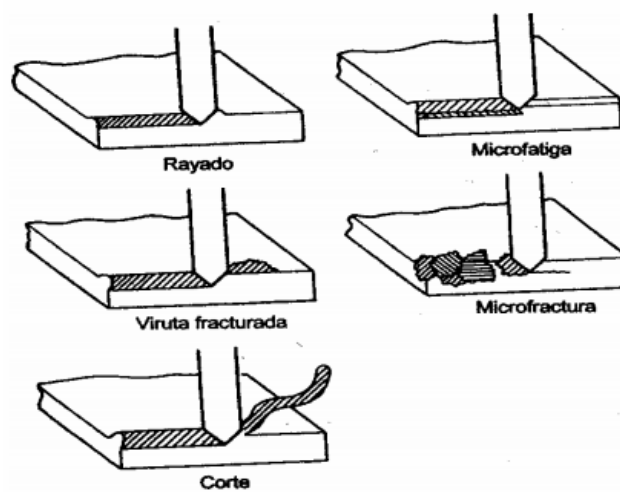


Figura 8-2. Mecanismos de abrasión

Fuente: Noria (2014)

De los expuestos, el rayado, microfractura y corte son los mecanismos que más se presentan en la industria, en función de la dureza y concentración de los abrasivos en los diferentes elementos de máquinas.

El rayado se caracteriza por el material desplazado del centro a las orillas de la superficie, provocando canales bien marcados, ocurre con cargas ligeras y no provoca una pérdida en peso o volumen del material que sea notable; sin embargo, cambia la forma y rugosidad de la superficie base, causando dislocaciones o concentradores de esfuerzo en la superficie del elemento que posteriormente afecten el normal funcionamiento y el desprendimiento del material (Ruiz, 2015).

Las microfracturas se provocan porque el abrasivo trabaja en el contacto como un concentrador puntual de esfuerzos, y al superar la tenacidad de fractura del material base, logra

que sufra daños en la superficie, y por consecuencia desprendimiento del material, este tipo de desgaste abrasivo es el más agresivo y perjudicial, pues termina con acabar con los elementos que se involucran en el proceso, el uso de lubricantes, y el monitoreo constante de las partículas es un método bastante efectivo para frenar este tipo de desgaste por abrasión (Ulloa & Vasco, 2020).

Finalmente, el corte de material se ocasiona bajo las mismas condiciones que el rayado con la diferencia sustancial que precisa de un ángulo de corte dependiendo del material Macmillan (2018) ubica este parámetro normalmente entre 30 y 60 grados en función del tipo de material.

2.5.2. Importancia del estudio del desgaste abrasivo

Tomando en cuenta en función de lo propuesto por Stachowiak (2005) se afirma que el desgaste abrasivo es la forma más rápida de desgaste en un diseño medianamente bueno para vida infinita y ocasiona los mayores costos para la industria.

Por lo cual se han desarrollado varios métodos para reducir las pérdidas económicas propias del proceso. El método más sencillo para controlar o eliminar el desgaste abrasivo consiste en aumentar la dureza superficial del material en lo posible hasta el 80% de la dureza del grano. Por supuesto, existen complicaciones como la prevención de la fragilidad al tiempo que aumenta la dureza que solo se puede superar hasta cierto punto considerando que pasado un límite determinado el material se volvería inútil para condiciones de fatiga.

La manera más sencilla de cumplir con estas condiciones son los revestimientos superficiales o tratamientos térmicos superficiales por lo cual estos materiales duros son más caros que los materiales habituales, por lo que el primer criterio de diseño para solventar estas problemáticas es determinar la naturaleza y origen del problema. Posteriormente es necesario determinar el material resistente a la abrasión por el costo del reemplazo y facilidad de mantenimiento (E.C.I., 2008).

A menudo puede ser imposible de cuantificar o se puede requerir pruebas muy elaboradas para predecir el comportamiento de un material frente a un abrasivo, es por eso que se decide como aporte al diseño y mantenimiento generar una herramienta computacional que permita evaluar la velocidad de desgaste aproximada, en función de ciertos parámetros de trabajo establecido.

2.6. Ecuación de Kragelsky

Han sido muchos los intentos para poder obtener un método de predicción del desgaste abrasivo como expone Kragelsky (1977) en su libro, el primer acercamiento a este problema lo hace Tonn en el año 1937 con una fórmula empírica que posteriormente en 1940 sería modificada por Holm la cual parte de la hipótesis que la pérdida volumétrica de volumen (W) de una pieza es directamente proporcional a la probabilidad (z) que una partícula abrasiva remueva material cuando se encuentra en su camino con una cresta de la superficie y a la fuerza normal (N) que actúa entre las superficies deslizantes y las partículas abrasivas e inversamente proporcional a la dureza de las mismas medidas en escala Brinell (HB).

Ecuación 1-2. Pérdida de volumen por abrasión HOLM.

$$W = z * \frac{N}{HB}$$

Posteriormente en 1953 Archard trabaja con la ecuación expuesta previamente y hace las suposiciones que micro volúmenes de material se desprenden durante el proceso de desgaste. Y que la partícula abrasiva tiene formas semiesféricas con un radio igual al radio del punto de contacto entre las superficies. De este modo en 1956 junto con Hirst presentan la ecuación descrita a continuación donde (k) es la probabilidad de encontrar una partícula abrasiva del punto de contacto entre las superficies y varía en un rango de entre 10^{-2} y 10^{-7} . (Caidedo, Valdés, & Coronado, 2005).

Ecuación 2-2. Archard y Hirst desgaste abrasivo.

$$W = \frac{k}{3} * \frac{N}{HB}$$

El siguiente avance importante se desarrolla en la antigua Unión Soviética donde Kragelsky durante los años de 1957 hasta 1977 donde se publica su libro (1977), desarrolla la teoría del desgaste abrasivo por fatiga y varias decenas de publicaciones y colaboraciones en torno a los métodos para calcular el desgaste por abrasión en varios elementos de máquinas; los cuales fueron probados experimentalmente y abiertamente aceptados por la comunidad científica reconociendo la naturaleza del desgaste por fatiga.

Bajo este contexto se tomará como referencia la ecuación Kragelsky (1977) para medir el desgaste por abrasión donde (V) es la velocidad de desgaste medida en [um/h], (A) es el parámetro que caracteriza el material abrasivo, (K) es la caracterización de las condiciones

geométricas del punto de contacto de las superficies deslizantes y (M) se encuentra en función de las propiedades del material de las superficies.

Ecuación 3-2. Velocidad de desgaste abrasivo Kraglesky.

$$V = \frac{A K}{M}$$

2.7. Engranajes

Considerando la importancia que tiene los engranajes en este trabajo, es importante destacar la función que tienen las herramientas y el conocimiento fundamental para determinar la geometría, tipo, materiales y procesos de fabricación de engranes más comunes que permitan llevar a cabo un proceso correcto de cálculo y dimensionamiento de los mismos. Así como identificar los parámetros necesarios de cada uno de ellos para el desarrollo de la ecuación de desgaste abrasivo.

Gamboa (2006) describe a un engrane como el elemento mecánico dentado que rota alrededor de un eje con la finalidad de transmitir potencia entre dos puntos fijos que se ubican a una distancia establecida.

Sin embargo, en función de estos puntos se puede tener claro la nomenclatura y a qué se refiere cada parte de un engrane, así como los diversos tipos de engranes o de configuraciones de los mismos como se expone a continuación.

2.7.1. Terminología de engranajes.

Para introducirse al análisis y estudio de engranajes es necesario comprender la terminología involucrada en el tratamiento de los mismos, por lo cual este apartado del capítulo se enfoca en delimitar los términos necesarios para este propósito se tomará las definiciones en torno a los engranajes de los conceptos proporcionados por Marciano (2000).

- **Diente de un engranaje:** Son los elementos que realizan el trabajo de empuje, transmiten la potencia y tienen un perfil característico en función de la disposición de los mismos.
- **Circunferencia exterior:** Es la parte de la circunferencia de la forma del engranaje que limita al mismo por su parte más externa.

- **Circunferencia interior:** Es la parte que limita el fondo de los dientes, también denominado pie.
- **Circunferencia primitiva:** Es la circunferencia que se forma por la rotación de los puntos de contacto de los dientes de los engranajes involucrados en el proceso.
- **Adendum:** Es la distancia perpendicular entre el círculo de paso o circunferencia primitiva, y la parte más alta de los dientes.
- **Ángulo de hélice:** Es el ángulo formado por la base del cilindro y los dientes de un engranaje helicoidal o tipo tornillo de perfil evolvente.
- **Engranaje o corona:** Se refiere al engranaje más grande de un arreglo de engranajes.
- **Piñón:** Es el engranaje más pequeño comúnmente encargado de transmitir el movimiento.
- **Excentricidad:** La desviación de los centros comunes de dos circunferencias se denomina excentricidad.
- **Ancho de cara:** Es la correspondiente longitud del diente en el plano ubicado a 90 grados del plano de formación del engranaje.
- **Relación de engrane:** Es la proporción del mayor al menor número de dientes en los engranajes del acoplamiento.
- **Módulo:** Es la proporción existente entre el diámetro de paso en milímetros como el número de dientes.
- **Paso:** Es la distancia entre un punto del diente a un diente adyacente en el mismo punto. Es una caracterización del tamaño del diente.
- **Pitch:** Es la superficie plana imaginaria tangente a las superficies de paso de dos engranajes, básicamente es el plano que limita a los puntos de contacto entre los engranajes.
- **Ángulo de presión:** Es el ángulo entre la línea de presión del diente y la tangente plana a la superficie de paso, básicamente es la dirección normal al diente de un engranaje.

Las siguientes terminologías son tomadas de la norma INEN 1143 correspondiente a engranajes.

- **Línea de centros:** Queda definido por la distancia entre ejes, une los puntos centrales de formación de los engranajes en el par de transmisión.
- **Sentido de rotación:** Es determinado por la dirección de rotación del engranaje del modo de transmisión, es positivo medido en sentido horario.

2.7.2. Línea de engrane

Durante la transmisión de movimiento el engranaje y durante una pérdida de tiempo pequeño relativo al giro del engrane, se produce el contacto entre dos dientes, este punto de contacto varia con el movimiento del engranaje y si se toma en varios instantes de tiempo, se obtiene lo que se conoce como la línea de engrane (UNICAN, 2017), como se muestra en la ilustración.

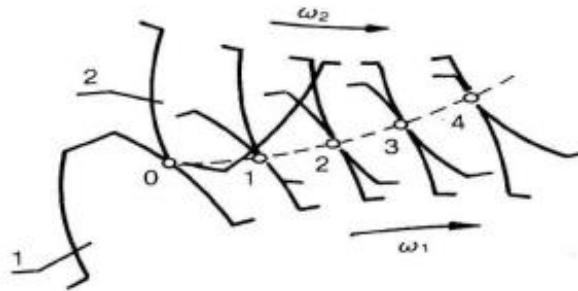


Figura 9-2. Línea de engrane.

Fuente: Benítez (2017)

La línea de engrane permite obtener los puntos de contacto con el tiempo en el que un diente esta interactuando con otro, además de poder determinar el valor total de superficie que interactúa en el periodo de contacto, este valor es constante para todos los dientes, gracias a la denominada ley de engranaje (Benítez, 2017).

Como se verá más adelante existen diversos tipos de engranajes, estos afectan a los parámetros de contacto, pero la línea de engranaje sigue manteniendo su concepto de obtención, en los engranajes de envolvente ya no es una curva, sino que más bien tiene una forma lineal debido a la compensación dado la curva de los dientes, esta línea forma un ángulo que es perpendicular a los centros de cada engranaje (Roda, 2015), como se muestra en la ilustración.

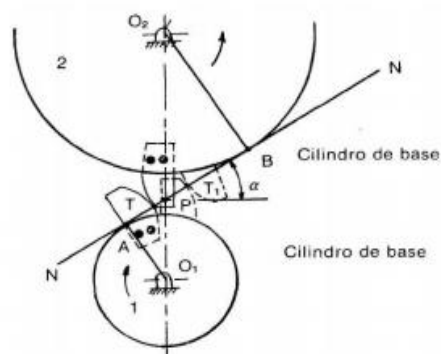


Figura 10-2. Mecanismos de abrasión.

Fuente: Roda (2015)

2.7.3. Ley de engranajes

Esta ley es aplicada para toda clase de cálculos con respecto a engranajes, permite evitar variaciones demasiado grandes dentro de los estudios en cada modo de falla; además, de ser una suposición ideal, en el que se trata el giro en engranajes como constante, esto una vez superado el tiempo de “arranque” o lo que sería la puesta en marcha (Pérez, 2007).

Velocidades variables generarían dentro del mecanismo variaciones que como se mencionará es el factor más grande en la falla de un engranaje; además, de alterar completamente parámetros de desgaste.

2.7.4. Características de servicio

Los factores que alteran la vida útil se observan durante el funcionamiento del engrane, estos disminuyen este tiempo de forma gradual, los factores dentro de un engranaje se relacionan directamente como un gran conjunto, los parámetros de diseño consideran una gran cantidad de ellos para su proceso (Duque, 2017).

2.8. La lubricación

Durante el servicio la lubricación es el elemento más importante que determina el periodo de vida útil del engranaje, una forma adecuada de lubricación permite maximizar este periodo, para ello es necesario reconocer los puntos que pueden ser resaltados con respecto a la lubricación dentro de los engranajes (Open Ji Care Port, 2014).

La lubricación además de ser un elemento que reduce la fricción entre los contactos de los dientes dentro de la línea de engrane, cumple con otras funciones específicas las cuales se detallan a continuación.

2.8.1. Lubricación ante la fricción

Como se mostró con la línea envolvente el periodo de tiempo de contacto puede ser pequeño, pero las revoluciones en un tiempo pueden ser bastantes altas, por lo que este tiempo de contacto se vuelve significativo; además, de la distancia total de contacto, el resultado es la gran fricción constante entre los dientes, la lubricación como se mencionó permite reducir la fricción formando una capa fina de fluido entre las superficies de contacto lo que reduce

drásticamente el punto de contacto entre materiales y prolonga la línea de engrane, es decir crea un contacto menor (Open Ji Care Port, 2014).

2.8.2. Refrigeración

Como se conoce la fricción es una forma de generar calor, el calor en metales es bastante significativo al momento de estudiar las microestructuras, como ejemplo se podría mencionar el acero el cual presenta varias fases dado su contenido de carbono, esto quiere decir que el lubricante; además, de presentar una baja viscosidad, requiere tener una capacidad calorífica bastante buena, para retirar el calor producido por la fricción, con la finalidad de evitar estos cambios de microestructuras, por lo que se conocería como un tratamiento térmico dentro de las definiciones de diseño mecánico (TDX, 2013).

2.8.3. Protección anticorrosiva

Este fenómeno característico de los metales, y como se mencionará a continuación los tipos de materiales en engranajes, es muy común en la vida útil de un engranaje, el lubricante contará con una última característica, que proteja al elemento metálico de posibles corrosiones, como producto de la interacción de 2 materiales, que podrían ser de diferente composición e interactuar electroquímicamente entre sí (Benítez, 2017).

2.8.4. Capa de lubricación

Como elemento final dentro de la lubricación tenemos el tipo de capa generada por el lubricante, esto depende principalmente de la composición del fluido y será primordial en la determinación final de desgaste del engranaje (Mideros, 2013).

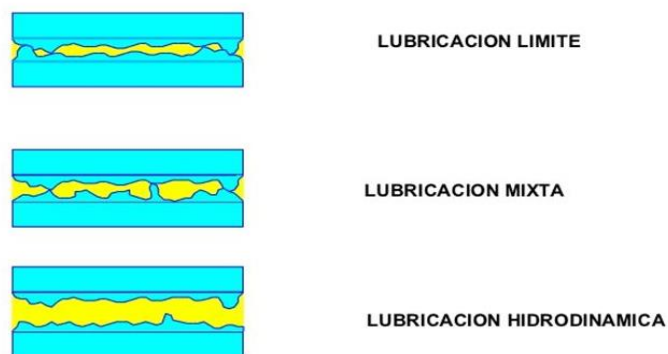


Figura 11-2. Capa de lubricación.

Fuente: (Fernandez, 2012, p. 13) Máquinas y mecanismos.

La viscosidad que será mencionada varias veces es el término por el cual un fluido logra fluir dentro de otro elemento sólido, esta propiedad será la responsable de generar la capa que permitirá reducir el contacto entre los engranajes y sus dientes, cabe resaltar que la viscosidad a su vez será un elemento de amortiguación, que reducirá la potencia de transmisión y es necesaria considerarla en los cálculos de diseño para lograr una transmisión adecuada, por ello es requerido conocer el tipo de lubricante que se debe utilizar; además, del tipo de capa que se va a generar, entre estas tenemos la hidrodinámica, capa límite y elastohidrodinámica (Guerrero, 2017).

2.8.5. Lubricación hidrodinámica

Este tipo de capa se genera durante el movimiento, de ahí su nombre, viene dada por la interacción dinámica de las partes, el engranaje es capaz de interactuar con un depósito de lubricación, el cual forma una capa superficial en el engranaje que este compartida al resto de elementos de conexión, de esta manera se puede concluir que este tipo de lubricación es dependiente de las cargas dinámicas, como velocidad y potencia en el giro (Sanz, 2019).

2.8.6. Lubricación de capa límite

Como se mencionó en el punto anterior, el tipo de lubricación hidrodinámico dependía claramente de la velocidad y potencia, en casos puede tenerse velocidades bastantes bajas, de tal manera que no sea factible ese tipo de lubricación, de esta manera se presenta la lubricación por capa límite, que ya implica una relación química de adherencia entre el fluido y el metal, de esta manera el metal o al menos su superficie deberá ser tratada para lograr crear una dependencia químicamente compatible para que el fluido cree una capa de lubricado (Sanz, 2019).

2.8.7. Lubricación elastohidrodinámica

Este último es un tipo de lubricación más avanzada en términos tecnológicos, una de las limitantes de este método es el espesor de película que se pueda generar, debido a posibles cambios en el metal, este efecto se resuelve por medio de un fluido que pueda deformar la película de acuerdo con la presión, es decir la viscosidad será capaz de cambiar y evitar un espesor muy grande de capa de lubricación (Fernández, 2012), es decir este fluido cuenta con dos características esenciales.

- La viscosidad del lubricante se ve afectado por la presión de la siguiente manera; a mayor presión la viscosidad aumenta y se produce una reducción considerable de la capa superficial de lubricante sobre el engranaje, esta reducción de película permite evitar que el fluido sea expulsado por la presión y se mantenga sobre el material permitiendo una lubricación adecuada.
- El fluido al ser controlado puede extenderse alcanzando puntos que llegan a ser difíciles de lubricar debido a la obstaculización en el paso, dada la interacción entre los dientes que genera puntos de contacto que no se lubricarían correctamente.

2.8.8. Principales tipos de lubricación

Existen diversas formas de obtener lubricantes, todo fluido cuenta con una viscosidad que podría ser aplicada en lubricación, pero como se mencionó se requiere altas viscosidades para evitar pérdidas de potencia debido a la amortiguación que genera este fluido.

Tabla 1-2. Tipos de lubricación

Lubricante	Funcionalidad
Aceites minerales	Presenta bajas características, aplicados en mecanismos de bajas prestaciones
Aceites inhibidores	Permiten una protección anticorrosiva además de una lubricación apta para la capa por hidrodinámica, dada su baja adhesión
Aceites de presión	Es uno de los más adecuados para todo uso, aplicado para grandes prestaciones de trabajo.
Aceites compuestos	Alta adhesión, capaz de proporcionar un deslizamiento bajo
Grasas	Aplicados a bajas velocidades y no son capaces de remover gran cantidad de calor.

Fuente: Shell (2006)

2.9. Tipos de fallo en engranajes

Existen evidencias de varios factores que influyen en el comportamiento o respuesta de trabajo de un engranaje, esto se refleja en su tiempo de vida útil, la lubricación es el segundo factor de falla común. Es necesario recordar que los parámetros dinámicos vienen ligados al diseño; como lo son cargas, potencia, velocidad entre otros, como el tiempo de trabajo que según el criterio de autores, es el factor más importante y que relaciona a cada uno de estos parámetros con la duración del engranaje (Ingemecánica, 2020).

2.9.1. Modos de fallo en engranajes

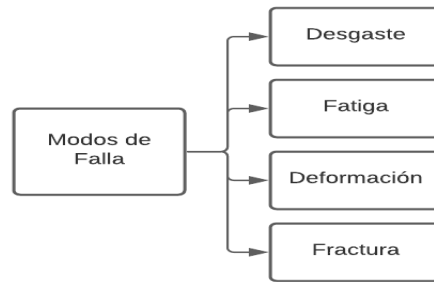


Figura 12-2. Modos de falla.

Fuente: MENA, José 2020

Según la Sociedad Americana para Metales (American Society for Metals) ha creado 4 subgrupos para clasificar los modos de falla; desgaste, fatiga superficial, deformaciones y rotura.

Tabla 2-2. Causas de fallo en engranajes

CAUSAS DE FALLO	PORCENTAJE %
<u>RELACIONADOS CON EL SERVICIO (TOTAL)</u>	74,7
Ensamblaje inapropiado	21,2
Lubricación inadecuada	11,0
Sobrecargas continuas	25,0
Cargas de impacto	13,9
Fallas de cojinetes	0,7
Material extraño	1,4
Errores de operación del equipo	0,3
Manejo abusivo	1,2
<u>TRATAMIENTO TÉRMICO (TOTAL)</u>	16,2
Excesiva dureza del cuerpo del engranaje	0,5
Insuficiente dureza del cuerpo del engranaje	2,0
Excesiva profundidad del recubrimiento	1,8
Insuficiente profundidad del recubrimiento	4,8
Inapropiado endurecimiento	5,9
Inapropiado tempering	1,0
<u>RELACIONADO CON EL DISEÑO (TOTAL)</u>	6,9
Inapropiado diseño	2,8
Inapropiada selección del material	1,6
Especificación inapropiada del tratamiento	2,5
<u>RELACIONADO CON LA MANUFACTURA (TOTAL)</u>	1,4
Quemaduras por esmeriladura	0,7
Marcas de herramientas o cortes (notches)	0,7
<u>RELACIONADOS CON EL MATERIAL (TOTAL)</u>	0,8

Defectos de forjado	0,1
Defectos de acero	0,5
Mezcla del acero o errores de composición	0,2

Fuente: Romero y Giraldo (2018)

2.9.2. Condiciones de fallo en engranajes por lubricación

El fallo por lubricación suele presentarse de varias maneras, superficiales por desgaste internas dada la temperatura de trabajo. La ASTM también permite conocer los factores que influyen en la condición final del engranaje.

- Origen de puntos desgastados, al ser un elemento de transmisión el desgaste se puede producir en distintos puntos, localizar el comienzo puede llevar a verificar puntos que no se lubrican dada las obstrucciones.
- Contaminación, las partículas residuales ya sean por factores internos, es decir provocadas por el funcionamiento, o factores externos, esto puede resultar de posibles contaminaciones presentes en el fluido de lubricación previo a la puesta en marcha.
- Dureza final, por último, el desgaste en materiales siempre produce cambios en la dureza del material según (ASTM), esto no permite conocer zonas comunes de dureza y desgaste.

2.9.3. Tipos de engranajes

La clasificación de los engranajes puede realizarse mediante varias categorías, la primera grande clasificación se realiza en función de la disposición de los ejes de rotación y el tipo de dentado (Xunta de Galicia, 2020).

Los engranajes de ejes paralelos son aquellos cuyo eje de rotación se encuentra de manera paralela, al otro engranaje entre los más comunes encontramos los siguientes (Ulloa & Vasco, 2020).

- Engranajes cilíndricos de dientes rectos:** Son herramientas utilizadas para transmitir potencia entre ejes paralelos, es el tipo de engranaje más simple, utilizado para velocidades medias y bajas, generan ruidos a altas velocidades, y no soportan grandes cargas, son los más utilizados en aplicaciones sencillas por su costo (Knowledge Based Engineering, 2015).

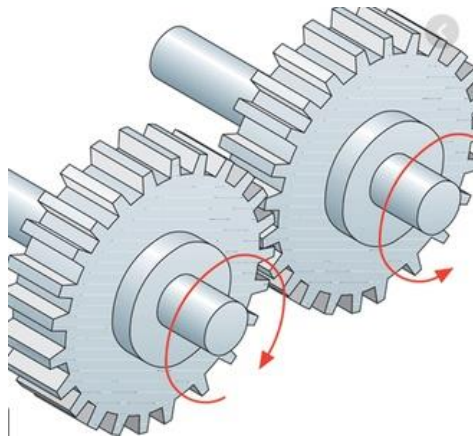


Figura 13-2. Engranajes de dientes rectos de eje paralelo.

Fuente: Motorex (2019)

- b. Engranajes cilíndricos helicoidales de ejes paralelos:** Son engranajes que permiten transmitir potencia a ejes paralelos, sin embargo, la característica de esta disposición es que soporta cargas elevadas, por lo tanto, son capaces de transmitir gran potencia. Es necesario colocar rodamientos que soporten carga axial, ya que la disposición de los dientes proporciona un mecanismo de transferencia de fuerza en este sentido (Roda, 2015).

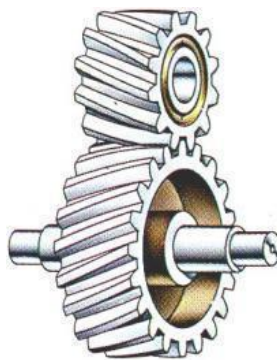


Figura 14-2. Engranaje helicoidal de ejes paralelos.

Fuente: Masterhacks (2017)

- c. Engranaje doble helicoidal de ejes paralelos:** Al igual que los engranajes helicoidales simples se utiliza para transmitir grandes cargas, con la diferencia que los engranajes dobles helicoidal tienen más área de contacto lo cual reduce los esfuerzos en los materiales, y permite mayor transmisión de potencia y eliminan el empuje axial, lo cual es favorable en la transmisión de movimiento (Millán, 2006).



Figura 15-2. Engranaje doble helicoidal

Fuente: Masterhacks (2017)

Del mismo modo la otra macro clasificación es la de engranajes de ejes perpendiculares donde los ejes sobre los cuales giran transmiten potencia con un ángulo de 90 grados entre sí.

- d. **Engranajes helicoidales cruzados:** Realizan un movimiento tipo cuña, es poco utilizado pues genera deslizamientos, sin embargo, su montaje es sencillo, y se puede configurar la disposición de los engranajes de manera que vayan en el mismo sentido o en sentido contrario (Roda, 2015).



Figura 16-2. Engranajes helicoidales cruzados

Fuente: Roda (2015)

- e. **Engranajes cónicos de dientes rectos:** Son muy poco usados, debido a que son bastante ruidosos, su disposición genera esfuerzos en los dientes considerables por lo cual se usa para velocidades bajas y como reductor de velocidades en disposiciones geométricas complejas (Calatayud, 2016).



Figura 17-2. Engranaje cónico de dientes rectos

Fuente: Engranabreider (2016)

- f. **Engranaje cónico de dientes helicoidales:** Presenta superficie de contacto entre las superficies bastante grande por lo cual permite transmitir mayor potencia, transmite el movimiento en ejes que se cruzan en un ángulo de 90 grados, y generalmente se usa para disminuir velocidad. No son ruidosos (Vásquez, 2000).



Figura 18-2. Engranaje cónico helicoidal

Fuente: Vásquez (2000)

- g. **Engranajes cónicos hipoides:** Esta configuración de engranajes es caracterizada porque el eje del piñón que transmite movimiento está descentrado con respecto al eje de la corona, una de las cualidades por las cuales es conveniente utilizar este mecanismo es que debido a su disposición aumenta significativamente la vida útil y se reduce el ruido entre los componentes (CLR, 2020).



Figura 19-2. Engranaje hipoide.

Fuente: CLR (2020)

2.10. Engranajes con perfil evolvente

Es importante comenzar por definir que es un perfil evolvente o también conocido como involuta según Fernández y García (2012) es una curva en donde el lugar geométrico de los centros de curvatura de la misma es un círculo en este caso el engrane.

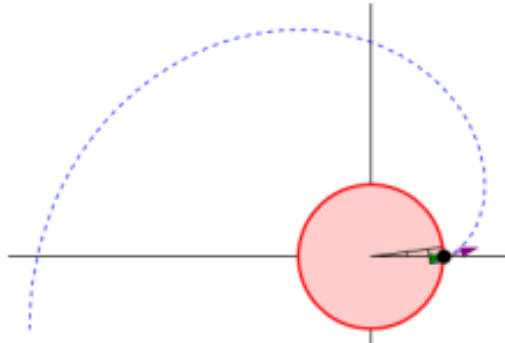


Figura 20-2. Perfil evolvente de un engrane

Fuente: Fernández y García (2012)

Definir esta característica geométrica entre otros beneficios principalmente permite estandarizar la construcción de los engranajes, de manera que al modificar el tamaño de los mismos y por ende la relación de transmisión pero no se cambien las propiedades que permiten que estos engranen y así conseguir que el proceso de fabricación, manufactura y diseño de máquinas sea mucho más sencillo, razón por la cual salvo ciertas condiciones puntuales, el común de las máquinas y mecanismos industriales que utilizan engranes, utilicen aquellos que son de perfil evolvente (Carro & González, 2015).

2.10.1. Engranajes rectos de perfil evolvente

Los engranajes rectos, son aquellos en los cuales los dientes se encuentran contruidos alrededor de un cilindro y son paralelos a su centro. Son muy usados en movimientos lentos para transmitir movimiento entre ejes montados de manera paralela según afirma Knowledge Based Engineering (2015). Este tipo de engranajes es muy confiable al momento de transmitir movimientos simples, de manera que no se produce un empuje axial, sin embargo, es necesario tener un régimen de lubricación estricto pues el contacto entre las caras de los mismos es mucho mayor. Siguiendo esta línea de explicación es importante definir los parámetros que caracterizan a un engranaje recto de perfil evolvente.

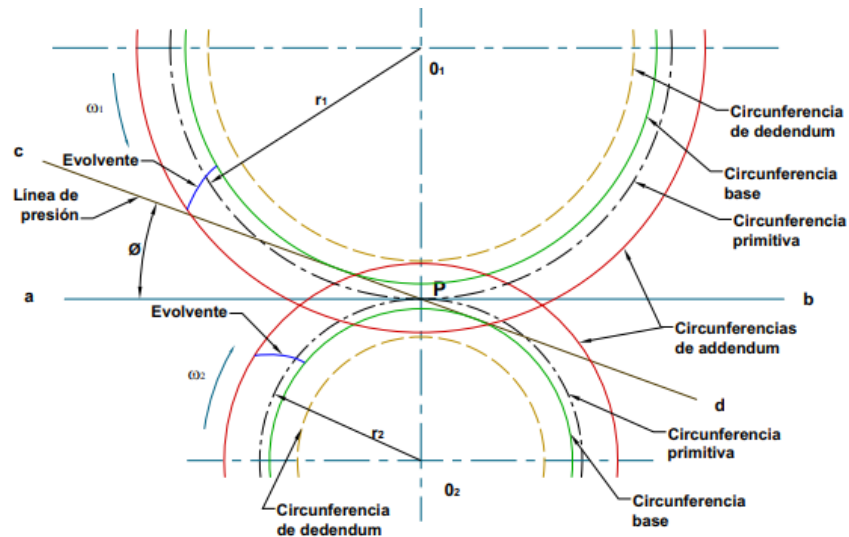


Figura 21-2. Circunferencias constitutivas de un engranaje recto

Fuente: Sena (2019)

La figura muestra un detalle de las líneas importantes que se generan en el contacto de un par de engranajes rectos y la terminología necesaria para entender cada una de ellas.

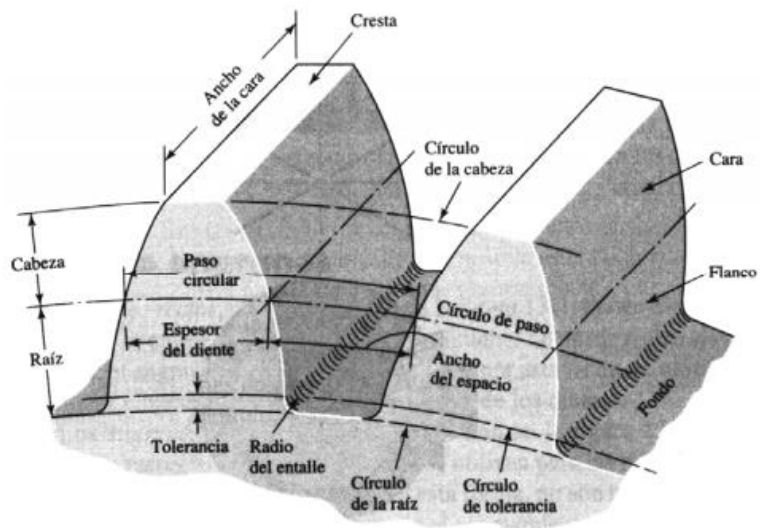


Figura 22-2. Terminología engrane recto

Fuente: Vásquez (2000)

Con la figura se obtienen los términos generales para caracterizar un engranaje recto según Vásquez (2000). La circunferencia o diámetro de paso es la base de los cálculos de un engranaje, el paso circular es la distancia entre un punto del diente y el diente siguiente, se calcula tomando como referencia la circunferencia de paso y dividiéndolo para el número de dientes del engrane.

El módulo es la relación existente entre el diámetro de paso expresado en milímetros y el número de dientes del engranaje, representa una medida del tamaño que tienen los dientes en el engranaje y se conforman por:

- a. **Paso diametral:** Es la unidad que se consigue al dividir el número de dientes con el diámetro del engranaje.
- b. **Cabeza o adendo (a):** Es la distancia radial del círculo de paso a la parte más externa del diente.
- c. **Raíz o dedendo (b):** Es la distancia radial entre el círculo de paso y el límite inferior del espacio entre dientes.
- d. **Ancho de cara (F):** Es el espesor del diente medido en forma paralela al eje del engrane.
- e. **Distancia entre centros (c):** Es la distancia dada desde el centro de un engrane, al centro del otro, o en otras palabras es la suma de la distancia de los diámetros dividido para dos.

Uno de los términos más importantes es el ángulo de presión, es decir el ángulo que forma la tangente a los círculos de paso y la línea que se traza normal a la superficie del diente del engranaje.

2.11. Engranajes helicoidales de perfil evolvente

Como afirma Vásquez (2000), los engranajes helicoidales presentan condiciones muy parecidas a los engranajes rectos ya que al igual que ellos sus dientes tienen perfil evolvente. La notable diferencia entre los dos se encuentra que los dientes están inclinados con un ángulo de hélice, que se mide con respecto al eje de rotación, lo cual resulta en dientes paralelos entre sí, pero diagonales al plano de la cara frontal del engranaje como se muestra en la figura a continuación.

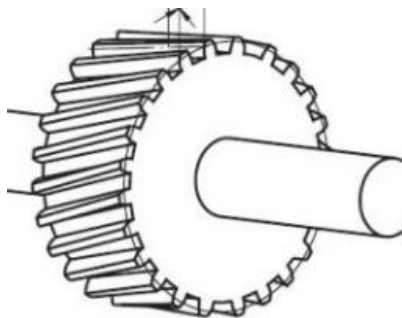


Figura 23-2. Vista isométrica de un engranaje helicoidal.

Fuente: Stachowiak (2005)

En función de este parámetro el ángulo de hélice varía entre los 10 y 45 grados, ya que los perfiles de los dientes pueden ir de derecha a izquierda o de izquierda a derecha. Se utiliza engranajes helicoidales en el diseño de máquinas que necesitan transmitir gran potencia, son más silenciosos y presentan menos problemas de deslizamiento y vibración debido al contacto paulatino de los dientes según lo menciona Vásquez (2000).



Figura 24-2. Terminología engranajes helicoidales.

Fuente: Gamboa (2006)

Al igual que los engranajes rectos este tipo de engranajes comparten mucha de su terminología. Un factor importante al momento de elegir engranajes helicoidales es importante tener en cuenta que transmiten movimiento axial por la naturaleza de la disposición de sus dientes, de modo que se necesita colocar rodamientos que soporten este tipo de transmisión de movimiento, así como los factores de corrección de carga en el proceso de transmisión de fuerza y potencia (Roda, 2015).

2.12. Materiales comunes para la fabricación de engranajes

Dependiendo de la funcionalidad, presupuesto y sobre todo las cargas que serán soportados por una rueda dentada independiente del tipo de esta existe una variedad bastante amplia de materiales con los cuales se puede fabricar un engranaje, así como diversos procesos de fabricación de los mismos (Industrial Sourcing, 2016).

Por esta razón como menciona Industrial Sourcing es tarea de un diseñador el considerar que el proceso de fabricación del engranaje tomando en cuenta variables como la preparación del material base, proceso de fabricación y hasta el montaje en el ensamble final de una máquina o mecanismo.

Además, el peso, aspecto, ambiente corrosivo, tiempo de duración y un gran énfasis en el costo son factores que influyen en la decisión de qué tipo de material utilizar al fabricar un engranaje.

2.12.1. Engranajes de bronce

Para fabricar engranajes se utiliza cuatro tipos de bronce, aleaciones con fósforo o estaño, con manganeso, aluminio o bronce con sílice. Este tipo de materiales se obtiene mediante fundición, se usa para aplicaciones con altos índices de corrosión donde las cargas que se necesita transmitir no son elevadas (ALSIMET, 2019).



Figura 25-2. Engranaje de bronce de un distribuidor.

Fuente: ALSIMET (2019)

2.12.2. Engranajes de hierro fundido

Moya y Vásquez (2007) afirman que existen tres tipos de hierro comúnmente usados en la fabricación de engranajes, el hierro gris fundido, hierro nodular y el hierro maleable, clasificados según la ASTM dependiendo de la composición y sus propiedades mecánicas.

Este tipo de material se utiliza en aplicaciones donde las cargas de choque son nulas, debido a la gran dureza y fragilidad de este tipo de material, el hierro dúctil con tratamiento térmico de austernpering se utiliza mucho en la industria automotriz por su precio comparado con los aceros. La propiedad de corrosión de este material es bastante baja, y su resistencia al desgaste es baja sobre cargas de impacto (Gordillo, 2010).



Figura 26-2. Engranaje de hierro fundido en la industria.

Fuente: Engranabreider (2016)

2.12.3. Engranajes de acero

Es el material más común con el cual se fabrican engranajes, debido a que soportan grandes cargas, son resistentes a la corrosión en buena medida, permiten ser maquinados, y son aptos para los tratamientos de endurecimiento de la superficie (Lindis, 2019).

Se busca tener aceros de medio contenido de carbono para conseguir un centro dúctil o maleable, y una superficie endurecida. Entre los principales aceros que se utilizan se encuentran el AISI SAE (1020-1040-1050-3140-4140-4150-4340-6150-8650) entre otros utilizados para condiciones específicas (Navarro, Aperador, & Delgado, 2016).



Figura 27-2. Engranaje de acero

Fuente: Stachowiak (2005)

2.13. Tratamientos térmicos a ruedas dentadas

Es muy común en la industria utilizar tratamientos térmicos para lograr endurecer la superficie de los engranajes, se realiza este procedimiento para lograr hacerlos más resistentes al

desgaste. Entre los tratamientos térmicos y procesos más comunes, se encuentra el endurecimiento por flama, endurecimiento por inducción, carburación y la nitruración, estos tratamientos proporcionan durezas superiores a los 50 HRC (Luna, 2011).

2.13.1. Carburación

La carburización superficial, provee rangos de dureza superiores a los 55 HRC, según Luna, este proceso consiste en calentar una pieza de acero, cercana al punto de fusión y rodearla de un producto carburante de manera que la composición química de la superficie cambie, posteriormente es necesario someter la pieza a un revenido para conseguir tenacidad en el núcleo y durezas elevadas en la superficie (2011).

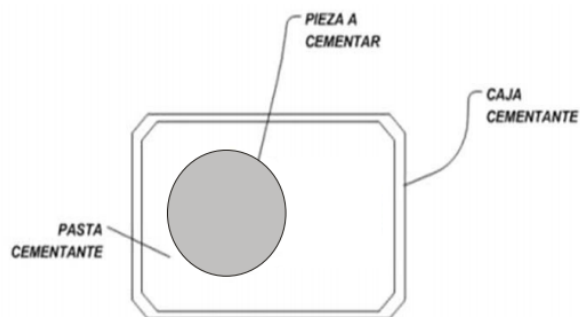


Figura 28-2. Esquema tratamiento de carburización.

Fuente: Luna (2011)

2.13.2. Nitruración

Luna (2011) identifica a la nitruración como el tratamiento térmico de endurecimiento superficial utilizado principalmente en aceros aleados por su capacidad de formar nitruros estables a una temperatura adecuada de tratamiento térmico. Siendo estas partículas las encargadas del endurecimiento superficial.

Similar a la carburización se calienta el material base cercano a la temperatura de fusión, y se inyecta nitrógeno que propicie la formación de nitruros combinado con los elementos maleantes del acero y se produzca un endurecimiento superficial (Belzunce, 2001).

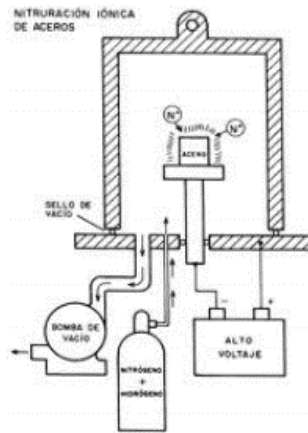


Figura 29-2. Esquema de un horno para nitrurado de aceros.

Fuente: Luna (2011)

2.13.3. Cianuración

Es el procedimiento más común en cuanto a endurecimiento superficial de aceros se refiere, es un tratamiento intermedio entre la cementación y nitruración, esta afirmación se explica gracias a la capacidad de endurecer el material a través de la acción combinada del nitrógeno y el carbono a una temperatura determinada cercana a los 900 grados centígrados (Cimiano, 2002).

La cianuración es realizada mediante dos procedimientos, el primero de ellos, con calentamiento local por flama, para provocar un temple localizado en la región afectada, el temple de este proceso tiene una profundidad entre 1,5 y 6,5 mm (Cimiano, 2002).

Es indispensable en este proceso realizar un revenido de esfuerzos para liberar al material de los esfuerzos internos a una temperatura cercana de 200 grados centígrados (Remache, Jácome, Molina, & Celi, 2016).

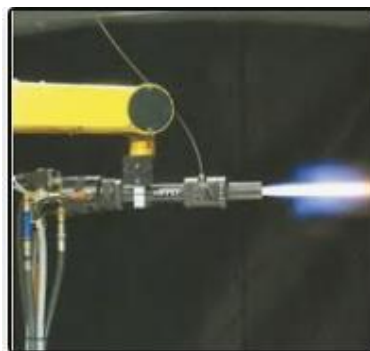


Figura 30-2. Flama de cianuración.

Fuente: Vásquez (2000)

La otra alternativa de cianuración va directamente relacionada con el proceso de inducción, es decir el calentamiento es realizado por acción de una corriente eléctrica que atraviesa la pieza deseada, la principal ventaja sobre el proceso de flama es que el calentamiento de la pieza se realiza de manera uniforme por sobre toda la superficie (Díaz Del Castillo, 2007).

Generalmente se utiliza este proceso para templar piezas cilíndricas, siendo este proceso el más utilizado al endurecer engranajes. Al igual que el método por flama, es necesario terminar el proceso con un revenido de esfuerzos a 200 grados.

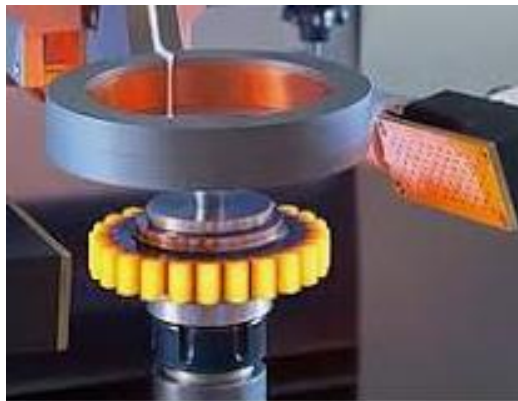


Figura 31-2. Temple por inducción en un engranaje recto

Fuente: Vásquez (2000)

2.14. Matlab

2.14.1. Introducción al software

Según Ayala (2016), Matlab se presenta como una herramienta de cálculo matemático muy potente y adaptable, con solicitudes gráficas que mejoran la experiencia de presentación de datos. Estas características han hecho que se vuelva popular como una opción de cálculo en ámbitos de la ciencia e investigación.

Una de las características más notables de Matlab, es la interfaz de usuario interactiva que permite el cálculo numérico rápido y un procesamiento de los datos de manera eficiente. Además de ello tiene varias funciones como la presentación de herramientas gráficas que permiten que la experiencia del usuario sea más sencilla, agradable y lo suficientemente eficiente para poder cumplir todas las necesidades que esté presente sin necesidad de utilizar una infinidad de softwares (Solé, 2020).

Bravo y Quevedo (2016) manifiestan que el programa MATLAB, fue creado por Cleve Moler en 1984 escrito originalmente en el lenguaje de programación FORTRAN, y su principal aplicación fue pensada para facilitar las tareas de álgebra lineal y análisis numérico sin necesidad de escribir los programas desde cero.

Sin embargo, con la evolución de sus versiones y adaptándose a las necesidades del usuario MATLAB ha evolucionado de manera excepcional a las necesidades de sus clientes presentando herramientas para el procesamiento de señales, imágenes, herramientas de investigación, área financiera, y toda área de ingeniería ya que sus herramientas y componentes permiten personalizar todo tipo de programa en función de las necesidades de quién lo programe. De igual manera su herramienta de ayuda, y corrección sintácticas y componentes revisión de las líneas de programación permiten que la experiencia del usuario al momento de programar sus necesidades sea muy intuitiva y sencilla de ejecutar (Cárdenas, 2012).

2.14.2. Introducción a la herramienta GUI

Graphical User Interface por sus siglas en inglés (GUI) es un paquete informático dentro de la aplicación de Matlab que utiliza una serie de imágenes y cuadros de acciones preprogramado para sintetizar las necesidades del usuario de manejo de sus datos y tareas como lo presenta Espinosa (2018).

La función principal de esta herramienta es facilitar la comunicación entre el usuario y el software de manera que no sea necesario considerar los procesos de programación y el lenguaje necesario para modificar y crear la interfaz gráfica.

Espinosa (2018), presenta como características de una interfaz gráfica eficiente las siguientes:

- Facilidad de comprensión y aprendizaje de su uso.
- Fácil identificación y manejo de las variables.
- Evitar componentes complejas que no aporten características significativas al programa.
- Representación fija y permanente de unas acciones preestablecidas.
- Acciones, rápidas, sencillas, reversibles y de ejecución inmediata.
- Existencia de un paquete de ayuda y consulta.

Por lo cual la interfaz gráfica de MATLAB cumple con todas las características necesarias para ser una interfaz gráfica eficiente y será seleccionada como herramienta de trabajo para este proyecto.

Barragán (2013) presenta a la GUIDE o interfaz gráfica de usuario como un entorno de programación visual que se encuentra disponible en el paquete computacional de MATLAB, el cual permite realizar y ejecutar programas cuya naturaleza solicite incluir la opción de poder ingresar datos de manera continua, su base o apariencia se asemeja mucho a los programas realizados con visual basic o visual C++.

Por su parte, Espinosa (2018) informa que el paquete de MATLAB posee tres métodos para utilizar o crear interfaces de usuario, el primero es mediante el “Comand window” o ventana de comandos del programa escribiendo una a una las líneas de programación necesarias para implementarlo en lenguaje (M).

El segundo y tercer método son más amigables con el usuario “GUIDE” es el entorno gráfico por defecto para diseñar interfaces de usuario en MATLAB, en este método se codifica las funciones de la aplicación por separado de manera que el código de entradas y salidas del sistema se encuentran en ventanas separadas.

Para iniciar la herramienta GUIDE de MATLAB, basta con dirigirse al comand window y escribir la instrucción “guideMATLAB” con lo cual se abrirá a continuación la siguiente ventana de proyecto nuevo.

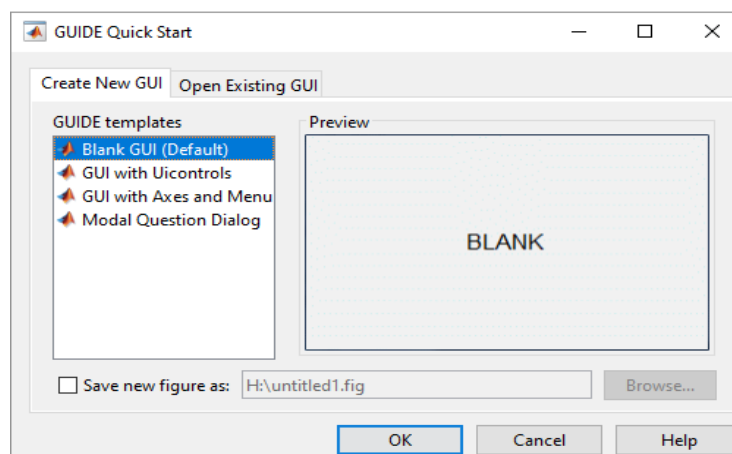


Figura 32-2. Ventana de inicio GUIDE

Fuente: Barragán (2013)

Se selecciona modelo en blanco y posteriormente se comienza a diseñar la interfaz requerida, cambiar las propiedades, tamaño de los elementos y tipo de letra es bastante sencillo, y desde la ventana de comandos principal se crea las entradas y salidas del sistema en función de los datos que se proporcione.

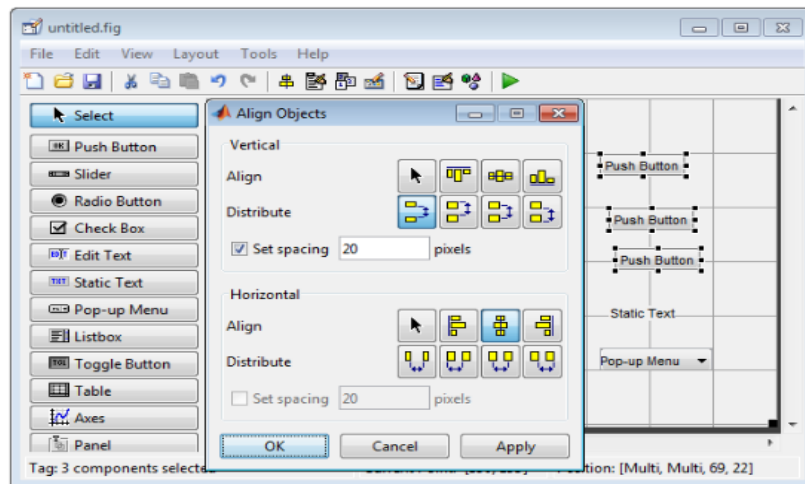


Figura 33-2. Ventana de trabajo GUIDE.

Fuente: Barragán (2013)

Finalmente, la tercera opción integrada desde la versión 2016a de MATLAB, es APP Designer según Espinosa (2018) es un entorno gráfico que integra el editor de funciones de MATLAB, de manera que el diseño gráfico y el código de ejecución del mismo trabajan conjuntamente, por lo tanto, los cambios que se realicen en alguna de las partes, se refleja inmediatamente en la otra. Para ejecutar APP Designer en MATLAB, basta con abrir el comand window o ventana de comandos y escribir la instrucción “appdesigner”.

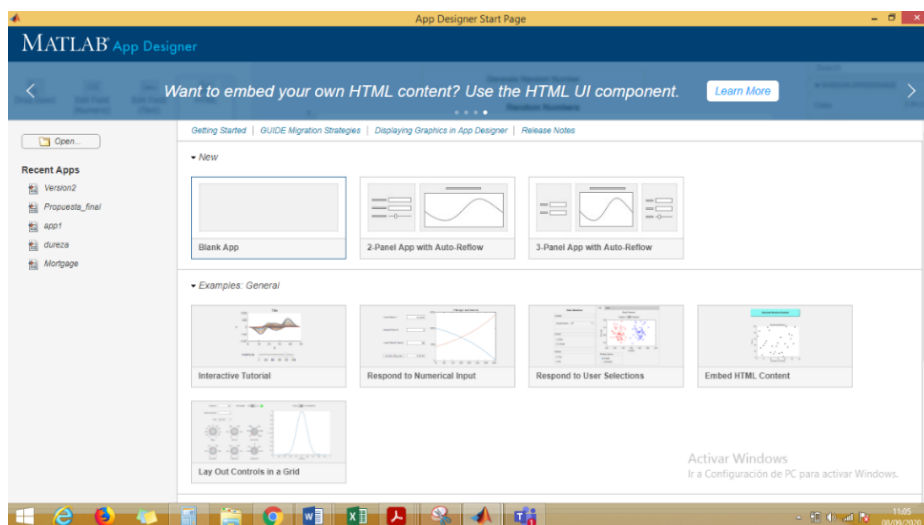


Figura 34-2. Interfaz gráfica APP Designer.

Fuente: MENA, José (2020)

Se selecciona la app en blanco y se procede a incluir los elementos necesarios para el desarrollo de la interfaz gráfica que se desee obtener.

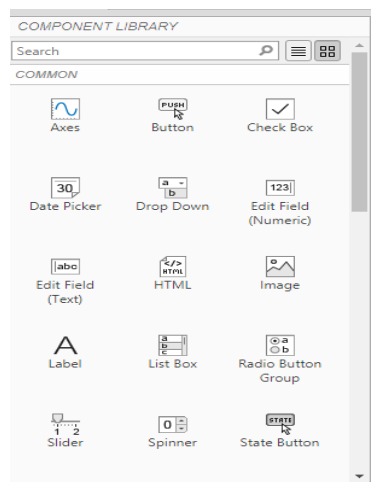


Figura 35-2. Librería de componentes APP Designer.

Fuente: MENA, José (2020)

En la librería de componentes encontramos todos los elementos que se puede utilizar para el desarrollo del programa, botones, campos de texto, numéricas, barras desplegables, selector de fechas, entre otras que permitirán la adquisición y presentación de los datos necesarios.

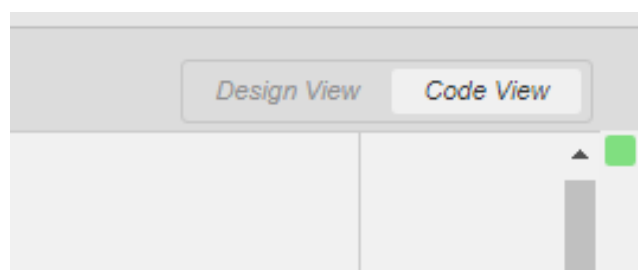


Figura 36-2. Opciones de desarrollador APP Designer

Fuente: MENA, José (2020)

Como se mencionó anteriormente uno de los puntos favorables de APP Designer sobre el resto de las opciones, es la función de cambio entre la interfaz gráfica y el código abiertamente, únicamente con dar un click sobre la opción deseada.

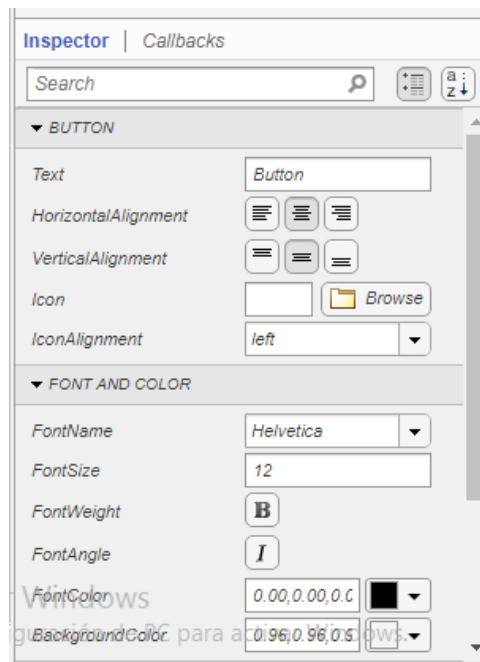


Figura 37-2. Inspector de propiedades APP Designer.

Fuente: MENA, José (2020)

Las propiedades, forma, entradas y salidas de cada elemento de la interfaz que se diseña se modifican a partir del código fuente, y de las herramientas que nos brinda el inspector de propiedades propio de la aplicación.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Modalidad de la Investigación

La presente investigación tiene como finalidad obtener las herramientas necesarias teórico-conceptuales, evaluar las fórmulas presentadas en la bibliografía seleccionada, adaptarlas a las circunstancias del problema planteado, ordenar, interpretar y utilizar de manera adecuada los datos obtenidos. Definir variables dependientes e independientes y en base a esta información formular un software capaz de calcular la velocidad de desgaste abrasivo de ruedas dentadas mediante una herramienta gráfica de usuario de Matlab.

3.2. Técnicas de Investigación

Las técnicas utilizadas en el proceso de esta investigación se enfocarán en dos aspectos principales.

- **Documental-Bibliográfica:** Se ha recolectado libros, revistas certificadas, artículos científicos y manuales de usuario en torno al desgaste abrasivo de ruedas dentadas y el uso de Matlab, esta información servirá de base para discretizar y adaptar las ecuaciones de cálculo y modelos matemáticos al problema planteado y nos guiará en el proceso de construcción de la herramienta gráfica de Matlab.
- **Teórico-Experimental:** Una vez obtenido el software, la validez de las ecuaciones se evaluarán en función de los resultados planteados, la similitud entre los modelos matemáticos, y las tendencias de la velocidad de desgaste al variar los parámetros de las ecuaciones, se obtendrá un valor de error, y se intentará ajustar las constantes de las ecuaciones para aproximarse de una manera adecuada a valores reales, que permitan tener primeras aproximaciones de diseño.

3.3. Diseño del proyecto

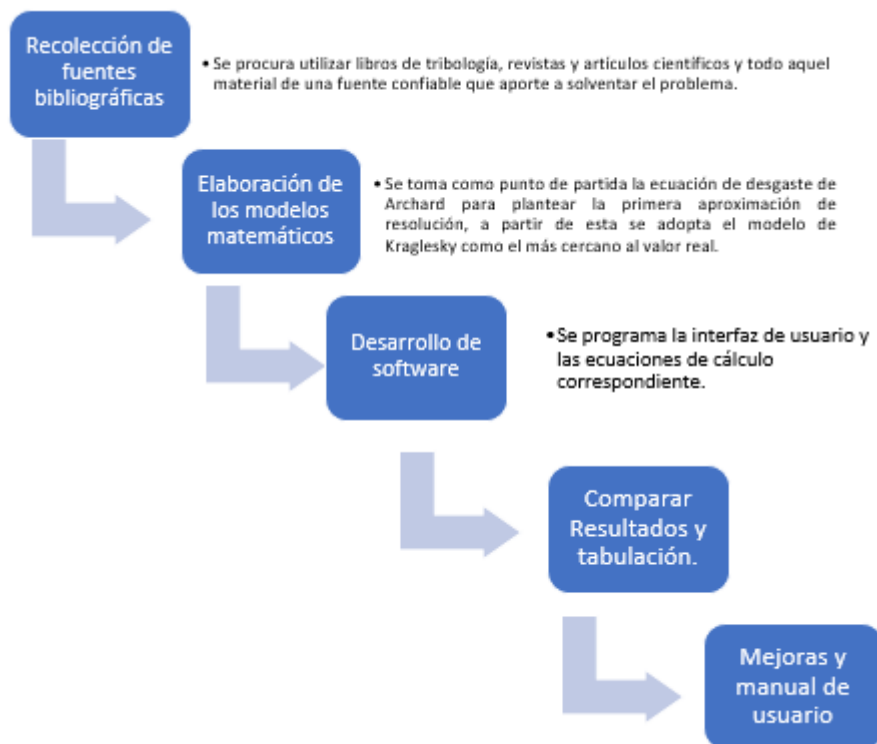


Figura 38-3. Diagrama de proceso del proyecto

Fuente: MENA, José (2020)

3.4. Presupuesto

Tabla 3-3. Presupuesto

Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Valor total
1	Capacitación uso de herramienta gráfica de Matlab	205	205 USD
1	Licencia de Matlab completo anual	940	940 USD
Total			1145 USD

Fuente: MENA, José (2020); Autofinanciamiento

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

Para el cálculo de la velocidad de desgaste por abrasión en ruedas dentadas se utilizó la ecuación de Archard de desgaste como primera aproximación, posteriormente se utiliza el modelo matemático formado por Kragelsky para tener una idea más cercana del valor real, se programan ambos métodos en una versión beta del software diseñado con la herramienta gráfica de Matlab, se generan resultados, se prueba la aplicación de cálculo, se varía cuestiones de forma y se busca la manera de que sea lo más amigable posible para el usuario. Finalmente, con todas las correcciones encontradas en el proceso se programa la versión final de la aplicación, se compila para hacerlo independiente de Matlab y se generan los gráficos de resultados con los datos obtenidos al variar los parámetros con la ayuda de Excel. Como paso final se crea un manual de usuario del software y se presentan los resultados.

4.1. Ecuación de Archard

Para lograr caracterizar, y cuantificar el desgaste abrasivo en un engranaje, es importante definir las variables involucradas en el proceso.

Partiendo de la Ecuación y modelo de Archard para determinar el desgaste de elementos metálicos por abrasión.

Ecuación 4-4. Modelo inicial de desgaste (Archard)

$$W = K_{proceso} \frac{P L}{HB}$$

Donde: W es la pérdida volumétrica del elemento, K la constante que determina las condiciones del proceso, P la carga normal en el elemento, L la longitud o distancia recorrida, y HB la dureza Brinell del material base o más suave.

Podemos extrapolar las diferentes condiciones al caso de estudio, engranajes rectos o helicoidales en los cuales es necesario obtener la carga normal para cada caso. Partiendo de la hipótesis que la fuerza total en un engranaje viene dada por la ecuación

Ecuación 5-4. Fuerza en un engranaje, en función de la potencia.

$$F = 19100 \frac{\text{Potencia}}{De * n}$$

Dónde: F es la fuerza total de contacto en engranajes, P la potencia de la máquina en KW, De es el diámetro exterior y n la velocidad angular.

Ecuación 6-4. Diámetro exterior del engranaje.

$$De = z * m + 2m \cos(\tan^{-1}(z))$$

Dónde: z es el número de dientes y m el módulo del engranaje.

- Para el engranaje recto, La fuerza normal aplicada en el proceso viene dada por

$$P_{normal} = F \sin \theta$$

Con theta igual al ángulo de presión del engranaje

- Para el engranaje helicoidal

Ecuación 7-4. Fuerza normal en un engranaje helicoidal.

$$P_{normal} = F * \sin \theta_t * \cos \psi$$

Dónde: ψ = ángulo de hélice, θ_t = ángulo de presión transversal

Para introducir el tiempo como una variable en la fórmula de Archard base es necesario relacionar la distancia recorrida en el proceso de abrasión con el desplazamiento lineal de la superficie de un engranaje al momento que se encuentra la máquina en funcionamiento. De tal modo se parte de la ecuación.

Ecuación 8-4. Longitud de contacto.

$$L = \frac{D_p * n * t}{2}$$

Dónde: n igual a la velocidad angular, t es la variable de tiempo, y Dp el diámetro primitivo del engranaje.

Ecuación 9-4. Diámetro de paso

$$Dp = z * m$$

Dónde: D_e , es diámetro exterior, m el módulo del engranaje, y z el número de dientes del engranaje.

A partir de estas consideraciones se obtiene la ecuación base para medir la velocidad de desgaste de engranajes rectos y helicoidales.

Ecuación de Archard Velocidad de Desgaste Engranaje Recto

$$\frac{W}{t} = K_{proceso} \frac{\frac{19100 * potencia}{D_e} * sen\theta * (\frac{Dp * n}{2})}{HB}$$

Ecuación 10-4. Ecuación de Archard Velocidad De Desgaste Engranaje Recto

$$V = K_{proceso} \frac{\frac{19100 * potencia}{D_e} * sen\theta * (\frac{Dp * n}{2})}{HB}$$

Ecuación de Archard Velocidad de Desgaste Engranaje Helicoidal

$$\frac{W}{t} = K_{proceso} \frac{\frac{19100 * potencia}{D_e} * sen\phi * cos\psi * \frac{Dp * n}{2}}{HB}$$

Ecuación 11-4. Ecuación de Archard Velocidad de Desgaste Engranaje Helicoidal

$$V = K_{proceso} \frac{\frac{19100 * potencia}{D_e} * sen\phi * cos\psi * \frac{Dp * n}{2}}{HB}$$

Una parte indispensable para determinar el proceso es definir la constante “ $K_{proceso}$ ” para cada uno de los casos deseados, en donde factores como la resistencia de los materiales, el tipo de contacto, el régimen de lubricación y las diferentes condiciones de la partícula abrasiva hacen mucho efecto, dicho valor se encuentra tabulado en las tablas a continuación.

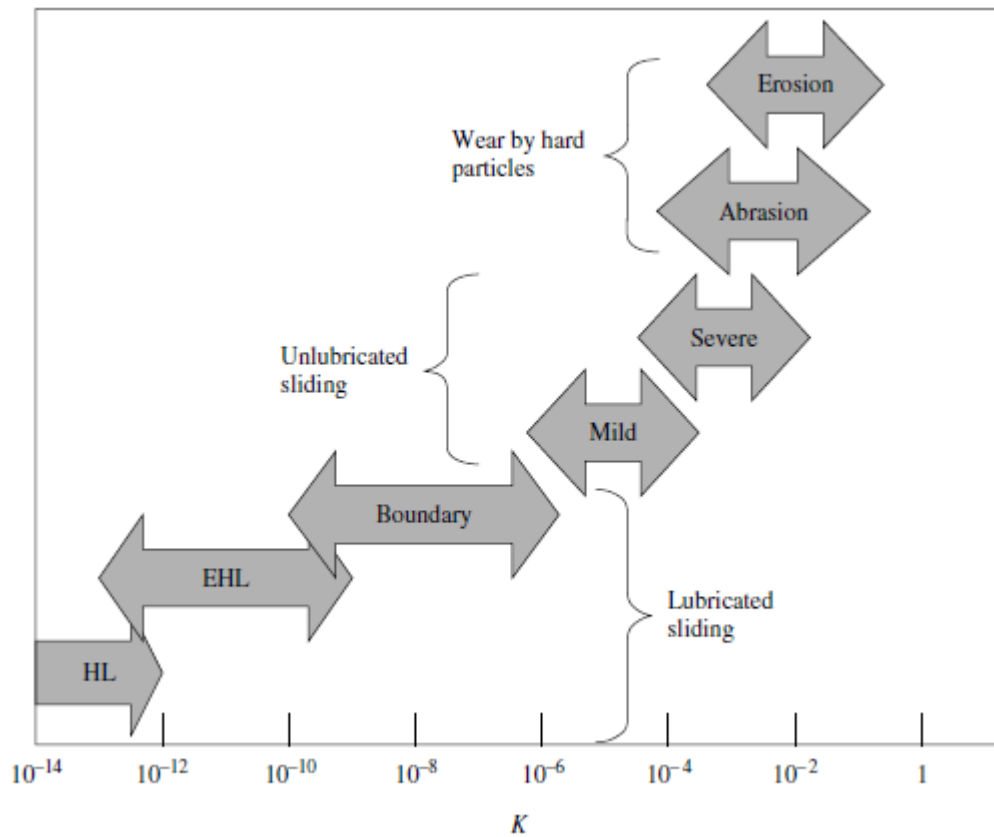


Figura 39-4. Rango de constantes de desgaste

Fuente: (Gwidow, 2006)

En función del siguiente gráfico se puede tener una idea bastante clara de las constantes de desgaste para cada uno de los procesos, donde para el interés del estudio nos enfocaremos en dos grandes grupos, superficies con lubricación con un rango de constante de desgaste con valores entre $10E-14$ y $10E-5$ y el desgaste por abrasión con valores de constantes entre $10E-4$ y 1.

Para ello se tabuló en base a Gwidow (2006) las siguientes tablas con constantes de desgaste referenciales utilizadas en investigaciones previas.

Tabla 4-4. Valores referenciales de Constantes de desgaste.

TIPO DE LUBRICANTE	CONSTANTE (K) E-18
PAO4	139
Black Carbon	119
MCMB	74
Cs-700	67
Cs-2400	55
DESGASTE MEDIO SIN LUBRICACIÓN	CONSTANTE (K) E-3
Acero endurecido con cobre	0.037
Acero endurecido con acero SAE 1	0.055
Bronce con bronce	0.20
Contacto entre aceros endurecidos	0.13

Contacto entre aceros inoxidables.	7
TAMAÑO DE LA PARTÍCULA ABRASIVA (UM)	CONSTANTE (K) E-4
5	2.40
15	4.89
27	15.29
100	24.11

Fuente: (Pallavi, 2007)

4.2. Ecuación de Kragelsky

Ecuación 12-4. Velocidad de desgaste abrasivo Kraglesky.

$$V = \frac{A K}{M}$$

Dónde: A Propiedades de la partícula abrasiva, K condiciones geométricas y de forma que varíen el contacto entre las superficies como el tipo de piezas y M parámetro propiedades mecánicas del material

4.2.1. Parámetros que intervienen en la Ecuación

Las variables necesarias para caracterizar a la ecuación de Kraglesky se dividen en tres parámetros, el término correspondiente a la partícula abrasiva, donde las propiedades mecánicas, tamaño y composición del material abrasivo modifican las características de la misma en función de la ecuación presentada a continuación.

Ecuación 13-4. Propiedades de la partícula abrasiva Kragelsky

$$A = \epsilon^{2/3} r^{0.5} g^{2.5}$$

Dónde ϵ , la concentración en porcentaje de volumen de la partícula abrasiva en el fluido que rodea al sistema de transmisión, g es el esfuerzo condicional de ruptura medido en [kgf/ mm²] y r es el radio promedio de las partículas abrasivas en [mm].

Con esta aproximación se nota claramente que la concentración y el tamaño de la partícula son variables que influyen en las condiciones del proceso por lo cual es importante definir ciertas variables o condiciones comunes del mismo.

Tabla 5-4. Tamaño de los tipos de partículas abrasivas

Granulometría del suelo	Rango de tamaño de la partícula (mm)
Bloque	600 >
Piedra	250-600
Grava	75-250
Arena gruesa	0.5-1
Arena Media	0.25-0.5
Arena fina	0.05-0.25
Arcilla	<0.002

Fuente: MENA, José (2020)

Siguiendo el mismo contexto el factor (M) relacionado con las propiedades mecánicas del material base es directamente proporcional a la dureza y el porcentaje de elongación del material que se desea analizar.

Ecuación 14-4. Parámetro propiedades mecánicas del material. Kragelsky

$$M = \varepsilon_0^t HB_1^{1.5} HB_2$$

Dónde ε_0^t corresponde al porcentaje de elongación del material antes de la ruptura, t es un parámetro adimensional característico del contacto entre cuerpos. Y HB son las correspondientes durezas de los materiales que formen el par tribológico del proceso medido en escala Brinell.

Finalmente, en el factor (K) se involucran todas aquellas condiciones geométricas y de forma que varíen el contacto entre las superficies como el tipo de piezas, tamaño de las mismas, y condiciones de lubricación y distribución de fuerzas de contacto entre los elementos del par tribológico.

- Engranaje de dientes rectos

$$K = (m * (z1 + z2) \sin \vartheta)^{0.5} * 0.106 * n$$

- Engranaje helicoidal

$$K = \left(\frac{m * (z1 + z2) \sin \vartheta}{\cos \psi (1 - \cos^2 \vartheta * \sin^2 \psi)} \right)^{0.5} * 0.106 * n$$

Dónde: Z1 y Z2 son el número de dientes de los engranajes involucrados en el proceso, ϑ es el ángulo de presión, ψ el ángulo de hélice, m el módulo de los engranes y n la velocidad angular a la que trabajan.

Por lo tanto, el cálculo de la velocidad de desgaste por abrasión se resume de la siguiente manera según Kraglesky.

Ecuación de Kraglesky Velocidad de Desgaste Engranaje Recto

Ecuación 15-4. Ecuación de Kraglesky Velocidad de Desgaste Engranaje Recto

$$V = 576 * \frac{(\epsilon^{2/3} r^{0.5} g^{2.5})}{\epsilon_0^t HB_1^{1.5} HB_2} (m * (z1 + z2) \sin\theta)^{0.5} * 0.106 * n$$

Ecuación de Kraglesky Velocidad de Desgaste Engranaje Helicoidal

Ecuación 16-4. Ecuación de Kraglesky velocidad de desgaste engranaje helicoidal

$$V = 576 * \frac{(\epsilon^{2/3} r^{0.5} g^{2.5})}{\epsilon_0^t HB_1^{1.5} HB_2} * \left(\frac{m * (z1 + z2) \sin\theta}{\cos\psi (1 - \cos\theta^2 * \text{sen}\psi^2)} \right)^{0.5} * 0.106 * n$$

4.3. Diseño de la herramienta gráfica de usuario Matlab

La herramienta gráfica de usuario que provee Matlab a través de su apartado de APP Designer, es muy amigable para el usuario, permitiendo un sinnúmero de utilidades y aplicaciones que se adaptan a todas las necesidades que se tengan. Razón por la cual se seleccionó esta herramienta como medio para diseñar el software que permita el cálculo de la velocidad de desgaste por abrasión en ruedas dentadas.

Figura 40-4. Versión 1 App cálculo de la velocidad de desgaste.

Fuente: MENA, José (2020)

Al abrir Matlab se selecciona la utilidad de APP Designer como medio de trabajo, se evalúa las herramientas que esta ofrece y en función de los datos de entrada se establece una primera aproximación de la apariencia del software para las ecuaciones previamente seleccionadas.

Posteriormente, se evalúa las entradas y salidas necesarias del sistema para cada una de las ecuaciones y se plantea el segundo modelo de versión de prueba, tomando en cuenta detalles que mejoren la experiencia del usuario como un botón de ayuda, tabla de conversión de unidades y otros factores que no permitan cometer errores de formulación innecesarios, es decir se busca evitar datos repetitivos, o minimizar la entrada de datos si los valores necesarios pueden calcularse a partir de los ya obtenidos.

Calculo de la velocidad de desgaste abrasivo

AYUDA ?

Caracterización del sistema

Tipo de engranaje: Recto Helicoidal

Módulo del sistema [mm]:

Tipo de Ecuación: Kraglesky

Conversión de durezas: ?

Durezas típicas: ?

Caracterización del engranaje 1

Material: BRONCE

Dureza superficial [HB]:

Porcentaje de elongación:

Número de dientes:

ángulo de presión [°]:

Frecuencia de giro [rev/min]:

ángulo de hélice [°]:

Caracterización del engranaje 2

Material: BRONCE

Dureza superficial [HB]:

Porcentaje de elongación:

Número de dientes:

ángulo de presión [°]:

ángulo de hélice [°]:

Frecuencia de giro [rev/min]:

Caracterización de la partícula abrasiva

Tipo de partícula: Arena de cuarzo

Radio promedio del grano [mm]:

Concentración en volumen(%):

CALCULAR

Velocidad de desgaste engrane 1 [um/h]:

Velocidad de desgaste engrane 2 [um/h]:

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Fundada en 1912

Riobamba - Ecuador

Figura 41-4. Versión 2 App cálculo de la velocidad de desgaste.

Fuente: MENA, José (2020)

A partir de esta versión más robusta de diseño de la interfaz gráfica se procede a realizar las correcciones necesarias del proceso, y crear las ventanas complementarias. También se procede a la programación del Backend de la herramienta donde cada dato tomará el nombre de una variable, se programará el algoritmo de selección de los datos y también de la selección del tipo de ecuación y de engranaje, y se procederá a introducir los modelos matemáticos que permitirán tener como resultado la velocidad de desgaste por abrasión en ruedas dentadas medido en micrómetros por hora.

4.3.1. Declaración de variables

En función de las necesidades de datos de las ecuaciones y para tener claro los nombres de las variables que serán utilizados en el proceso de programación en este apartado se detallará el símbolo y el nombre de cada una de ellas.

ϑ (theta) = ángulo de presión

ψ (psi) = ángulo de hélice

z_1 = número de dientes engranaje 1

z_2 = número de dientes engranaje 2

m = módulo de los engranajes

P = potencia de la máquina

H_1 = Dureza material 1 (Brinell)

H_2 = Dureza material 2 (Brinell)

K_{Arch} = constante del proceso ecuación de Archard.

n = velocidad angular

r_g = tamaño de grano promedio de la partícula abrasiva

c_v = concentración en volúmen de la partícula abrasiva

E_{o1} = porcentaje de elongación material del engranaje 1

E_{o2} = porcentaje de elongación material del engranaje 2

4.3.2. Propuesta final interfaz gráfica.

En base a las variables necesarias, y las demandas requeridas para el correcto funcionamiento del software planteado para el cálculo de velocidades de desgaste de ruedas dentadas por abrasión con los métodos de Archard y Kraglesky se plantea la siguiente interfaz final, con el propósito que sea amigable para el usuario y tenga un aspecto agradable a la vista.

El enfoque de la presentación de la interfaz mejorará la determinación de las variables y para el usuario brindará los parámetros iniciales de mejora visual para la interpretación de los datos, que arrojaran los cálculos ejecutados en la APP tomando en cuenta que tipo de ecuación se utiliza para el análisis y los datos que poseen para el cálculo del índice de desgaste con presencia de abrasivos en engranajes de perfil evolvente.

Calculo de la velocidad de desgaste abrasivo AYUDA ?

Caracterización del sistema

Tipo de engranaje: Recto Helicoidal

Módulo del sistema [mm]:

ángulo de presión [°]:

ángulo de hélice [°]:

Potencia de la máquina [HP]:

Tipo de Ecuación:

Conversión de durezas:

Durezas típicas:

Caracterización del engranaje 1

Material:

Dureza superficial [HB]:

Porcentaje de elongación:

Número de dientes:

Frecuencia de giro [rev/min]:

Caracterización de la partícula abrasiva

Tipo de partícula:

Radio promedio del grano [mm]:

Concentración en volumen(%):

Velocidad de desgaste engrane 1 [um/h]:

Velocidad de desgaste engrane 2 [um/h]:

Figura 42-4. Propuesta final de herramienta gráfica para el cálculo de velocidad de desgaste
Fuente: MENA, José (2020)

El modelo que se muestra es la página principal muestra 4 partes o módulos enfocados cada uno de ellos a una tarea dentro del cálculo deseado.

El primero de ellos se ilustra en la figura a continuación mostrada, se refiere a la caracterización del sistema, en donde se necesita definir el tipo de engranajes a calcular. Se define el módulo, ángulo de presión y de ser el caso de engranajes helicoidales el ángulo de hélice de los mismos, así como la potencia de las máquinas donde actúa el sistema de engranaje seleccionado para análisis.

Caracterización del sistema

Tipo de engranaje: Recto Helicoidal

Módulo del sistema [mm]:

ángulo de presión [°]:

ángulo de hélice [°]:

Potencia de la máquina [HP]:

Figura 43-4. Caracterización del sistema de análisis.
Fuente: MENA, José (2020)

La siguiente etapa del sistema gráfico se encarga de recolectar los datos necesarios para la caracterización de los engranajes. En este apartado se selecciona el material de cada uno de los engranajes, se define la dureza en Brinell de cada uno de ellos, su porcentaje de elongación y la frecuencia de giro de uno de los engranajes, siendo estos uno de los puntos más importantes en el cálculo de la velocidad de desgaste.

Caracterización del engranaje 1

Material: BRONCE

Dureza: ACEROS

Porcentaje de elongación: POLÍMEROS

Número de dientes: 43

Frecuencia de giro [rev/min]: 1430

Caracterización del engranaje 2

Material: BRONCE

Dureza superficial [HB]: 200

Porcentaje de elongación: 15

Número de dientes: 100

Frecuencia de giro [rev/min]: 614.4

Figura 44-4. Caracterización de los engranajes.

Fuente: MENA, José (2020)

El siguiente punto destacable de la interfaz gráfica es el apartado donde permite seleccionar el modelo matemático con el cuál se realizará el cálculo de la velocidad de desgaste.

Tipo de Ecuación: Kraglesky

Conversión de dureza: Kraglesky, Archard

Figura 45-4. Tipo de modelo matemático

Fuente: MENA, José (2020)

La caracterización de la partícula abrasiva conforma otro punto de interés dentro del programa, este punto se centra en definir el tipo de la partícula, el tamaño promedio de los granos que intervienen en el proceso y la concentración en volumen de la partícula en el medio donde se desarrollan los engranajes.

Figura 46-4. Caracterización de la partícula abrasiva.

Fuente: MENA, José (2020)

Figura 47-4. Tipos de partícula abrasiva que permite la herramienta.

Fuente: MENA, José (2020)

El punto final dentro de la secuencia de cálculo establecida para la interfaz gráfica consiste en el espacio del botón calcular, que arrojará el valor de la velocidad de desgaste por abrasión en las ruedas dentadas 1 y 2 respectivamente medido en micrómetros por hora [um/h] y se podrá leer en los espacios señalados. También es importante afirmar que el software cuenta con un botón de ayuda donde se desplegará el manual de usuario y dos botones complementarios con una tabla de conversión de durezas entre las diferentes escalas, y otro botón de durezas, porcentajes de elongación y constantes del proceso recomendadas para diferentes cálculos.

Figura 48-4. Cálculo y presentación de resultados.

Fuente: MENA, José (2020)

Como complementos se encuentran tres botones auxiliares de color diferenciado, aquellos de color celeste, son botones que activan herramientas complementarias, como una tabla de

conversión de unidades, y un apartado con durezas típicas de los engranajes si no se conoce el valor exacto del mismo. El botón de color rojo, despliega el manual de usuario.

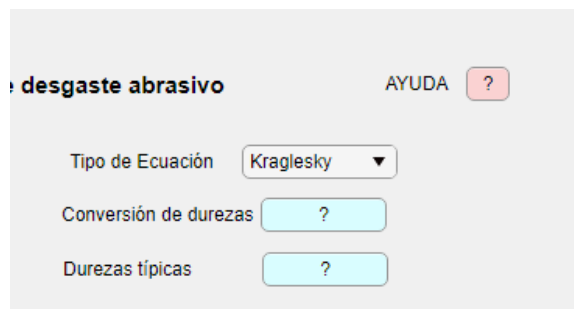


Figura 49-4. Botones complementarios

Fuente: MENA, José (2020)

La ilustración a continuación presenta la versión de prueba del manual de usuario, programado únicamente como ejemplo para probar la funcionalidad del software, posteriormente se incorporará la versión del manual de usuario real.

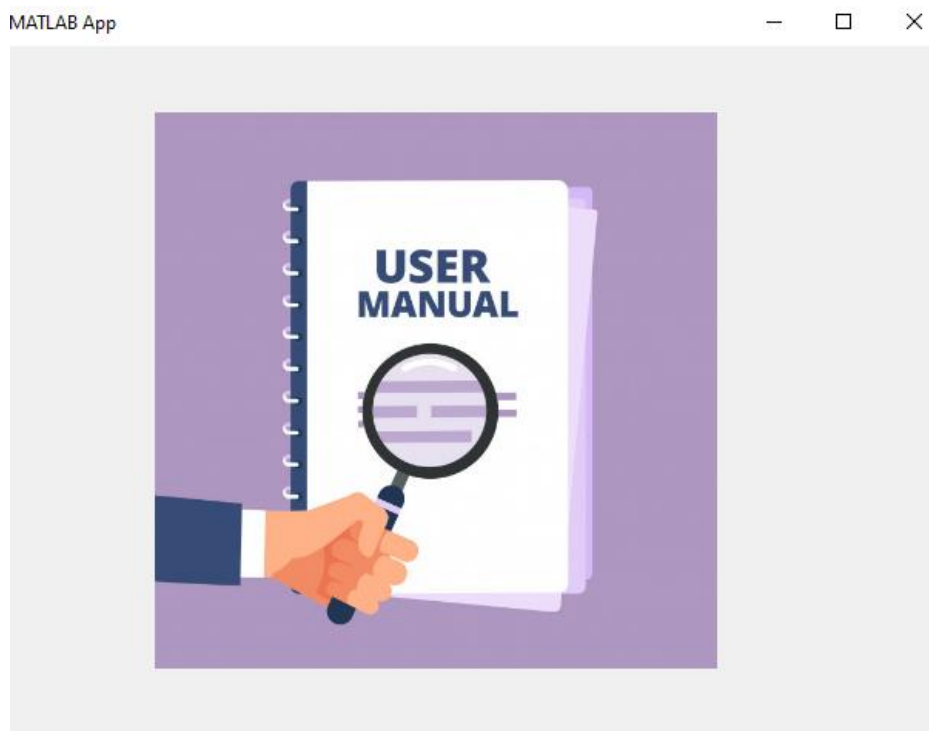


Figura 50-4. Desplegable Manual versión beta

Fuente: MENA, José (2020)

DUREZA BRINELL				DUREZA VICKERS				DUREZA ROCKWELL				DUREZA BRINELL				DUREZA VICKERS				DUREZA ROCKWELL					
HB	HV	HRB	HRC	HB	HV	HRB	HRC	HB	HV	HRB	HRC	HB	HV	HRB	HRC	HB	HV	HRB	HRC	HB	HV	HRB	HRC		
92	97	53,6		154	162	82,3		213	224	95,6		309	325			309	325			309	325		33		
94	99	54,9		156	164	83		215	228	96,1			313	329			313	329			313	329		33	
96	101	56,8		157	165	83,4		217	228	96,4			317	333			317	333			317	333		34	
97	102	57,7		158	166	83,7		219	230	96,7			321	337			321	337			321	337		34	
99	104	58,6		160	168	84,3		222	233	97,2			325	342			325	342			325	342		35	
101	106	59,9		161	169	84,7		224	235	97,5			329	346			329	346			329	346		35	
103	108	61,1		163	171	85,2		226	237	97,8			333	350			333	350			333	350		36	
105	110	62,3		164	172	85,5		228	241	98,2			337	354			337	354			337	354		36	
107	112	63,3		166	174	85,9		231	243	98,5	21		341	358			341	358			341	358		37	
109	115	64,5		167	175	86,2		234	246		22		345	362			345	362			345	362		37	
111	117	65,2		169	178	86,6		236	248		22		350	368			350	368			350	368		38	
114	120	66,5		170	179	86,9		239	251		22		354	372			354	372			354	372		38	
116	122	67,6		172	181	87,3		241	253		23		359	377			359	377			359	377		39	
118	124	68,7		174	183	87,8		244	256		24		363	381			363	381			363	381		39	
121	127	69,9		175	184	88,1		246	258		24		368	386			368	386			368	386		40	
123	129	71		177	186	88,5		249	262		24		373	392			373	392			373	392		40	
126	132	72		179	188	89		252	265		25		378	397			378	397			378	397		41	
128	134	73,1		180	189	89,3		255	268		25		383	402			383	402			383	402		41	
131	138	74,2		182	191	89,7		257	270		26		388	407			388	407			388	407		42	
134	141	75,2		184	193	90,2		260	273		26		393	413			393	413			393	413		42	
137	144	76,5		185	194	90,4		263	277		27		398	418			398	418			398	418		43	
138	145	76,9		187	196	90,8		266	279		27		404	424			404	424			404	424		43	
139	146	77,2		188	199	91,3		269	283		28		409	430			409	430			409	430		44	
140	147	77,6		191	201	91,7		272	286		28		415	436			415	436			415	436		44	
141	148	78		193	203	92,2		275	289		28		420	441			420	441			420	441		45	
143	150	78,7		195	205	92,6		278	292		29		426	447			426	447			426	447		45	
144	151	79		197	207	93,1		282	296		29		432	454			432	454			432	454		46	
145	152	79,4		198	208	93,3		285	299		30		438	460			438	460			438	460		46	
146	153	79,7		200	210	93,6		288	302		30		444	466			444	466			444	466		47	
148	155	80,4		202	212	93,8		292	307		31		451	473			451	473			451	473		48	
149	157	80,7		204	214	94		295	310		31		457	480			457	480			457	480		48	
150	158	81		207	217	94,6		298	313		31		463	487			463	487			463	487		49	
152	160	81,7		209	220	95		302	317		32		470	494			470	494			470	494		50	
153	161	82		211	222	95,4		306	321		32		477	501			477	501			477	501		51	
																									52

Figura 51-4. Tabla de conversión de durezas

Fuente: MENA, José (2020)

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1. Comparación de los modelos matemáticos

Para este punto, se busca, tener una comparación de los modelos matemáticos, tener en cuenta sus diferencias, y comparar los resultados para los casos de gráficas con engranajes rectos y helicoidales, de esta manera se pueda apreciar una tendencia en los modelos, asegurarse que no haya datos con notables errores y probar la validez del modelo en cada caso, de tal manera que permita limitar los casos aislados y entender en qué momento y bajo qué condiciones es pertinente utilizar cada uno de los modelos planteados.

Para ello se tomarán dos sencillos análisis, el primero de ellos mostrado en la tabla a continuación, en donde se varía el número de dientes de uno de los engranajes y se pretende calcular la velocidad de desgaste tanto en el caso de engranajes rectos y engranajes helicoidales para cada una de las ruedas dentadas involucradas en el proceso.

Se mantienen constante las durezas y el porcentaje de elongación del material base de ambas ruedas en 250HB y 18%, también se mantiene fija la frecuencia de la rueda dentada uno en 1430 rpm. El módulo del sistema se fija en 4 y los ángulos de presión en 20 y 21 grados respectivamente.

Para el uso de la Ecuación de Archard, se toma como potencia promedio de la máquina a evaluar 200HP, y en cuanto a la caracterización de la partícula para la ecuación o modelo de Kraglesky, se toma arena de cuarzo con un tamaño de grano promedio de 0.05 mm y 4% de concentración en volumen en el medio que los rodea.

Para el segundo caso de análisis se tomará los datos previamente planteados, con la diferencia que se mantendrán fijos los números de diente de los engranajes involucrados en 43 y se varía la dureza superficial del segundo engranaje. Se calculará de igual manera la velocidad de desgaste para cada engranaje en el caso que sean rectos y helicoidales.

Tabla 6-5. Velocidad de desgaste con número de dientes del engranaje 2 variable, ejemplo 1

Número de dientes		Engranaje recto				Engranaje helicoidal			
		Velocidad de desgaste 1		Velocidad de desgaste 2		Velocidad de desgaste 1		Velocidad de desgaste 2	
z1	z2	Archar d (um/h)	Kragles ky (um/h)	Archar d (um/h)	Kragles ky (um/h)	Archar d (um/h)	Kragles ky (um/h)	Archar d (um/h)	Kragles ky (um/h)
43	10	17,42	15,03	73,54	64,63	18,66	16,52	78,77	71,03
43	12	17,42	15,31	61,65	54,86	18,66	16,83	66,03	60,3
43	15	17,42	15,72	49,56	45,07	18,66	17,28	53,09	49,54
43	20	17,42	16,39	37,31	35,23	18,66	18,01	39,97	38,72
43	25	17,42	17,02	29,91	29,28	18,66	18,71	32,03	32,18
43	43	17,42	19,14	18,66	19,14	18,66	21,04	18,66	21,04
43	50	17,42	19,91	14,99	17,12	18,66	21,88	16,05	18,82
43	60	17,42	20,95	12,49	15,02	18,66	23,03	13,38	16,5

Fuente: MENA, José (2020)

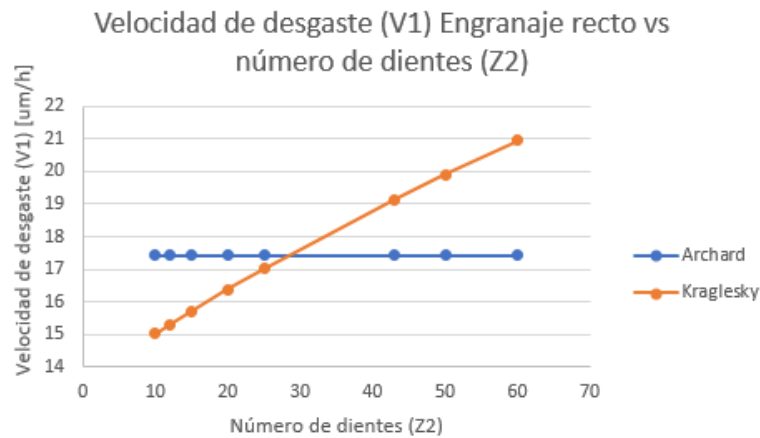


Figura 52-5. Velocidad de desgaste engranaje recto 1 vs número de dientes

Fuente: MENA, José (2020)

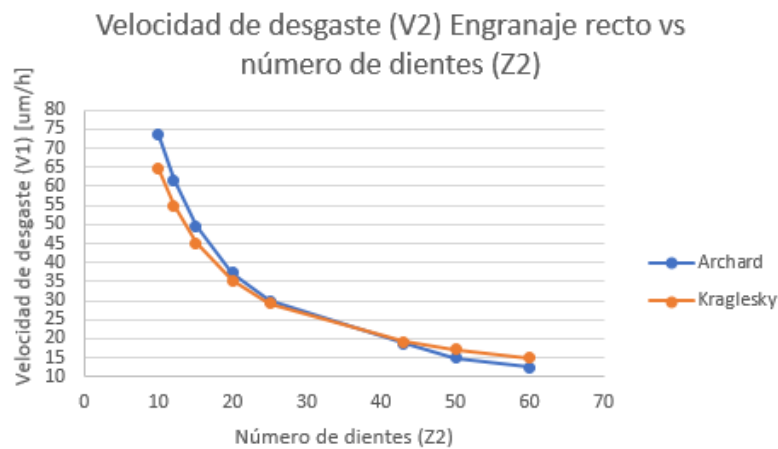


Figura 53-5. Velocidad de desgaste en engranaje recto 2 vs número de dientes

Fuente: MENA, José (2020)

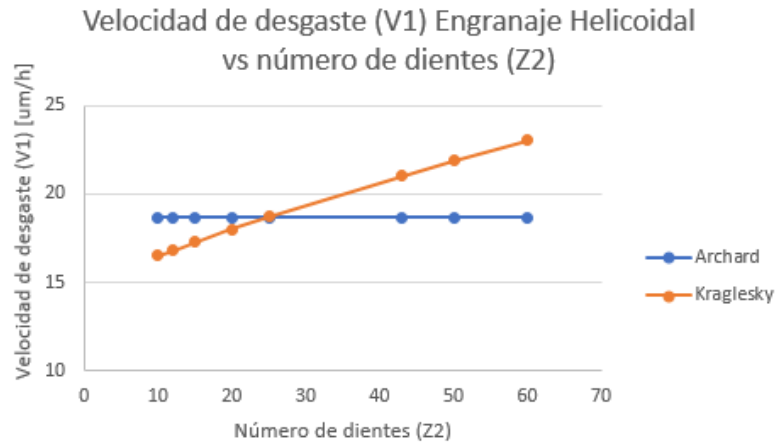


Figura 54-5. Velocidad de desgaste en engranaje helicoidal 1 vs número de dientes

Fuente: MENA, José (2020)

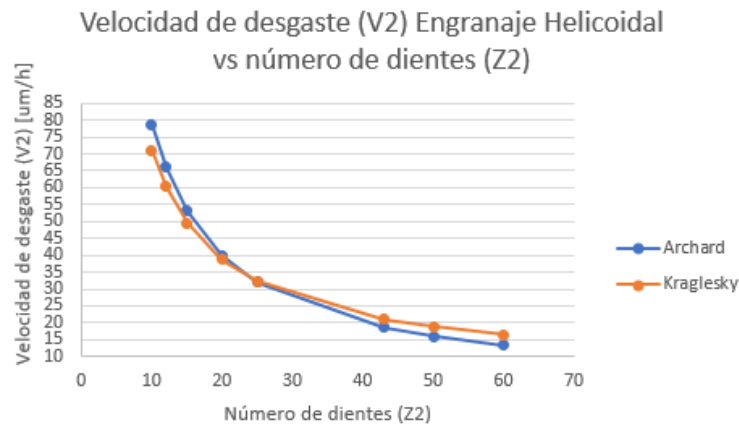


Figura 55-5. Velocidad de desgaste en engranaje helicoidal 2 vs número de dientes

Fuente: MENA, José (2020)

Tabla 7-5. Velocidad de desgaste con dureza del diente del engranaje 2 variable, ejemplo 2

Número de dientes		Engranaje recto				Engranaje helicoidal			
		Velocidad de desgaste 1		Velocidad de desgaste 2		Velocidad de desgaste 1		Velocidad de desgaste 2	
HB 1	HB 2	Archar d (um/h)	Kragles ky (um/h)	Archar d (um/h)	Kragles ky (um/h)	Archar d (um/h)	Kragles ky (um/h)	Archar d (um/h)	Kragles ky (um/h)
250	150	17,42	31,91	29,04	41,91	18,66	35,07	31,11	45,28
250	170	17,42	28,15	25,62	34,14	18,66	30,95	27,45	37,53
250	190	17,42	25,19	22,93	28,9	18,66	27,69	24,56	31,76
250	220	17,42	21,76	19,8	23,19	18,66	23,91	21,21	25,49
250	250	17,42	19,14	17,42	19,14	18,66	21,04	18,66	21,04
250	280	17,42	17,09	15,56	16,15	18,66	18,79	16,66	17,75
250	300	17,42	15,95	14,52	14,56	18,66	17,54	15,55	16,01
250	350	17,42	13,67	12,45	11,56	18,66	15,03	13,33	12,7

Fuente: MENA, José (2020)

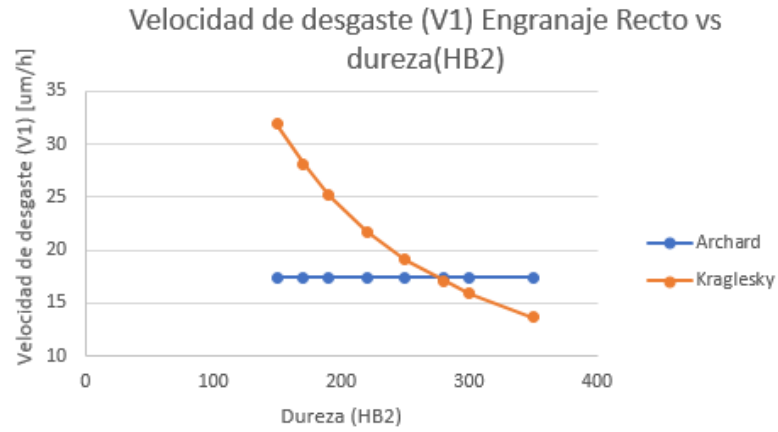


Figura 56-5. Velocidad de desgaste en engranaje recto 1 vs Dureza

Fuente: MENA, José (2020)

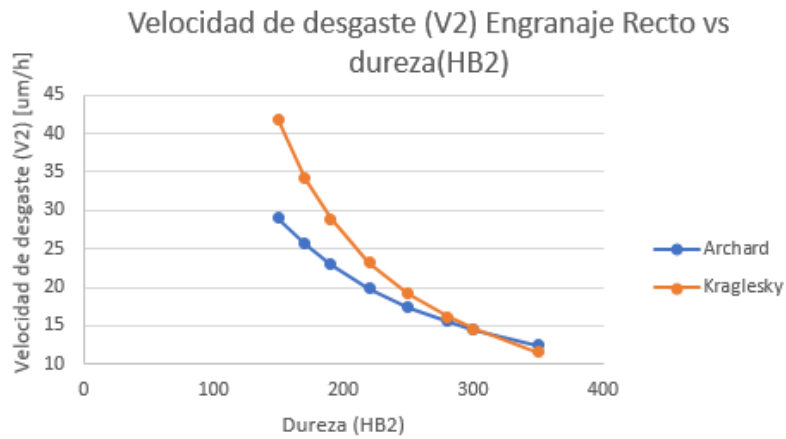


Figura 57-5. Velocidad de desgaste en engranaje recto 2 vs Dureza

Fuente: MENA, José (2020)

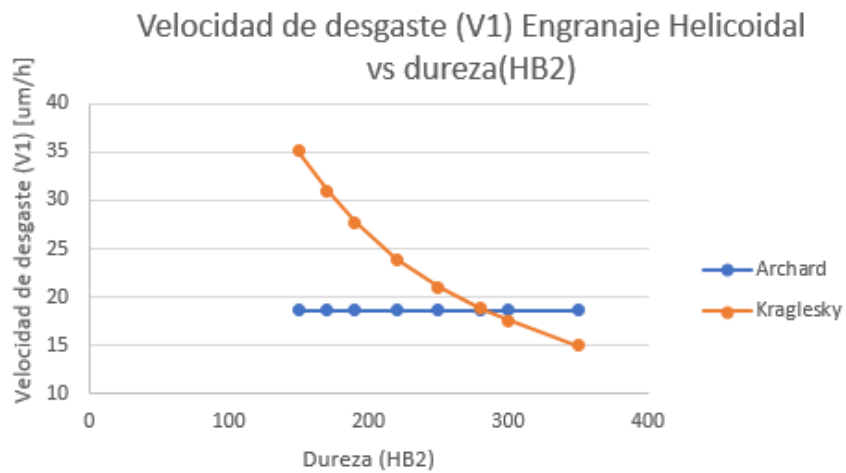


Figura 58-5. Velocidad de desgaste en engranaje helicoidal 1 vs Dureza

Fuente: MENA, José (2020)

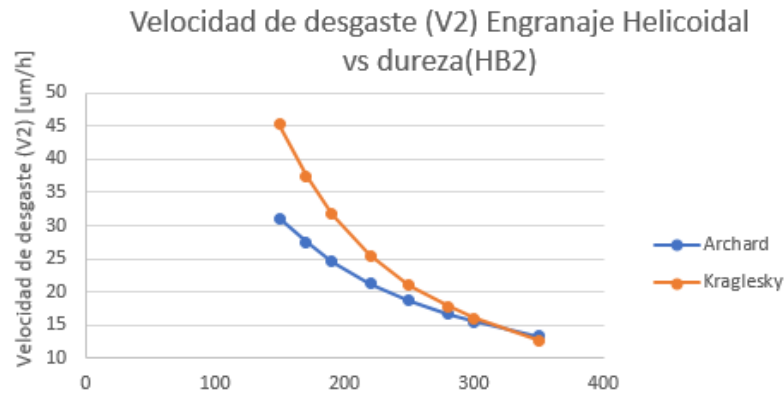


Figura 59-5. Velocidad de desgaste en engranaje helicoidal 2 vs Dureza

Fuente: MENA, José (2020)

5.2. Resultados y discusión

- Los modelos matemáticos de Archard y Kraglesky cumplen con la función de la investigación, calcular la velocidad de desgaste abrasivo al cambiar datos como el tipo de material, velocidad, tamaño, tipo de partícula abrasiva, entre otras características propias del contacto tribológico planteado sin embargo cada uno de estos modelos funciona mejor para casos específicos.
- Los datos indispensables que se debe conocer para poder calcular la velocidad de desgaste con estos modelos son: El módulo del sistema, los ángulos de presión para engranajes rectos, así como presión y hélice para engranajes helicoidales, el tipo de material de los engranajes a evaluar y con ello propiedades como la dureza y el porcentaje de elongación de los mismos. También es necesario conocer la frecuencia de giro de uno de los engranajes.
- El modelo de Archard es útil para un cálculo rápido, donde no se conoce el tipo o tamaño de la partícula abrasiva, pero si se conoce la potencia de la máquina o del eje donde se desarrollan los engranajes. Este modelo es útil para evaluar los engranajes por separado y tener una idea de que sucede con cada uno de ellos, sin embargo, es muy simple y las constantes del proceso no se encuentran bien definidas.
- El modelo de Kraglesky por su parte es útil y es una mejor aproximación al cálculo de la velocidad de desgaste pues toma en cuenta factores como el tipo de partícula abrasiva, y la interacción entre los engranajes, pero de igual manera es importante definir las constantes del proceso de manera experimental para tener un resultado acercado a la realidad.
- La herramienta gráfica de Matlab, es muy útil para formular un software capaz de calcular la velocidad de desgaste en función de los datos de entrada que se plantearon.

Se utilizaron las herramientas pre programadas, como cuadros de texto, selectores, etc. Y se adecuaron a las necesidades que se requería, también se formuló varias ventanas complementarias como el manual de usuario, cuadro de conversión de durezas que fueron vinculadas a la interfaz central. Y se compiló la herramienta para tener una sola app final.

5.3. Comprobación de la Hipótesis

En relación a la hipótesis planteada: “El desarrollo de una interfaz gráfica de usuario (GUI) si acelerará el cálculo de la velocidad de desgaste abrasivo en engranajes de dientes rectos y helicoidales con perfil evolvente.”

Con la herramienta de GUIDE de Matlab fue posible diseñar la estructura y modelar un software capaz de calcular la velocidad de desgaste por abrasión en engranajes rectos y helicoidales con perfil evolvente. Con el uso de las ecuaciones base existentes se logra discretizar los datos necesarios en los modelos de Archard y Kraglesky y adaptarlos a las necesidades que se necesita cubrir.

Para el primer modelo matemático fue necesario una interpretación del fenómeno de estudio donde la potencia de la máquina, el tipo de engranaje, la velocidad de operación son los parámetros que se enfatizan en ese modelo, el cual permite calcular individualmente el desgaste en un engranaje sin considerar la interacción con su par por lo cual es útil como una primera aproximación.

Posteriormente se utiliza la ecuación de Kraglesky, este modelo matemático considera la interacción entre los dos miembros del par tribológico, así como el tamaño y tipo de partícula abrasiva. De este modo es un modelo más formal que permitirá llegar a mejores resultados más cercanos a la realidad.

Al comparar los modelos en los resultados obtenidos, se obtiene gráficas (de los ejemplos de cálculo del punto 5.) que siguen la misma tendencia por lo cual se puede afirmar que los modelos utilizados, así como la disposición de los datos en el software agilizan el cálculo de la velocidad de desgaste por abrasión en ruedas dentadas y permiten evaluar la incidencia de los parámetros que conforman el par tribológico en el resultado de la velocidad de desgaste.

Con los resultados obtenidos a través del desarrollo de esta investigación, se puede comprobar la hipótesis. El software desarrollado permitirá calcular de manera más ágil la velocidad de desgaste

abrasivo para engranajes de perfil evolvente, sin embargo, es necesario aclarar que los datos para este cálculo deben ser completamente conocidos, incluyendo las constantes del proceso debido a factores como lubricación, temperatura y no homogeneidad del proceso para que el resultado sea completamente real, y la única manera de comprobar estas condiciones es contrastar los resultados con métodos experimentales.

La segunda parte de la comprobación de esta hipótesis radica en la incidencia de los diferentes parámetros como la dureza de los materiales, tamaño de los engranajes, velocidad de operación entre otros. La cual puede ser evaluada gracias a variar sencillamente en el software estos datos, y tener aproximaciones bastante reales con respecto a la necesidad que se quiera lograr con los engranajes.

5.3.1. Evaluación del modelo matemático de Kraglesky con un caso investigativo.

Ante las aproximaciones reales que se realizan se toma en cuenta el proceso propuesto por (KE, y otros, 2019) que se basa de un esquema basado en vibraciones para actualizar un modelo de predicción de desgaste. Se desarrolla en primer lugar un modelo dinámico de un sistema de engranajes rectos para generar vibraciones realistas, lo que permite un estudio cuantitativo de los efectos del desgaste de la superficie de los dientes del engranaje. La velocidad de deslizamiento y las fuerzas de contacto del modelo se utilizan en combinación con el conocido modelo de desgaste de Archard para calcular la profundidad de desgaste en cada punto de contacto en la malla.

Dado que el coeficiente de desgaste en el modelo no es constante durante el proceso de desgaste (y en cualquier caso es difícil de estimar inicialmente), las vibraciones medidas se comparan con las generadas por el modelo, para actualizar el coeficiente cuando se detecta una desviación de las predicciones. (KE, y otros, 2019) .

- Datos para el cálculo

Acero dulce AISI 1045

Módulo: 2

Ángulo de presión: 20

Potencia: 4 kW (5,3641 HP)

Dureza: 163 HB

Porcentaje de elongación: 16

Numero de dientes: piñón 19 engranaje 52

Frecuencia: 600 rpm

Promedio de grano: 0,5

Concentración de volumen: 4-10%

Abrasivo: Propio material

- a. **Comparación del modelo del paper:** Según (KE, y otros, 2019): Los engranajes se hicieron funcionar en condiciones secas con una velocidad de rotación de 10 Hz (600 rpm) y un par del eje de entrada de 10 Nm. Las mediciones de vibración se recogieron cada 10 minutos (es decir, cada 6000 rotaciones del piñón). Se obtuvieron tres mediciones después de la calibración y antes de una falla catastrófica de los dientes del piñón, que ocurrió poco después de 18000 ciclos. (KE, y otros, 2019, Pág. 1414)

Tabla 8-5. Tabla de datos de la medición de rotación

Ciclos de rotación	Paper Investigativo	
	Modelado Paper (μm)	Experimento (μm)
X	y1	y2
0	0	0
6000	158,00	219,00
12000	435,00	372,00
18000	748,00	792,00

Fuente: MENA, José (2020)

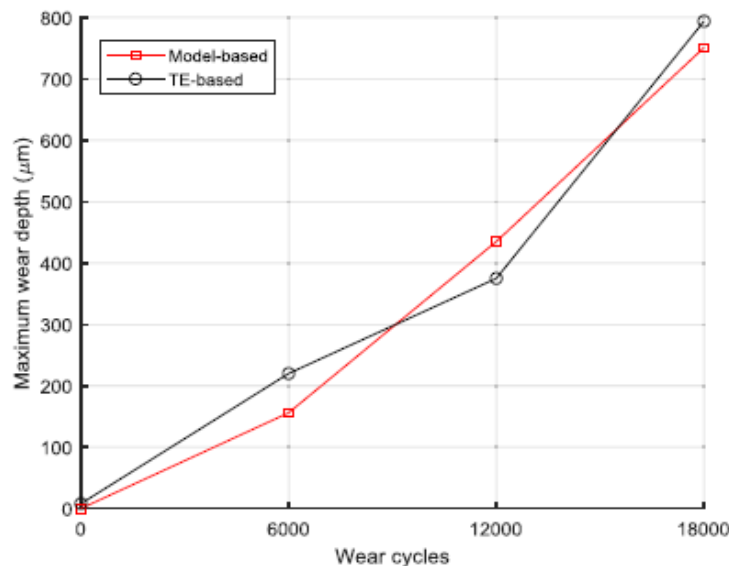


Figura 60-5. Resultados de la profundidad de desgaste: experimento y modelo.

Fuente: (KE, y otros, 2019)

Los autores del paper en análisis (KE, y otros, 2019) establecen que en cada momento de medición, después de la primera actualización (10 min), la profundidad máxima de desgaste

prevista fue estimado en 156 μm (tenga en cuenta que esta y las siguientes cifras de profundidad de desgaste representan el desgaste combinado de los dos perfiles: el del piñón solo es aproximadamente el 73% de esta cifra). La concordancia de la predicción para 12.000 ciclos con los correspondientes resultados experimentales muestra la eficacia del procedimiento de actualización del modelo. Se consideró que no era necesaria una segunda actualización a los 12.000 ciclos, dada la ya baja discrepancia entre los valores RMS. La proyección adicional de RMS y profundidad de desgaste para otros 6.000 ciclos muestra que esta elección fue razonable, dando un error de predicción de aproximadamente 13% en RMS y 7% en profundidad de desgaste a 18.000 ciclos (es decir, 12.000 ciclos desde la última actualización). Una falla repentina de los engranajes (debido al nivel extremo de desgaste) impidió cualquier actualización y predicción adicionales, pero conceptualmente, el error del 13% de RMS a 18.000 ciclos justificaría una actualización (KE, y otros, 2019).

- b. Evaluación del modelo experimental del paper con el modelo de Kragelsky en la APP de Matlab:** En esta parte del análisis se determina el cálculo del porcentaje de error para verificar la coincidencia de los datos de la aplicación de la ecuación de Kragelsky con los datos del modelo experimental; para graficar el modelo experimental del análisis de la predicción de desgaste abrasivo con el uso de vibraciones.

Tabla 9-5. Tabla de datos de la medición de rotación

Ciclos de rotación	Paper Investigativo		Investigación		Porcentaje de error	
	Modelado Paper (μm)	Experimento (μm)	APP de Matlab (μm) Kragelsky	APP de Matlab (μm) Archard	Modelado vs APP	Experimento vs APP
X	y1	y2	y3	y4		
0	0	0	0	0		
6000	158,00	219,00	239,17	32,04	51%	9%
12000	435,00	372,00	431,17	64,09	-1%	16%
18000	748,00	792,00	717,67	96,13	4%	9%

Fuente: MENA, José (2020)

Los datos indicados son extraídos del gráfico presentado en el Paper de predicción de desgaste abrasivo mediante el uso de vibraciones; donde se ejecuta un análisis primario entre un modelo matemático (línea azul) y el parámetro experimental (puntos anaranjados); se adjuntan los datos de cálculo del modelo matemático utilizado en la presente investigación que es el de Kragelsky (línea ploma) y la ecuación de Archard (línea amarilla); estos datos se muestran graficados a continuación.

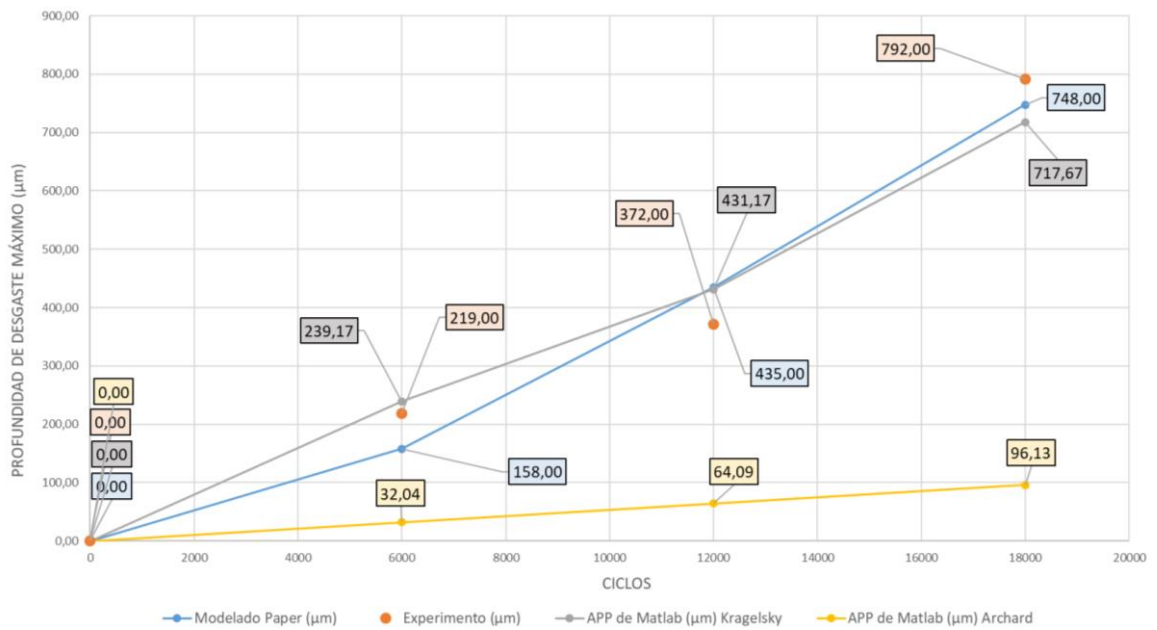


Figura 61-5. Resultados de la comparación de datos entre paper y datos calculados

Fuente: MENA, José (2020)

Para solventar el análisis de los datos obtenidos por los modelos matemáticos en la aplicación de Matlab y la experimentación del paper, la prioridad es solventar que los datos calculados en el Matlab ingresen en un rango que ayuden a determinar que tanto coincide los datos obtenidos en el programa.

Por lo expuesto, se tomará en cuenta y se verifica si los datos que se calcularon mediante la aplicación de Matlab se encuentran dentro de los rangos permisibles para que los datos sean los adecuados. Para el cálculo se toma en cuenta el proceso de la realización del error medio cuadrático ya que este procedimiento es un estimador que ayuda a medir el promedio de los errores al cuadrado, es decir, se analiza la diferencia entre el estimador y lo que se estima. Siendo esta función como un evaluador de riesgo correspondiente al valor esperado de la pérdida del error al cuadrado o pérdida cuadrática. La diferencia se produce debido a la aleatoriedad o porque el estimador no tiene en cuenta la información que podría producir una estimación más precisa.

Ecuación 17-5. Ecuación del error medio cuadrático

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_e - Y_c)^2$$

Dónde:

Ye: valor de experimentación

Yc: valor calculado

n: número de datos

Con la ecuación del error medio cuadrático se procede a realizar el cálculo de la diferencia del proceso de aleatoriedad para producir una estimación más precisa. Los datos seleccionados son los de la tabla 9-5 donde se especifican los valores que se van a utilizar para la determinación de la pérdida esperada.

$$ECM = \frac{1}{4} \{(219 - 239,17)^2 + (372 - 431,17)^2 + (792 - 717,67)^2\}$$

$$ECM = 48,56 \%$$

Tabla 10-5. Tabla de cálculo del error medio cuadrático

	Experimento vs Kragelsky (APP)	Experimento vs modelado paper
	0,00	0,00
	406,69	3721,00
	3500,69	3969,00
	5525,44	1936,00
Suma total	9432,83	9626,00
1/n	2358,21	2406,50
Valor calculado	48,56 %	49,06 %

Fuente: MENA, José (2020)

Se analiza los valores de cálculo en el cual se especifica la efectividad de acercamiento a los datos del experimento; prueba de ello se establece que el manejo del modelo matemático de Kragelsky para la predicción del índice de desgaste es efectiva con un 48,56 % de que los datos que se calculan ingresan dentro del rango de los valores del experimento de desgaste. Conviene especificar que el modelo matemático del paper brinda un valor del 49,06 % de aproximación a los valores experimentales donde se destaca que en el análisis de la hipótesis se menciona que la efectividad de la ecuación de Kragelsky es alta para el cálculo de la velocidad de desgaste, ya que poseen datos que engloban el tamaño y porcentaje de abrasivo; es por eso que la efectividad de los datos es sumamente factible para que se tome en cuenta en la determinación del índice de desgaste en elementos mecánicos.

CONCLUSIONES

- Se ha seleccionado dos modelos matemáticos de Archard y Kraglesky, se ha identificado correctamente las variables necesarias y la utilidad de cada uno de estos para la determinación del cálculo de la velocidad de desgaste por abrasión; tomando en cuenta el análisis con el paper de estudio y el análisis del error cuadrático realizado entre los valores obtenidos del experimento y las ecuaciones, se obtiene que el dato más adecuado es el de Kragelsky con un 48,56% de error con relación al 49,06% que emite el error cuadrático del modelo matemático del paper vs los datos del experimento cumpliendo con el primer objetivo específico.
- Para la herramienta gráfica construida con la ayuda de la aplicación gráfica de usuario (GUIDE) de Matlab, se logró que cumpla con los requisitos necesarios para calcular la velocidad de desgaste abrasivo en ruedas dentadas, al tener lo más claro posible las variables que debe ingresar el usuario como los datos del tipo de abrasivo a analizar, la programación acorde a los modelos matemáticos en estudio; logrando evitar errores no intencionales, y tener opciones de ayuda para el usuario para conocer variables desconocidas para el usuario con lo cual se cumple el segundo y tercer objetivo específico.
- Los resultados obtenidos con el software pudieron ser tabulados, y graficados en Excel para comparar la tendencia de los mismos, como se presentó en el apartado de resultados de manera que se establece que al ejecutar variabilidad en los datos se puede establecer la mejor decisión para diseñar un engranaje bajo características específicas y que el diseñador posea datos que pueden mejorar la funcionalidad del elemento mecánico realizando lo anterior se corrobora el cumplimiento del objetivo 4.
- Con la comprobación de la hipótesis y la explicación brindada al respecto, se comprueba la validez del objetivo principal, donde queda claro que el software diseñado como producto de esta investigación, permite el cálculo de la velocidad de desgaste por abrasión en ruedas dentadas rectas o helicoidales con perfil evolvente; además, establece datos de predicción para la toma de decisiones para la ejecución de programas de mantenimientos y de prevención de fallas catastróficas que perjudiquen el área de trabajo y personal a cargo de maquinaria.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda establecer que el complemento perfecto para el software obtenido, es una base de datos con experimentos en engranajes y diferentes abrasivos que permitan corroborar los datos y del mismo modo calibrar las constantes de los procesos en diferentes condiciones de trabajo bajo régimen de lubricación y funcionamiento controlado.
- Se recomienda utilizar el software y repotenciarlo para no solo utilizarlo para la predicción del desgaste abrasivo en engranajes sino buscar las formas de incluir elementos mecánicos que generen fricción y con regímenes de lubricación definidos.
- Es muy útil utilizar el software con criterio y tener claro todos los datos y terminologías utilizadas en engranajes para de esta manera tener un uso correcto de la herramienta al considerar que es una aproximación leve de la realidad y optimizar el tiempo de trabajo; por lo tanto, se considera construir un prototipo para la ejecución de pruebas y determinar el calculo de los datos que emite el software con cálculos experimentales.
- Comprobar los datos obtenidos, así como las constantes utilizadas en el proceso de manera experimental es completamente necesario para un uso ingenieril de los resultados del software, sin embargo, es muy útil para aproximaciones de diseño y planes de mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- ALSIMET. (12 de diciembre de 2019). *Aplicación del bronce en la industria: Tipologías y prestaciones*. Obtenido de <http://alsimet.es/es/noticias/aplicaciones-bronce-industria>
- Barragan, D. (2013). *Manual de interfaz gráfica de usuario en matlab*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Obtenido de Matpic: https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10740/11/MATLAB_GUIDE.pdf
- Belzunce, F. (2001). *Aceros y fundiciones. Estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Benítez, L. (2017). *Las fallas en los engranajes*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Bravo, O., & Quevedo, F. (2 de enero de 2016). *Matlab 6.1*. Obtenido de <http://www.fce.unal.edu.co/unidad-de-informatica/proyectos-de-estudio/ejes-tematicos-transversales/software-libre-y-propietario/1161-matlab-6-1.html>
- Caballero, J., Aperador, W., & Delgado, A. (2014). *Determinación del Desgaste por Erosión en Materiales Recubiertos*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Caidedo, H., Valdés, J., & Coronado, J. (2005). *Caracterización de recubrimientos duros frente al desgaste abrasivo a tres cuerpos*. Bogotá: TECNURA.
- Calatayud, S. (2016). *Diseño y cálculo de un reductor de velocidad con relación de transmisión 34,22 y par máximo a la salida de 3531 Nm*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Cárdenas, J. (2012). *Sistema de codificación de señales de voz a texto usando Matlab*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.
- Carro, R., & González, D. (2015). *Diseño y selección de procesos*. Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Castillo, W., & Toapanta, O. (2019). *Principios de tribología aplicados en la Ingeniería Mecánica*. Alicante: Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L.
- Cimiano, G. (1 de julio de 2002). *Introducción a los tratamientos térmicos*. Obtenido de <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/2506-Introduccion-a-los-tratamientos-termicos.html>
- CLR. (21 de agosto de 2020). *¿Qué es un engranaje cónico y cómo funciona?* Obtenido de <https://clr.es/blog/es/engranaje-conico-como-funciona/>
- Díaz Del Castillo, F. (2007). *Endurecimiento superficial del acero*. Cuatitlán: Facultad de Estudios Superiores Cuatitlán.
- Díaz del Castillo, F. (2017). *Tribología: Fricción, desgaste y lubricación*. Cuatitlán: UNAM.
- Duque, P. (2017). *Guía técnica para el diseño y cálculo de engranajes para reductores de velocidad*. Valparaiso: Universidad Técnica Federico Santa María.

- E.C.I. (2008). *Tratamientos Térmicos Protocolo*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Engranabreider. (17 de Mayo de 2016). *Engranajes*. Obtenido de Tipos de engranajes: <http://engranabreider.blogspot.com/2016/05/tipos-de-engranajes.html>
- Espinosa, G. (2018). *Programación de interfaz gráfica en APP Designer para el control vectorial de motores de imanes permanentes*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de UPM: http://oa.upm.es/53343/1/TFG_GUILLERMO_CID_ESPINOSA.pdf
- Fernandez, A., & García, P. (2012). *Máquinas y mecanismos*. Santander: Universidad de Cantabria. Obtenido de Engranajes cilíndricos: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2949/course/section/2799/Tema%2012%20-%20Engranajes.pdf>
- Fernández, L. (2012). *Desarrollo de un procedimiento para el cálculo de la fuerza de fricción en un contacto EHD validación experimental del procedimiento*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Gamboa, H. (2006). *Análisis tensional en transmisiones de engranajes rectos mediante el método de elementos finitos*. Quito: Universidad Politécnica Nacional. Obtenido de EPN: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/61/1/CD-0030.pdf>
- Gómez, M. (2015). *Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Gordillo, S. (2010). *Estudio del tratamiento térmico de templado y revenido en la fundición de hierro dúctil con matriz metálica ferrítica*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Guerrero, E. (2017). *Fluidos viscosos*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Gutiérrez, W., Olaya, J., & Torres, M. (2015). *Construcción de un equipo para desgaste abrasivo según norma ASTM G-65*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Gwidow, S. (2006). *WEAR. Material, mechanisms and Practice*. Wiley.
- Industrial Sourcing. (14 de julio de 2016). *Engranajes*. Obtenido de <https://www.gestiondecompras.com/es/productos/componentes-mecanicos-y-de-ferreteria/engranajes>
- Ingemecánica. (25 de septiembre de 2020). *Transmisiones por Engranajes*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>
- Instituto Azteco. (23 de febrero de 2017). *Fenómeno de desgaste por abrasión*. Obtenido de <https://institutoasteco.com/asteco/desgastes/>
- Knowledge Based Engineering. (2015). *Aplicación al diseño de engranajes de ejes paralelos con Catia v5*. Washington: KBE.
- Kragelsky, I. V. (1977). *Friction and wear calculation methods*. Great Britain : Wheaton and Co.

- KE, F., BORGHESANI, P., SMITH, W., RANDALL, R., CHIN, Z., REN, J., & PENG, Z. (2019). Vibration-based updating of wear prediction for spur gears. *Wear*, 1410–1415. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164819300353>
- Lindis. (13 de julio de 2019). *Procesos de tratamiento térmico para engranajes: para mejorar tanto la superficie como la dureza del núcleo del engranaje*. Obtenido de https://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/FeriaVirtual/Producto-Procesos-de-tratamiento-termico-para-engranajes-KHK-174058.html
- Luna, C. (2011). Tratamientos termoquímicos. *Revista para profesionales de la enseñanza No. 14 mayo*, 1 - 10.
- Macmillan. (2018). *Técnicas básicas de mecanizado Unidad 5*. Madrid: Macmillan Education.
- Marinescu, I., & Rowe, W. B. (2012). *Tribology of Abrasive Machining Processes*. USA: Elsevier Inc.
- Masterhacks, B. (2017). *Fundamentos de engranajes*. Obtenido de Engranajes: <https://docplayer.es/83597922-Engranajes-helicoidales.html>
- Mexpolímeros. (5 de noviembre de 2020). *Engranajes de plástico*. Obtenido de <https://www.mexpolimeros.com/engranajes.html>
- Mideros, A. (2013). *Diseño de un laboratorio de análisis de aceites lubricantes en la ESPOL para sustentar programas de mantenimiento predictivo*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Millán, S. (2006). *Procedimientos de Mecanizado*. Madrid: Editorial Paraninfo.
- Mirian, A. (2016). *El software Matlab en las simulaciones matemáticas de las tendencias y comportamientos de las variables financieras y económicas en los estudiantes de la carrera de Ingeniería Comercial de la UTC*. Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi. Obtenido de Universidad técnica de Cotopaxi: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/2163/1/T-UTC-3872.pdf>
- MOTOREx. (20 de Junio de 2019). *Qué es un engranaje recto*. Obtenido de Engranaje: <http://www.motorex.com.pe/blog/que-es-un-engranaje-recto/>
- Moya, J., & Velásquez, J. (2007). *Cálculo de engranajes plásticos*. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2251/225115060004.pdf>
- Navarro, J., Aperador, W., & Delgado, A. (2016). Mecanizado de Acero AISI1020, Utilizando Buriles con Recubrimiento Monocapa de Nitruro de Vanadio. *Información Tecnológica Vol. 28*, 77 - 86.
- Noria. (06 de agosto de 2014). *Mecanismos básicos de desgaste*. Obtenido de <https://noria.mx/lublearn/mecanismos-basicos-de-desgaste/>
- OO., F. d. (2008). *Fe Andalucía*. Obtenido de Tratamientos Térmicos: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8426.pdf>

- Open Ji Care Port. (2014). *Manual del mantenimiento del sistema de lubricación*. Beijing: Research Institute.
- Pallavi, P. (junio de 2007). Researchgate. Obtenido de Wear coefficient K, at different abrasive sizes: https://www.researchgate.net/figure/Wear-coefficient-K-at-different-applied-loads-and-abrasive-sizes-for-the-T1-treated_tbl2_248472919
- Pérez, A. (2007). *Sistema de control, inyección y encendido, para motores térmicos y alternativos de ciclo Otto basado en programación abierta bajo LabVIEW*. Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- Remache, A., Jácome, F., Molina, J., & Celi, S. (2016). Análisis de la Microestructura del Acero V320 Sometido a Tracción y Torsión luego de un Tratamiento Térmico de Temple Subcero. *Revista Infociencia Vo. 10*, 56 - 63.
- Robles, L. (22 de febrero de 2016). *Desgaste*. México: UANL. Obtenido de UANL: http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020150052/1020150052_03.pdf
- Roda, V. (2015). *Simulación del engranaje y análisis del contacto en sistemas de transmisión por engranajes mediante la modelización avanzada del conjunto ejes - engranajes*. Castelló: Universitat Jaume.
- Romero, D., & Giraldo, J. (2018). *Análisis de falla de un engranaje de la caja de cambios de una motocicleta*. Bogotá: Fundació'n Universitaria Los Libertadores.
- Ruiz, L. (2015). *Desarrollo de métodos para la evaluación integrada de propiedades mecánicas y superficiales inducidas en materiales metálicos mediante tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Sanz, A. (18 de noviembre de 2019). *Lubricantes*. Obtenido de <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-13.php>
- SENA. (12 de febrero de 2019). *Montaje de Ruedas Dentadas*. Obtenido de https://repositorio.sena.edu.co/sitios/elementos_máquinas/vol8/volumen08.html#
- Solé, R. (26 de julio de 2020). *Definición de software de sistema, de programa y de aplicación, además de la definición de software libre y software propietario*. Obtenido de <https://hardwaresfera.com/articulos/tutoriales/definicion-de-software-de-sistema-de-programa-y-de-aplicacion-ademas-de-la-definicion-de-software-libre-y-software-propietario/>
- Stachowiak, G. (2005). *Wear Materials, Mechanisms and practice*. (G. W. Stachowiak, Ed.) Washington: John Wiley & Sons, Ltd. Obtenido de ESIME: http://dl.booktolearn.com/ebooks2/engineering/mechanical/9780123970473_engineering_tribology_fourth_edition_2fca.pdf
- Suarez, J. (2015). *Deslizamientos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- TDX. (2013). *Tratamientos térmicos*. Madrid: Bitstream.

- Ulloa, L., & Vasco, O. (2020). *Diseño y construcción de una máquina para ensayo de engranes rectos sometidos a fatiga*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- UNICAN. (2017). *Transmisión de movimiento*. Madrid: Universidad de Cantabria.
- Vásquez, L. (diciembre de 2000). *Diseño de engranajes rectos y helicoidales asistido por computadoras*. Obtenido de Universidad Veracruzana: <http://colaboracion.uv.mx/insting/Tesis/2000-Mecanica-LorenzoMarcianoVazquez.pdf>
- Xunta de Galicia. (26 de octubre de 2020). *Engranajes*. Obtenido de https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/43_engranajes.html

ANEXOS

Anexo A. Código de Matlab

```
classdef Version4 < matlab.apps.AppBase
% Properties that correspond to app components
properties (Access = public)
Central matlab.ui.Figure
NmerodedientesEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
z1 matlab.ui.control.NumericEditField
ngulodehliceLabel matlab.ui.control.Label
psi matlab.ui.control.NumericEditField
tp matlab.ui.container.ButtonGroup
RectoButton matlab.ui.control.RadioButton
HelicoidalButton matlab.ui.control.RadioButton
Caracterizacindelengranaje1Label matlab.ui.control.Label
ngulodepresinLabel matlab.ui.control.Label
theta matlab.ui.control.NumericEditField
CaracterizacindelapartculaabrasivaLabel matlab.ui.control.Label
FrecuenciadegirorevminLabel matlab.ui.control.Label
n1 matlab.ui.control.NumericEditField
CALCULARButton matlab.ui.control.Button
Velocidaddedesgasteengrane1umhLabel matlab.ui.control.Label
salida matlab.ui.control.NumericEditField
RadiopromediodelgranommLabel matlab.ui.control.Label
rg matlab.ui.control.NumericEditField
MdulodelsistemammLabel matlab.ui.control.Label
m matlab.ui.control.NumericEditField
Caracterizacindelengranaje2Label matlab.ui.control.Label
NmerodedientesEditFieldLabel_2 matlab.ui.control.Label
z2 matlab.ui.control.NumericEditField
Velocidaddedesgasteengrane2umhLabel matlab.ui.control.Label
salida2 matlab.ui.control.NumericEditField
CálculodelavelocidaddedesgasteabrasivoLabel matlab.ui.control.Label
MaterialDropDownLabel matlab.ui.control.Label
Material1 matlab.ui.control.DropDown
MaterialDropDown_2Label matlab.ui.control.Label
Material2 matlab.ui.control.DropDown
TipodepartculaDropDownLabel matlab.ui.control.Label
TipodepartculaDropDown matlab.ui.control.DropDown
ConcentracinenvolumenLabel matlab.ui.control.Label
cv matlab.ui.control.NumericEditField
TipodeEcuacinDropDownLabel matlab.ui.control.Label
Ec matlab.ui.control.DropDown
Caracterizacindel sistemaLabel matlab.ui.control.Label
DurezasuperficialHBEEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
HB2 matlab.ui.control.NumericEditField
DurezasuperficialHBEEditField_2Label matlab.ui.control.Label
HB1 matlab.ui.control.NumericEditField
FrecuenciadegirorevminLabel_2 matlab.ui.control.Label
n2 matlab.ui.control.NumericEditField
```

```

Conversion matlab.ui.control.Button
ConversindedurezasLabel matlab.ui.control.Label
tabladureza matlab.ui.control.Button
DurezastpicasLabel matlab.ui.control.Label
ayuda matlab.ui.control.Button
AYUDALabel matlab.ui.control.Label
PorcentajedeelongacinLabel matlab.ui.control.Label
Eo1 matlab.ui.control.NumericEditField
PorcentajedeelongacinLabel_2 matlab.ui.control.Label
Eo2 matlab.ui.control.NumericEditField
PotenciadelamquinaHPLLabel matlab.ui.control.Label
P matlab.ui.control.NumericEditField
end
% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)
% Button pushed function: CALCULARButton
function CALCULARButtonPushed(app, event)
%% dureza y elongación
Ec=app.Ec.Value;
dp1=app.z1.Value*app.m.Value*0.001;
dp2=app.z2.Value*app.m.Value*0.001;
de1=app.z1.Value*app.m.Value + 2*app.m.Value*cosd(atand(app.z1.Value));
de1=de1*0.001;
de2=app.z2.Value*app.m.Value + 2*app.m.Value*cosd(atand(app.z2.Value));
de2=de2*0.001;
F1=19100*app.P.Value/(de1);
F2=19100*app.P.Value/(de2);
Karch=0.000005;
s=app.Material1.Value;
y=app.Material2.Value;
n1=app.n1.Value;
n2=n1*app.z1.Value/app.z2.Value;
app.n2.Value=n2
yw1=0.106
E=app.cv.Value;
stress=75;% En función de la partícula abrasiva [kg/mm2]
j=app.HelicoidalButton.Value
HB1=app.HB1.Value
HB2=app.HB2.Value
Eo1=app.Eo1.Value
Eo2=app.Eo2.Value
A=((E)^(0.667))*(((app.rg.Value))^(0.5))*((stress)^(2.5))
M1= (Eo1^2.5)*(HB1^(1.5))*HB2
M2= (Eo2^2.5)*(HB2^(1.5))*HB1
switch Ec
case 'Kraglesky'
if j==1
K1 = yw1*(n1)*((app.m.Value*(app.z1.Value +
app.z2.Value)*sind(app.theta.Value))/(cosd(app.psi.Value)*(1-
((cosd(app.theta.Value))^2*(sind(app.psi.Value))^2))))^0.5;
K2 = yw1*(n2)*((app.m.Value*(app.z1.Value +
app.z2.Value)*sind(app.theta.Value))/(cosd(app.psi.Value)*(1-
((cosd(app.theta.Value))^2*(sind(app.psi.Value))^2))))^0.5;
else

```

```

K1 = yw1*(n1)*((app.m.Value*(app.z1.Value + app.z2.Value)*sind(app.theta.Value)))^0.5
K2 = yw1*(n2)*(app.m.Value*(app.z1.Value + app.z2.Value)*sind(app.theta.Value))^0.5
end
V1=576*A*K1/M1
V2=576*A*K2/M2
case 'Archard'
if j==1
V1=Karch*0.5*F1*sind(app.theta.Value)*dp1*n1/app.HB1.Value
V2=Karch*0.5*F2*sind(app.theta.Value)*dp2*n2/app.HB2.Value
else
V1=Karch*0.5*F1*sind(app.theta.Value)*cosd(app.psi.Value)*dp1*n1/app.HB1.Value
V2=Karch*0.5*F2*sind(app.theta.Value)*cosd(app.psi.Value)*dp2*n2/app.HB2.Value
end
end
app.salida.Value = V1
app.salida2.Value = V2
end
% Value changed function: salida
function salidaValueChanged(app, event)
Value = app.salida.Value;
end
% Selection changed function: tp
function tpSelectionChanged(app, event)
selectedButton = app.tp.SelectedObject;
j=app.HelicoidalButton.Value
if j ==1;
app.psi.Visible='on'
end
end
% Button pushed function: ayuda
function ayudaButtonPushed(app, event)
AYUDA
end
% Button pushed function: Conversion
function ConversionButtonPushed(app, event)
DUREZA
end
end
% Component initialization
methods (Access = private)
% Create UIFigure and components
function createComponents(app)
% Create Central and hide until all components are created
app.Central = uifigure('Visible', 'off');
app.Central.Position = [100 100 795 624];
app.Central.Name = 'MATLAB App';
app.Central.WindowState = 'maximized';
% Create NmerodientesEditFieldLabel
app.NmerodientesEditFieldLabel = uilabel(app.Central);
app.NmerodientesEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.NmerodientesEditFieldLabel.Position = [40 269 107 22];
app.NmerodientesEditFieldLabel.Text = 'Número de dientes';
% Create z1
app.z1 = uieditfield(app.Central, 'numeric');

```

```

app.z1.Position = [212 269 36 22];
% Create ngulodehliceLabel
app.ngulodehliceLabel = uilabel(app.Central);
app.ngulodehliceLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.ngulodehliceLabel.Position = [193 453 107 22];
app.ngulodehliceLabel.Text = 'ángulo de hélice [°]';
% Create psi
app.psi = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.psi.Visible = 'off';
app.psi.Position = [368 453 35 22];
% Create tp
app.tp = uibuttongroup(app.Central);
app.tp.SelectionChangedFcn = createCallbackFcn(app, @tpSelectionChanged, true);
app.tp.Title = 'Tipo de engranaje';
app.tp.Position = [36 472 123 70];
% Create RectoButton
app.RectoButton = uiradiobutton(app.tp);
app.RectoButton.Text = 'Recto';
app.RectoButton.Position = [11 24 58 22];
app.RectoButton.Value = true;
% Create HelicoidalButton
app.HelicoidalButton = uiradiobutton(app.tp);
app.HelicoidalButton.Text = 'Helicoidal';
app.HelicoidalButton.Position = [11 2 74 22];
% Create Caracterizacindelengranaje1Label
app.Caracterizacindelengranaje1Label = uilabel(app.Central);
app.Caracterizacindelengranaje1Label.FontSize = 15;
app.Caracterizacindelengranaje1Label.FontWeight = 'bold';
app.Caracterizacindelengranaje1Label.Position = [31 399 233 22];
app.Caracterizacindelengranaje1Label.Text = 'Caracterización del engranaje 1';

% Create ngulodepresinLabel
app.ngulodepresinLabel = uilabel(app.Central);
app.ngulodepresinLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.ngulodepresinLabel.Position = [191 486 115 22];
app.ngulodepresinLabel.Text = 'ángulo de presión [°]';
% Create theta
app.theta = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.theta.Position = [365 486 36 22];
% Create CaracterizacindelapartculaabrasivaLabel
app.CaracterizacindelapartculaabrasivaLabel = uilabel(app.Central);
app.CaracterizacindelapartculaabrasivaLabel.FontSize = 15;
app.CaracterizacindelapartculaabrasivaLabel.FontWeight = 'bold';
app.CaracterizacindelapartculaabrasivaLabel.Position = [484 422 290 22];
app.CaracterizacindelapartculaabrasivaLabel.Text = 'Caracterización de la partícula abrasiva';
% Create FrecuenciadegirorevminLabel
app.FrecuenciadegirorevminLabel = uilabel(app.Central);
app.FrecuenciadegirorevminLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.FrecuenciadegirorevminLabel.Position = [38 239 154 22];
app.FrecuenciadegirorevminLabel.Text = 'Frecuencia de giro [rev/min]';
% Create n1
app.n1 = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.n1.Position = [212 239 36 22];
% Create CALCULARButton

```

```

app.CALCULARButton = uibutton(app.Central, 'push');
app.CALCULARButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@CALCULARButtonPushed, true);
app.CALCULARButton.BackgroundColor = [0.3922 0.8314 0.0745];
app.CALCULARButton.Position = [530 164 160 59];
app.CALCULARButton.Text = 'CALCULAR';
% Create Velocidaddedesgasteengrane1umhLabel
app.Velocidaddedesgasteengrane1umhLabel = uilabel(app.Central);
app.Velocidaddedesgasteengrane1umhLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.Velocidaddedesgasteengrane1umhLabel.Position = [436 81 222 59];
app.Velocidaddedesgasteengrane1umhLabel.Text = 'Velocidad de desgaste engrane 1 [um/h]';
% Create salida
app.salida = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.salida.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @salidaValueChanged, true);
app.salida.Position = [678 93 106 35];
% Create RadiopromediodelgranommLabel
app.RadiopromediodelgranommLabel = uilabel(app.Central);
app.RadiopromediodelgranommLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.RadiopromediodelgranommLabel.Position = [565 333 90 28];
app.RadiopromediodelgranommLabel.Text = {'Radio promedio'; 'del grano [mm]'};
% Create rg
app.rg = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.rg.Position = [679 339 33 22];
% Create MdulodelsistemammLabel
app.MdulodelsistemammLabel = uilabel(app.Central);
app.MdulodelsistemammLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.MdulodelsistemammLabel.Position = [181 507 151 35];
app.MdulodelsistemammLabel.Text = 'Módulo del sistema [mm]';
% Create m
app.m = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.m.Position = [365 512 36 24];
% Create Caracterizacindelengranaje2Label
app.Caracterizacindelengranaje2Label = uilabel(app.Central);
app.Caracterizacindelengranaje2Label.FontSize = 15;
app.Caracterizacindelengranaje2Label.FontWeight = 'bold';
app.Caracterizacindelengranaje2Label.Position = [29 201 233 22];
app.Caracterizacindelengranaje2Label.Text = 'Caracterización del engranaje 2';
% Create NmerodedientesEditFieldLabel_2
app.NmerodedientesEditFieldLabel_2 = uilabel(app.Central);
app.NmerodedientesEditFieldLabel_2.HorizontalAlignment = 'right';
app.NmerodedientesEditFieldLabel_2.Position = [40 60 107 22];
app.NmerodedientesEditFieldLabel_2.Text = 'Número de dientes';
% Create z2
app.z2 = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.z2.Position = [214 60 36 22];
% Create Velocidaddedesgasteengrane2umhLabel
app.Velocidaddedesgasteengrane2umhLabel = uilabel(app.Central);
app.Velocidaddedesgasteengrane2umhLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.Velocidaddedesgasteengrane2umhLabel.Position = [436 17 222 59];
app.Velocidaddedesgasteengrane2umhLabel.Text = 'Velocidad de desgaste engrane 2 [um/h]';
% Create salida2
app.salida2 = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.salida2.Position = [678 29 106 35];
% Create CálculodelavelocidaddedesgasteabrasivoLabel

```

```

app.CálculodelavelocidaddedesgasteabrasivoLabel = uilabel(app.Central);
app.CálculodelavelocidaddedesgasteabrasivoLabel.FontSize = 15;
app.CálculodelavelocidaddedesgasteabrasivoLabel.FontWeight = 'bold';
app.CálculodelavelocidaddedesgasteabrasivoLabel.Position = [278 591 333 22];
app.CálculodelavelocidaddedesgasteabrasivoLabel.Text = 'Cálculo de la velocidad de desgaste
abrasivo';
% Create MaterialDropDownLabel
app.MaterialDropDownLabel = uilabel(app.Central);
app.MaterialDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.MaterialDropDownLabel.Position = [16 368 48 22];
app.MaterialDropDownLabel.Text = 'Material';
% Create Material1
app.Material1 = uidropdown(app.Central);
app.Material1.Items = {'BRONCE', 'ACEROS', 'POLÍMEROS', ''};
app.Material1.Position = [71 368 212 22];
app.Material1.Value = 'BRONCE';
% Create MaterialDropDown_2Label
app.MaterialDropDown_2Label = uilabel(app.Central);
app.MaterialDropDown_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.MaterialDropDown_2Label.Position = [19 165 48 22];
app.MaterialDropDown_2Label.Text = 'Material';
% Create Material2
app.Material2 = uidropdown(app.Central);
app.Material2.Items = {'BRONCE', 'ACEROS', 'POLÍMEROS'};
app.Material2.Position = [70 164 212 22];
app.Material2.Value = 'BRONCE';
% Create TipodepartculaDropDownLabel
app.TipodepartculaDropDownLabel = uilabel(app.Central);
app.TipodepartculaDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.TipodepartculaDropDownLabel.Position = [475 378 95 22];
app.TipodepartculaDropDownLabel.Text = 'Tipo de partícula';
% Create TipodepartculaDropDown
app.TipodepartculaDropDown = uidropdown(app.Central);
app.TipodepartculaDropDown.Items = {'Arena de cuarzo', 'Diamante', 'Carburo de silicio',
'Óxido de aluminio', 'Propio Material'};
app.TipodepartculaDropDown.Position = [585 378 199 22];
app.TipodepartculaDropDown.Value = 'Arena de cuarzo';
% Create ConcentracinenvolumenLabel
app.ConcentracinenvolumenLabel = uilabel(app.Central);
app.ConcentracinenvolumenLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.ConcentracinenvolumenLabel.Position = [565 284 90 28];
app.ConcentracinenvolumenLabel.Text = {'Concentración'; ' en volumen(%)'};
% Create cv
app.cv = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.cv.Position = [679 290 33 22];
% Create TipodeEcuacinDropDownLabel
app.TipodeEcuacinDropDownLabel = uilabel(app.Central);
app.TipodeEcuacinDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.TipodeEcuacinDropDownLabel.Position = [496 541 101 22];
app.TipodeEcuacinDropDownLabel.Text = 'Tipo de Ecuación';
% Create Ec
app.Ec = uidropdown(app.Central);
app.Ec.Items = {'Kraglesky', 'Archard'};
app.Ec.Position = [612 541 100 22];

```



```

app.Ec.Value = 'Kraglesky';
% Create CaracterizacindelsistemaLabel
app.CaracterizacindelsistemaLabel = uilabel(app.Central);
app.CaracterizacindelsistemaLabel.FontSize = 15;
app.CaracterizacindelsistemaLabel.FontWeight = 'bold';
app.CaracterizacindelsistemaLabel.Position = [32 561 204 22];
app.CaracterizacindelsistemaLabel.Text = 'Caracterización del sistema';
% Create DurezasuperficialHBEditFieldLabel
app.DurezasuperficialHBEditFieldLabel = uilabel(app.Central);
app.DurezasuperficialHBEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.DurezasuperficialHBEditFieldLabel.Position = [41 127 128 22];
app.DurezasuperficialHBEditFieldLabel.Text = 'Dureza superficial [HB]';
% Create HB2
app.HB2 = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.HB2.Position = [215 127 36 22];
% Create DurezasuperficialHBEditField_2Label
app.DurezasuperficialHBEditField_2Label = uilabel(app.Central);
app.DurezasuperficialHBEditField_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.DurezasuperficialHBEditField_2Label.Position = [36 333 128 22];
app.DurezasuperficialHBEditField_2Label.Text = 'Dureza superficial [HB]';
% Create HB1
app.HB1 = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.HB1.Position = [210 333 36 22];
% Create FrecuenciadegirorevminLabel_2
app.FrecuenciadegirorevminLabel_2 = uilabel(app.Central);
app.FrecuenciadegirorevminLabel_2.HorizontalAlignment = 'right';
app.FrecuenciadegirorevminLabel_2.Position = [40 29 154 22];
app.FrecuenciadegirorevminLabel_2.Text = 'Frecuencia de giro [rev/min]';
% Create n2
app.n2 = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.n2.Editable = 'off';
app.n2.Position = [214 29 36 22];
% Create Conversion
app.Conversion = uibutton(app.Central, 'push');
app.Conversion.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @ConversionButtonPushed, true);
app.Conversion.BackgroundColor = [0.851 0.9922 1];
app.Conversion.Position = [624 507 81 22];
app.Conversion.Text = '?';
% Create ConversindedurezasLabel
app.ConversindedurezasLabel = uilabel(app.Central);
app.ConversindedurezasLabel.Position = [496 507 129 22];
app.ConversindedurezasLabel.Text = 'Conversión de durezas';
% Create tabladureza
app.tabladureza = uibutton(app.Central, 'push');
app.tabladureza.BackgroundColor = [0.851 0.9922 1];
app.tabladureza.Position = [625 472 81 22];
app.tabladureza.Text = '?';
% Create DurezastpicasLabel
app.DurezastpicasLabel = uilabel(app.Central);
app.DurezastpicasLabel.Position = [497 472 88 22];
app.DurezastpicasLabel.Text = 'Durezas típicas';
% Create ayuda
app.ayuda = uibutton(app.Central, 'push');
app.ayuda.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @ayudaButtonPushed, true);

```

```

app.ayuda.BackgroundColor = [0.9804 0.8235 0.8235];
app.ayuda.Position = [756 591 28 22];
app.ayuda.Text = '?';
% Create AYUDALabel
app.AYUDALabel = uilabel(app.Central);
app.AYUDALabel.Position = [704 591 46 22];
app.AYUDALabel.Text = 'AYUDA';
% Create PorcentajedeelongacinLabel
app.PorcentajedeelongacinLabel = uilabel(app.Central);
app.PorcentajedeelongacinLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.PorcentajedeelongacinLabel.Position = [38 299 141 22];
app.PorcentajedeelongacinLabel.Text = 'Porcentaje de elongación';
% Create Eo1
app.Eo1 = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.Eo1.Position = [212 299 36 22];
% Create PorcentajedeelongacinLabel_2
app.PorcentajedeelongacinLabel_2 = uilabel(app.Central);
app.PorcentajedeelongacinLabel_2.HorizontalAlignment = 'right';
app.PorcentajedeelongacinLabel_2.Position = [41 93 141 22];
app.PorcentajedeelongacinLabel_2.Text = 'Porcentaje de elongación';
% Create Eo2
app.Eo2 = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.Eo2.Position = [215 93 36 22];
% Create PotenciadelamquinaHPLLabel
app.PotenciadelamquinaHPLLabel = uilabel(app.Central);
app.PotenciadelamquinaHPLLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.PotenciadelamquinaHPLLabel.Position = [191 422 158 22];
app.PotenciadelamquinaHPLLabel.Text = 'Potencia de la máquina [HP]';
% Create P
app.P = uieditfield(app.Central, 'numeric');
app.P.Position = [365 422 36 22];
% Show the figure after all components are created
app.Central.Visible = 'on';
end
end
% App creation and deletion
methods (Access = public)
% Construct app
function app = Version4
% Create UIFigure and components
createComponents(app)
% Register the app with APP Designer
registerApp(app, app.Central)
if nargin == 0
clear app
end
end
% Code that executes before app deletion
function delete(app)
% Delete UIFigure when app is deleted
delete(app.Central)
end
end
end

```

Anexo B. Manual del Usuario

Acerca del Manual.

✓ Propósito.

El presente manual tiene como finalidad ser una guía básica de operación del software; permitiendo al lector del mismo adquirir las destrezas y conocimientos indispensables para una operación adecuada del sistema, y ser una herramienta de consulta de primera mano a la cual puede recurrir el usuario en cualquier momento en caso de dudas.

✓ Requerimientos necesarios.

- Tener cierto criterio en cuanto a la terminología de engranajes.
- Es necesario tener los datos del número de dientes y módulo de los engranajes, así como sus materiales, tamaño de la partícula abrasiva, velocidad de operación, potencia de la máquina, ángulo de presión y de hélice para engranajes helicoidales.
- Tener instalado una versión superior a Matlab 2016^a.

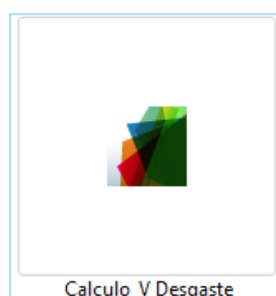
Especificaciones

Los requisitos básicos del sistema son:

Clientes o Estación de trabajo PC, 4GB ram, procesador 1.1 GHZ, espacio en disco de 512MB que corra Matlab sin problemas.

Acceso

El acceso al software se ejecuta de manera automática al dar doble click sobre el ejecutable de la aplicación provisto.



- ✓ Pantalla de inicio.



- ✓ Menú Principal.

MATLAB App

Calculo de la velocidad de desgaste abrasivo AYUDA ?

Caracterización del sistema

Tipo de engranaje: Recto Helicoidal

Módulo del sistema [mm]:

ángulo de presión [°]:

ángulo de hélice [°]:

Potencia de la máquina [HP]:

Tipo de Ecuación:

Conversión de durezas:

Durezas típicas:

Caracterización del engranaje 1

Material:

Dureza superficial [HB]:

Porcentaje de elongación:

Número de dientes:

Frecuencia de giro [rev/min]:

Caracterización de la partícula abrasiva

Tipo de partícula:

Radio promedio del grano [mm]:

Concentración en volumen(%):

Caracterización del engranaje 2

Material:

Dureza superficial [HB]:

Porcentaje de elongación:

Número de dientes:

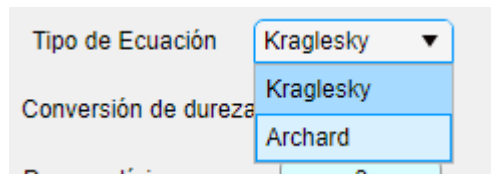
Frecuencia de giro [rev/min]:

CALCULAR

Velocidad de desgaste engrane 1 [um/h]:

Velocidad de desgaste engrane 2 [um/h]:

- Ayuda.** Despliega una guía básica de qué ecuación usar según el caso.
- Caracterización del sistema.** Lugar diseñado para seleccionar el tipo de engranajes, y los datos comunes de los mismos, módulo del sistema, ángulo de presión, ángulo de hélice y potencia de la máquina.
- Caracterización de los engranajes.** Espacio designado para las características del tamaño y material de cada engranaje, así como la frecuencia de giro de los engranajes.
- Tipo de ecuación.** Es una barra desplegable con las dos opciones de ecuación disponibles para el cálculo.



- e. **Conversión de durezas.** El presente botón despliega una tabla de conversión de durezas entre las diferentes escalas.

MATLAB App

DUREZA BRINELL				DUREZA VICKERS				DUREZA ROCWELL						
HB	HV	HRC	HRC	HB	HV	HRC	HRC	HB	HV	HRC	HRC			
92	97	53,6		154	162	82,3		213	224	95,8		309	325	33
94	99	54,9		156	164	83		215	226	96,1		313	329	33
98	101	56,6		157	165	83,4		217	229	96,4		317	333	34
97	102	57,7		158	166	83,7		219	230	96,7		321	337	34
99	104	58,6		160	168	84,3		222	233	97,2		325	342	35
101	108	59,9		161	169	84,7		224	235	97,5		329	346	35
103	108	61,1		163	171	85,2		226	237	97,8		333	350	36
105	110	62,3		164	172	85,5		229	241	98,2		337	354	36
107	112	63,3		166	174	86,0		231	243	98,5	21	341	358	37
109	115	64,5		167	175	86,2		234	246		22	345	362	37
111	117	65,2		169	178	86,6		236	248		22	350	366	38
114	120	66,5		170	179	86,9		239	251		22	354	372	38
118	122	67,6		172	181	87,3		241	253		23	359	377	39
118	124	68,7		174	183	87,8		244	256		24	363	381	39
121	127	69,9		175	184	88,1		246	258		24	368	386	40
123	129	71		177	186	88,5		249	262		24	373	392	40
126	132	72		179	188	89		252	265		25	378	397	41
128	134	73,1		180	189	89,3		255	268		25	383	402	41
131	138	74,2		182	191	89,7		257	270		26	388	407	42
134	141	75,2		184	193	90,2		260	273		26	393	413	42
137	144	76,5		185	194	90,4		263	277		27	398	418	43
138	145	76,9		187	196	90,8		266	279		27	404	424	43
139	146	77,2		189	199	91,3		269	283		28	409	430	44
140	147	77,6		191	201	91,7		272	288		28	415	436	44
141	148	78		193	203	92,2		275	290		28	420	441	45
143	150	78,7		195	205	92,6		278	292		29	426	447	45
144	151	79		197	207	93,1		282	296		29	432	454	46
145	152	79,4		198	208	93,3		285	299		30	438	460	46
146	153	79,7		200	210	93,6		288	302		30	444	466	47
148	155	80,4		202	212	93,8		292	307		31	451	473	48
149	157	80,7		204	214	94		295	310		31	457	481	49
150	158	81		207	217	94,6		298	313		31	465	490	51
152	160	81,7		209	220	95		302	317		32	474	500	52
153	161	82		211	222	95,4		306	321		32	484	510	53

- f. **Durezas típicas** Presenta una guía de la dureza y porcentaje de elongación típica.

Tipo	'Bronce'
Dureza	HB=70
Elongación	%= 50
Tipo	'Acero templado a 350°F carburizado AISI 1020/1116'
Dureza	HB=230
Elongación	%= 15
Tipo	'Acero templado a 900°F Nitruado AISI 4130/4140'
Dureza	HB=370
Elongación	%=18
Tipo	'Acero alta resistencia a la fatiga templado a 350°F AISI 4615/4620'
Dureza	HB=260
Elongación	%=27
Tipo	'Acero alta maquinabilidad endurecido AISI 8615/8620'
Dureza	HB=300
Elongación	%=25
Tipo	'Acero Endurecido, templado a 300°F uso aeroespacial AISI 9310.'
Dureza	HB=350
Elongación	%=17
Tipo	'Acero de alta dureza templado y revenido AISI 1045/1140'
Dureza	HB=400
Elongación	%=8
Tipo	'Acero de alta dureza serie 4x templado en aceite AISI4140/4340'
Dureza	HB=400
Elongación	%=20

- g. **Caracterización Partícula abrasiva** Espacio designado para seleccionar un tipo de partícula, el tamaño de grano y la concentración en el medio.

Caracterización de la partícula abrasiva

Tipo de partícula Arena de cuarzo ▼

Arena de cuarzo

Diamante

Carburo de silicio

Óxido de aluminio

Propio Material

- h. **Calcular** El botón verde de calcular, procesa la información y otorga un resultado.

Anexo C. Valores de tamizaje

RICELI EQUIPOS

TAMICES DE LABORATORIO PARA ENSAYO DE MATERIALES ASTM E-11

Los tamices de laboratorio RICELI se caracterizan por su exactitud y fiabilidad. Son acoplables entre sí y, además, pueden acoplarse a tamices de otros fabricantes.

Nuestros tamices están contruidos completamente de Acero Inoxidable este material es de más larga duración y resiste mejor la deformación de la malla. La tela metálica está perfectamente tensada al bastidor y selladas con soldadura a fin de eliminar las hendiduras y asegurar un flujo continuo de la muestra, contribuyendo a minimizar perdida de material.

Los datos del tamiz (número de denominación, abertura en milímetros y abertura en pulgadas) son grabados en una placa y adherida al tamiz para una fácil identificación.

A cada tamiz le acompaña un certificado de fabricación y cumplimiento según la norma ASTM E11.

TABLA DE TAMICES

Denominación de Tamiz	Apertura del Tamiz	
	Milímetros	Pulgadas
Serie Fina		
Nro 4	4.75 mm	0.187
Nro 5	4.00 mm	0.157
Nro 6	3.35 mm	0.132
Nro 7	2.80 mm	0.111
Nro 8	2.36 mm	0.0937
Nro 10	2.00 mm	0.0787
Nro 12	1.70 mm	0.0661
Nro 14	1.40 mm	0.0555
Nro 16	1.18 mm	0.0469
Nro 18	1.00 mm	0.0394
Nro 20	850 µm	0.331
Nro 25	710 µm	0.0278
Nro 30	600 µm	0.0234
Nro 35	500 µm	0.0197
Nro 40	425 µm	0.0165
Nro 45	355 µm	0.0139
Nro 50	300 µm	0.0117
Nro 60	250 µm	0.0098
Nro 70	212 µm	0.0083
Nro 80	180 µm	0.007
Nro 100	150 µm	0.0059
Nro 120	125 µm	0.0049
Nro 140	106 µm	0.0041
Nro 170	90 µm	0.0035
Nro 200	75 µm	0.0029
Nro 230	63 µm	0.0025
Nro 270	53 µm	0.0021
Nro 325	45 µm	0.0017
Nro 400	38 µm	0.0015
Serie Gruesa		
3 Pulg	75 mm	3
2-1/2 Pulg	63 mm	2.5
2 Pulg	50 mm	2
1-1/2 Pulg	38.1 mm	1.5
1 Pulg	25.0 mm	1
3/4 Pulg	19.0 mm	0.75
1/2 Pulg	12.5 mm	0.5
3/8 Pulg	9.5 mm	0.375
1/4 Pulg	6.3 mm	0.25

Anexo D. Valores de distribución de Chi Cuadrado

P = Probabilidad de encontrar un valor mayor o igual que el chi cuadrado tabulado, v = Grados de Libertad

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
1	10,8274	9,1404	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055	2,0722	1,6424	1,3233	1,0742	0,8735	0,7083	0,5707	0,4549
2	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052	3,7942	3,2189	2,7726	2,4079	2,0996	1,8326	1,5970	1,3863
3	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,8147	6,2514	5,3170	4,6416	4,1083	3,6649	3,2831	2,9462	2,6430	2,3660
4	18,4662	16,4238	14,8602	13,2767	11,1433	9,4877	7,7794	6,7449	5,9886	5,3853	4,8784	4,4377	4,0446	3,6871	3,3567
5	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363	8,1152	7,2893	6,6257	6,0644	5,5731	5,1319	4,7278	4,3515
6	22,4575	20,2491	18,5475	16,8119	14,4494	12,5916	10,6446	9,4461	8,5581	7,8408	7,2311	6,6948	6,2108	5,7652	5,3481
7	24,3213	22,0402	20,2777	18,4753	16,0128	14,0671	12,0170	10,7479	9,8032	9,0371	8,3834	7,8061	7,2832	6,8000	6,3458
8	26,1239	23,7742	21,9549	20,0902	17,5345	15,5073	13,3616	12,0271	11,0301	10,2189	9,5245	8,9094	8,3505	7,8325	7,3441
9	27,8767	25,4625	23,5893	21,6660	19,0228	16,9190	14,6837	13,2880	12,2421	11,3887	10,6564	10,0060	9,4136	8,8632	8,3428
10	29,5879	27,1119	25,1881	23,2093	20,4832	18,3070	15,9872	14,5339	13,4420	12,5489	11,7807	11,0971	10,4732	9,8922	9,3418
11	31,2635	28,7291	26,7569	24,7250	21,9200	19,6752	17,2750	15,7671	14,6314	13,7007	12,8987	12,1836	11,5298	10,9199	10,3410
12	32,9092	30,3182	28,2997	26,2170	23,3367	21,0261	18,5493	16,9893	15,8120	14,8454	14,0111	13,2661	12,5838	11,9463	11,3403
13	34,5274	31,8830	29,8193	27,6882	24,7356	22,3620	19,8119	18,2020	16,9848	15,9839	15,1187	14,3451	13,6356	12,9717	12,3398
14	36,1239	33,4262	31,3194	29,1412	26,1189	23,6848	21,0641	19,4062	18,1508	17,1169	16,2221	15,4209	14,6853	13,9961	13,3393
15	37,6978	34,9494	32,8015	30,5780	27,4884	24,9958	22,3071	20,6030	19,3107	18,2451	17,3217	16,4940	15,7332	15,0197	14,3389
16	39,2518	36,4555	34,2671	31,9999	28,8453	26,2962	23,5418	21,7931	20,4651	19,3689	18,4179	17,5646	16,7795	16,0425	15,3385
17	40,7911	37,9462	35,7184	33,4087	30,1910	27,5871	24,7690	22,9770	21,6146	20,4887	19,5110	18,6330	17,8244	17,0646	16,3382
18	42,3119	39,4220	37,1564	34,8052	31,5264	28,8693	25,9894	24,1555	22,7595	21,6049	20,6014	19,6993	18,8679	18,0860	17,3379
19	43,8194	40,8847	38,5821	36,1908	32,8523	30,1435	27,2036	25,3289	23,9004	22,7178	21,6891	20,7638	19,9102	19,1069	18,3376
20	45,3142	42,3358	39,9969	37,5663	34,1696	31,4104	28,4120	26,4976	25,0375	23,8277	22,7745	21,8265	20,9514	20,1272	19,3374
21	46,7963	43,7749	41,4009	38,9322	35,4789	32,6706	29,6151	27,6620	26,1711	24,9348	23,8578	22,8876	21,9915	21,1470	20,3372
22	48,2676	45,2041	42,7957	40,2894	36,7807	33,9245	30,8133	28,8224	27,3015	26,0393	24,9390	23,9473	23,0307	22,1663	21,3370
23	49,7276	46,6231	44,1814	41,6383	38,0756	35,1725	32,0069	29,9792	28,4288	27,1413	26,0184	25,0055	24,0689	23,1852	22,3369
24	51,1790	48,0336	45,5584	42,9798	39,3641	36,4150	33,1962	31,1325	29,5533	28,2412	27,0960	26,0625	25,1064	24,2037	23,3367
25	52,6187	49,4351	46,9280	44,3140	40,6465	37,6525	34,3816	32,2825	30,6752	29,3388	28,1719	27,1183	26,1430	25,2218	24,3366
26	54,0511	50,8291	48,2898	45,6416	41,9231	38,8851	35,5632	33,4295	31,7946	30,4346	29,2463	28,1730	27,1789	26,2395	25,3365
27	55,4751	52,2152	49,6450	46,9628	43,1945	40,1133	36,7412	34,5736	32,9117	31,5284	30,3193	29,2266	28,2141	27,2569	26,3363
28	56,8918	53,5939	50,9936	48,2782	44,4608	41,3372	37,9159	35,7150	34,0266	32,6205	31,3909	30,2791	29,2486	28,2740	27,3362
29	58,3006	54,9662	52,3355	49,5878	45,7223	42,5569	39,0875	36,8538	35,1394	33,7109	32,4612	31,3308	30,2825	29,2908	28,3361

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
30	59,7022	56,3325	53,6719	50,8922	46,9792	43,7730	40,2560	37,9902	36,2502	34,7997	33,5302	32,3815	31,3159	30,3073	29,3360
31	61,0980	57,6921	55,0025	52,1914	48,2319	44,9853	41,4217	39,1244	37,3591	35,8871	34,5981	33,4314	32,3486	31,3235	30,3359
32	62,4873	59,0461	56,3280	53,4857	49,4804	46,1942	42,5847	40,2563	38,4663	36,9730	35,6649	34,4804	33,3809	32,3394	31,3359
33	63,8694	60,3953	57,6483	54,7754	50,7251	47,3999	43,7452	41,3861	39,5718	38,0575	36,7307	35,5287	34,4126	33,3551	32,3358
34	65,2471	61,7382	58,9637	56,0609	51,9660	48,6024	44,9032	42,5140	40,6756	39,1408	37,7954	36,5763	35,4438	34,3706	33,3357
35	66,6192	63,0760	60,2746	57,3420	53,2033	49,8018	46,0588	43,6399	41,7780	40,2228	38,8591	37,6231	36,4746	35,3858	34,3356
36	67,9850	64,4097	61,5811	58,6192	54,4373	50,9985	47,2122	44,7641	42,8788	41,3036	39,9220	38,6693	37,5049	36,4008	35,3356
37	69,3476	65,7384	62,8832	59,8926	55,6680	52,1923	48,3634	45,8864	43,9782	42,3833	40,9839	39,7148	38,5348	37,4156	36,3355
38	70,7039	67,0628	64,1812	61,1620	56,8955	53,3835	49,5126	47,0072	45,0763	43,4619	42,0450	40,7597	39,5643	38,4302	37,3354
39	72,0550	68,3830	65,4753	62,4281	58,1201	54,5722	50,6598	48,1263	46,1730	44,5395	43,1053	41,8040	40,5935	39,4446	38,3354
40	73,4029	69,6987	66,7660	63,6908	59,3417	55,7585	51,8050	49,2438	47,2685	45,6160	44,1649	42,8477	41,6222	40,4589	39,3353
45	80,0776	76,2229	73,1660	69,9569	65,4101	61,6562	57,5053	54,8105	52,7288	50,9849	49,4517	48,0584	46,7607	45,5274	44,3351
50	86,6603	82,6637	79,4898	76,1538	71,4202	67,5048	63,1671	60,3460	58,1638	56,3336	54,7228	53,2576	51,8916	50,5923	49,3349
55	93,1671	89,0344	85,7491	82,2920	77,3804	73,3115	68,7962	65,8550	63,5772	61,6650	59,9804	58,4469	57,0160	55,6539	54,3348
60	99,6078	95,3443	91,9518	88,3794	83,2977	79,0820	74,3970	71,3411	68,9721	66,9815	65,2265	63,6277	62,1348	60,7128	59,3347
70	112,3167	107,8079	104,2148	100,4251	95,0231	90,5313	85,5270	82,2553	79,7147	77,5766	75,6893	73,9677	72,3583	70,8236	69,3345
80	124,8389	120,1018	116,3209	112,3288	106,6285	101,8795	96,5782	93,1058	90,4053	88,1303	86,1197	84,2840	82,5663	80,9266	79,3343
90	137,2082	132,2554	128,2987	124,1162	118,1359	113,1452	107,5650	103,9040	101,0537	98,6499	96,5238	94,5809	92,7614	91,0234	89,3342
100	149,4488	144,2925	140,1697	135,8069	129,5613	124,3421	118,4980	114,6588	111,6667	109,1412	106,9058	104,8615	102,9459	101,1149	99,3341
120	173,6184	168,0814	163,6485	158,9500	152,2113	146,5673	140,2326	136,0620	132,8063	130,0546	127,6159	125,3833	123,2890	121,2850	119,3340
140	197,4498	191,5653	186,8465	181,8405	174,6478	168,6130	161,8270	157,3517	153,8537	150,8941	148,2686	145,8629	143,6043	141,4413	139,3339
160	221,0197	214,8081	209,8238	204,5300	196,9152	190,5164	183,3106	178,5517	174,8283	171,6752	168,8759	166,3092	163,8977	161,5868	159,3338
180	244,3723	237,8548	232,6198	227,0563	219,0442	212,3039	204,7036	199,6786	195,7434	192,4086	189,4462	186,7282	184,1732	181,7234	179,3338
200	267,5388	260,7350	255,2638	249,4452	241,0578	233,9942	226,0210	220,7441	216,6088	213,1022	209,9854	207,1244	204,4337	201,8526	199,3337
250	324,8306	317,3609	311,3460	304,9393	295,6885	287,8815	279,0504	273,1944	268,5987	264,6970	261,2253	258,0355	255,0327	252,1497	249,3337
300	381,4239	373,3509	366,8439	359,9064	349,8745	341,3951	331,7885	325,4090	320,3971	316,1383	312,3460	308,8589	305,5741	302,4182	299,3336
500	603,4458	593,3580	585,2060	576,4931	563,8514	553,1269	540,9303	532,8028	526,4014	520,9505	516,0874	511,6081	507,3816	503,3147	499,3335
600	712,7726	701,8322	692,9809	683,5155	669,7690	658,0936	644,8004	635,9329	628,8157	622,9876	617,6713	612,7718	608,1468	603,6942	599,3335

v/p	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,9975	0,999
1	0,3573	0,2750	0,2059	0,1485	0,1015	0,0642	0,0358	0,0158	0,0039	0,0010	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
2	1,1957	1,0217	0,8616	0,7133	0,5754	0,4463	0,3250	0,2107	0,1026	0,0506	0,0201	0,0100	0,0050	0,0020
3	2,1095	1,8692	1,6416	1,4237	1,2125	1,0052	0,7978	0,5844	0,3518	0,2158	0,1148	0,0717	0,0449	0,0243
4	3,0469	2,7528	2,4701	2,1947	1,9226	1,6488	1,3665	1,0636	0,7107	0,4844	0,2971	0,2070	0,1449	0,0908
5	3,9959	3,6555	3,3251	2,9999	2,6746	2,3425	1,9938	1,6103	1,1455	0,8312	0,5543	0,4118	0,3075	0,2102
6	4,9519	4,5702	4,1973	3,8276	3,4546	3,0701	2,6613	2,2041	1,6354	1,2373	0,8721	0,6757	0,5266	0,3810
7	5,9125	5,4932	5,0816	4,6713	4,2549	3,8223	3,3583	2,8331	2,1673	1,6899	1,2390	0,9893	0,7945	0,5985
8	6,8766	6,4226	5,9753	5,5274	5,0706	4,5936	4,0782	3,4895	2,7326	2,1797	1,6465	1,3444	1,1042	0,8571
9	7,8434	7,3570	6,8763	6,3933	5,8988	5,3801	4,8165	4,1682	3,3251	2,7004	2,0879	1,7349	1,4501	1,1519
10	8,8124	8,2955	7,7832	7,2672	6,7372	6,1791	5,5701	4,8652	3,9403	3,2470	2,5582	2,1558	1,8274	1,4787
11	9,7831	9,2373	8,6952	8,1479	7,5841	6,9887	6,3364	5,5778	4,5748	3,8157	3,0535	2,6032	2,2321	1,8338
12	10,7553	10,1820	9,6115	9,0343	8,4384	7,8073	7,1138	6,3038	5,2260	4,4038	3,5706	3,0738	2,6612	2,2141
13	11,7288	11,1291	10,5315	9,9257	9,2991	8,6339	7,9008	7,0415	5,8919	5,0087	4,1069	3,5650	3,1118	2,6172
14	12,7034	12,0785	11,4548	10,8215	10,1653	9,4673	8,6963	7,7895	6,5706	5,6287	4,6604	4,0747	3,5820	3,0407
15	13,6790	13,0298	12,3809	11,7212	11,0365	10,3070	9,4993	8,5468	7,2609	6,2621	5,2294	4,6009	4,0697	3,4825
16	14,6555	13,9827	13,3096	12,6243	11,9122	11,1521	10,3090	9,3122	7,9616	6,9077	5,8122	5,1422	4,5734	3,9417
17	15,6328	14,9373	14,2406	13,5307	12,7919	12,0023	11,1249	10,0852	8,6718	7,5642	6,4077	5,6973	5,0916	4,4162
18	16,6108	15,8932	15,1738	14,4399	13,6753	12,8570	11,9462	10,8649	9,3904	8,2307	7,0149	6,2648	5,6234	4,9048
19	17,5894	16,8504	16,1089	15,3517	14,5620	13,7158	12,7727	11,6509	10,1170	8,9065	7,6327	6,8439	6,1673	5,4067
20	18,5687	17,8088	17,0458	16,2659	15,4518	14,5784	13,6039	12,4426	10,8508	9,5908	8,2604	7,4338	6,7228	5,9210
21	19,5485	18,7683	17,9843	17,1823	16,3444	15,4446	14,4393	13,2396	11,5913	10,2829	8,8972	8,0336	7,2889	6,4467
22	20,5288	19,7288	18,9243	18,1007	17,2396	16,3140	15,2787	14,0415	12,3380	10,9823	9,5425	8,6427	7,8648	6,9829
23	21,5095	20,6902	19,8657	19,0211	18,1373	17,1865	16,1219	14,8480	13,0905	11,6885	10,1957	9,2604	8,4503	7,5291
24	22,4908	21,6525	20,8084	19,9432	19,0373	18,0618	16,9686	15,6587	13,8484	12,4011	10,8563	9,8862	9,0441	8,0847
25	23,4724	22,6156	21,7524	20,8670	19,9393	18,9397	17,8184	16,4734	14,6114	13,1197	11,5240	10,5196	9,6462	8,6494
26	24,4544	23,5794	22,6975	21,7924	20,8434	19,8202	18,6714	17,2919	15,3792	13,8439	12,1982	11,1602	10,2561	9,2222
27	25,4367	24,5440	23,6437	22,7192	21,7494	20,7030	19,5272	18,1139	16,1514	14,5734	12,8785	11,8077	10,8733	9,8029
28	26,4195	25,5092	24,5909	23,6475	22,6572	21,5880	20,3857	18,9392	16,9279	15,3079	13,5647	12,4613	11,4973	10,3907
29	27,4025	26,4751	25,5391	24,5770	23,5666	22,4751	21,2468	19,7677	17,7084	16,0471	14,2564	13,1211	12,1278	10,9861

v/p	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,9975	0,999
30	28,3858	27,4416	26,4881	25,5078	24,4776	23,3641	22,1103	20,5992	18,4927	16,7908	14,9535	13,7867	12,7646	11,5876
31	29,3694	28,4087	27,4381	26,4397	25,3901	24,2551	22,9762	21,4336	19,2806	17,5387	15,6555	14,4577	13,4073	12,1961
32	30,3533	29,3763	28,3889	27,3728	26,3041	25,1478	23,8442	22,2706	20,0719	18,2908	16,3622	15,1340	14,0555	12,8104
33	31,3375	30,3444	29,3405	28,3069	27,2194	26,0422	24,7143	23,1102	20,8665	19,0467	17,0735	15,8152	14,7092	13,4312
34	32,3219	31,3130	30,2928	29,2421	28,1361	26,9383	25,5864	23,9522	21,6643	19,8062	17,7891	16,5013	15,3679	14,0568
35	33,3065	32,2821	31,2458	30,1782	29,0540	27,8359	26,4604	24,7966	22,4650	20,5694	18,5089	17,1917	16,0315	14,6881
36	34,2913	33,2517	32,1995	31,1152	29,9730	28,7350	27,3363	25,6433	23,2686	21,3359	19,2326	17,8868	16,7000	15,3243
37	35,2764	34,2216	33,1539	32,0532	30,8933	29,6355	28,2138	26,4921	24,0749	22,1056	19,9603	18,5859	17,3730	15,9652
38	36,2617	35,1920	34,1089	32,9919	31,8146	30,5373	29,0931	27,3430	24,8839	22,8785	20,6914	19,2888	18,0501	16,6109
39	37,2472	36,1628	35,0645	33,9315	32,7369	31,4405	29,9739	28,1958	25,6954	23,6543	21,4261	19,9958	18,7318	17,2612
40	38,2328	37,1340	36,0207	34,8719	33,6603	32,3449	30,8563	29,0505	26,5093	24,4331	22,1642	20,7066	19,4171	17,9166
45	43,1638	41,9950	40,8095	39,5847	38,2910	36,8844	35,2895	33,3504	30,6123	28,3662	25,9012	24,3110	22,8994	21,2509
50	48,0986	46,8638	45,6100	44,3133	42,9421	41,4492	39,7539	37,6886	34,7642	32,3574	29,7067	27,9908	26,4636	24,6736
55	53,0367	51,7391	50,4204	49,0554	47,6105	46,0356	44,2448	42,0596	38,9581	36,3981	33,5705	31,7349	30,0974	28,1731
60	57,9775	56,6200	55,2394	53,8091	52,2938	50,6406	48,7587	46,4589	43,1880	40,4817	37,4848	35,5344	33,7909	31,7381
70	67,8664	66,3961	64,8990	63,3460	61,6983	59,8978	57,8443	55,3289	51,7393	48,7575	45,4417	43,2753	41,3323	39,0358
80	77,7631	76,1879	74,5825	72,9153	71,1445	69,2070	66,9938	64,2778	60,3915	57,1532	53,5400	51,1719	49,0430	46,5197
90	87,6661	85,9925	84,2854	82,5111	80,6247	78,5584	76,1954	73,2911	69,1260	65,6466	61,7540	59,1963	56,8918	54,1559
100	97,5744	95,8078	94,0046	92,1290	90,1332	87,9453	85,4406	82,3581	77,9294	74,2219	70,0650	67,3275	64,8571	61,9182
120	117,4041	115,4646	113,4825	111,4186	109,2197	106,8056	104,0374	100,6236	95,7046	91,5726	86,9233	83,8517	81,0726	77,7555
140	137,2476	135,1491	133,0028	130,7657	128,3800	125,7580	122,7476	119,0293	113,6594	109,1368	104,0343	100,6547	97,5908	93,9253
160	157,1019	154,8555	152,5564	150,1583	147,5988	144,7834	141,5475	137,5457	131,7560	126,8700	121,3457	117,6791	114,3496	110,3592
180	176,9652	174,5799	172,1373	169,5879	166,8653	163,8682	160,4206	156,1526	149,9687	144,7413	138,8205	134,8843	131,3050	127,0114
200	196,8359	194,3193	191,7409	189,0486	186,1717	183,0028	179,3550	174,8353	168,2785	162,7280	156,4321	152,2408	148,4262	143,8420
250	246,5387	243,7202	240,8297	237,8085	234,5768	231,0128	226,9048	221,8059	214,3915	208,0978	200,9387	196,1604	191,8020	186,5537
300	296,2700	293,1786	290,0062	286,6878	283,1353	279,2143	274,6901	269,0679	260,8781	253,9122	245,9727	240,6631	235,8126	229,9620
500	495,3734	491,3709	487,2569	482,9462	478,3231	473,2099	467,2962	459,9261	449,1467	439,9360	429,3874	422,3034	415,8081	407,9458
600	594,9938	590,6057	586,0930	581,3623	576,2859	570,6681	564,1661	556,0560	544,1801	534,0185	522,3654	514,5285	507,3385	498,6219