

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GRÁFICA PARA INGENIERÍA**

METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA PÉRDIDA DE POTENCIA POR FRICCIÓN EN ELEMENTOS DE MAQUINAS. APLICACIÓN EN LAS TRANSMISIONES POR CADENA DEL TRANSPORTADOR DE LA KTP – 2 M.

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Maquinaria Agrícola.

Autor: Ing. Yunier Pupo Pérez

Holguín, 2012

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GRÁFICA PARA INGENIERÍA**

METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA PÉRDIDA DE POTENCIA POR FRICCIÓN EN ELEMENTOS DE MAQUINAS. APLICACIÓN EN LAS TRANSMISIONES POR CADENA DEL TRANSPORTADOR DE LA KTP – 2 M.

Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Maquinaria Agrícola.

Autor: Ing. Yunier Pupo Pérez

Tutor: Dr.C. Julio César Pino Tarragó

Holguín, 2012

RESUMEN

La tribología es la ciencia que estudia los procesos de fricción, desgaste y lubricación; procesos verdaderamente complejos y donde aún faltan herramientas que posibiliten su mejor estudio y para dar solución a uno de estos problemas se desarrolla el presente trabajo que tiene como objetivo la elaboración de metodologías de cálculo de las pérdidas de potencia fricción, en los principales elementos de máquinas como: transmisiones por fricción, cadenas, engranajes, correas y poleas así como cojinetes de rodamiento y su aplicación en las transmisiones por cadenas para el transportador de la KTP-2M. Para la realización de este trabajo se utilizaron como métodos de investigación la observación, el histórico - lógico, análisis y síntesis, sistémico - estructural y criterio de expertos, los cuales permitieron el desarrollo de las metodologías y su aplicación.

ÍNDICE

No.	CONTENIDO	Pág.
	INTRODUCCIÓN	1
1	MATERIALES Y MÉTODOS	5
1.1	Importancia de la tribología y su desarrollo mundial.	5
1.2	Sistemas y procesos tribológicos en la técnica.	6
1.3	Introducción al fenómeno de fricción.	10
1.3.1	Desarrollo de los estudios sobre la fricción.	10
1.3.2	Definición y clasificación de la fricción.	11
1.3.3	Estados de fricción.	12
1.3.4	Determinación del coeficiente de fricción.	16
1.4	Procesos de desgaste.	16
1.4.1	Clasificación de los procesos de desgaste	17
1.5	Fundamentos de la lubricación.	19
1.5.1	Clasificación de los lubricantes.	19
1.5.2	Propiedades de los lubricantes.	20
1.5.3	Importancia de la lubricación.	21
1.6	Conclusiones del capítulo.	22
2	METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA POR FRICCIÓN EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS	24
2.1	Metodología de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por cadenas.	24
2.2	Metodología de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en Cojinetes de Rodamiento.	28
2.3	Metodología de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por Engranajes.	32
2.4	Metodología de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por Correas.	37
2.5	Metodología de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por fricción.	41
2.6	Conclusiones del capítulo.	43

3	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA POR FRICCIÓN EN LAS TRANSMISIONES POR CADENAS DEL TRANSPORTADOR DE LA KTP- 2M	46
3.1	Cálculo de las pérdidas de potencia en transportador Primario.	46
3.1.1	Cálculo de las pérdidas de potencia en la primera transmisión (Árbol del primer ventilador) transmisión intermedia de los transportadores (contramarcha).	46
3.1.2	Cálculo de las pérdidas de potencia en la segunda transmisión (transmisión intermedia de los transportadores (Contramarcha)) - (Árbol motriz del primer transportador).	49
3.1.3	Cálculo de las pérdidas de potencia en la tercera transmisión por cadena (Árbol motriz del primer transportador – Árbol inferior del primer transportador).	52
3.1.4	Análisis de los resultados.	55
3.2	Cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en el transportador secundario.	55
3.2.1	Cálculo de las pérdidas de potencias en la primera transmisión por cadena transmisión intermedia de los transportadores (contramarcha) – transmisión intermedia del segundo transportador (contramarcha).	55
3.2.2	Cálculo de las pérdidas de potencias en la segunda transmisión por cadena (transmisión intermedia del segundo transportador (contramarcha) – árbol propulsor).	58
3.2.3	Cálculo de las pérdidas de potencias en la tercera transmisión por cadena (Árbol propulsor – Árbol inferior).	61
3.2.4	Análisis de los resultados.	64
3.3	Cálculo de las pérdidas de potencia en la transmisión por cadena en el transportador de descarga.	65
3.3.1	Análisis de los resultados.	68

3.4	Conclusiones del capítulo.	68
	CONCLUSIONES.	69
	RECOMENDACIONES.	70
	BIBLIOGRAFÍA.	71

INTRODUCCIÓN

La tribología es la ciencia que estudia los procesos de fricción, desgaste y lubricación; procesos verdaderamente complejos y donde aún faltan herramientas que posibiliten su mejor estudio. La mecánica del contacto al tener como objetivo fundamental los procesos de pérdidas de potencia debido a la fricción. Contrario a lo que muchos piensan los procesos de desgaste no son fenómenos de baja complejidad sino que presentan una alta dificultad para su comprensión y cálculos en general, por la cantidad de variantes que puede contener un mismo fenómeno, también la alta connotación económica que puede estar relacionada con los mismos los hacen procesos de gran importancia para la industria en general.

Para reafirmar lo anteriormente expuesto se mencionan algunos datos para mejor comprensión:

- Del 30 - 40 % de la energía que se genera en el mundo se consume producto de la fricción.
- Del 80 - 90 % de los elementos que se sustituyen en las máquinas se debe al desgaste.

El ahorro de la energía es un tema polémico, pero desde hace aproximadamente una o dos décadas se comienza a tratar el tema seriamente, entonces la tribología es utilizada como arma fundamental para contrarrestar pérdidas energéticas, es decir si se logra disminuir la fricción se utiliza menor cantidad de energía para la puesta en marcha de una máquina en general, además a menor fricción aumenta la durabilidad en los pares de fricción y se logra el ahorro mediante el aumento de los tiempos de trabajo para una pieza en general.

Luego la mecánica del desgaste tiene una elevada importancia no solo para la economía, también es vital que esta se desarrolle para bien del medio ambiente ya que al lograr menos pérdidas energéticas se podrá reducir la contaminación ambiental.

Actualmente para realizar los cálculos para la determinación de las pérdidas energéticas por fricción en elementos de máquinas no se cuenta con una

metodología y los que se realizan no tienen en cuenta un orden lógico, lo cual conlleva a la poca fiabilidad de los mismos.

Problema científico de la investigación: la no existencia de metodologías de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en elementos de máquinas.

Objeto sobre el cual se enfoca la investigación: los procesos tribológicos en los elementos de máquinas.

Campo: el cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en los elementos de máquinas.

Hipótesis: si se elaboran las metodologías de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en los elementos de máquinas, entonces estos cálculos se podrán hacer de forma más rápida y fiable.

Objetivo del trabajo: elaborar las metodologías para el cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en elementos de máquinas.

Para dar cumplimiento al objetivo general propuesto anteriormente, se trazan como **objetivos específicos** los siguientes:

1. Elaborar las metodologías para el cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en:
 - Transmisiones por cadenas.
 - Transmisiones por engranajes.
 - Transmisiones por correas y poleas.
 - Transmisiones por fricción.
 - Cojinetes de rodamiento.
2. Aplicación de la metodología de cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por cadenas en el transportador de la KTP-2M.

Para ello se trazaron las siguientes **tareas científicas:**

1. Análisis del estado actual de la ciencia (de la bibliografía y del objeto de investigación) sobre la tribología y las pérdidas de potencia por fricción en elementos de máquinas
2. Desarrollo de las metodologías para el cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en elementos de máquinas.

3. Aplicación de la metodología para el cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por cadena en el transportador de la KTP-2M.

Los **métodos** utilizados en el desarrollo de la investigación son:

Observación: permite conocer el comportamiento de las pérdidas de potencia por fricción en elementos de máquinas.

Criterio de Expertos: permite a través del empleo de las técnicas de dirección tener en cuenta las opiniones, criterios y sugerencias de diferentes especialistas en el tema.

Histórico –lógico: permite conocer la evolución histórica de las pérdidas de potencia por fricción, la sucesión cronológica, su desarrollo y nuevas tendencias.

Análisis y síntesis: permite el estudio general, particularizando en las metodologías de cálculo y su aplicación en máquinas agrícolas.

Sistémico –estructural: Se emplea fundamentalmente para la elaboración y estructuración del aporte de la investigación.

El **resultado esperado** de esta investigación es poder contar con una metodología que permita de forma clara, precisa y fiable calcular las pérdidas de potencia por fricción en elementos de máquinas.

La **novedad científica** está dada en que por primera vez se utiliza una metodología de cálculo orientada a la determinación de las pérdidas por fricción en elementos de máquinas.

CAPITULO 1. MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Importancia de la tribología y su desarrollo mundial.

En 1966 la tribología (Fricción, lubricación y desgaste) se convirtió en una nueva disciplina reconocida que se ocupa de la transmisión y pérdida de energía de materiales en las instalaciones mecánicas, debido a los efectos del frotamiento. Estos términos fueron dados a conocer por primera vez en un estudio realizado por la comisión del ministerio de educación y ciencia de Gran Bretaña el 19 de marzo del año antes mencionado, por lo cual se conoce este día como el del nacimiento de una nueva disciplina científica.

Basta con mencionar tres aspectos para apreciar su gran importancia:

- **Significado económico:** Cerca del 30% de la energía que se pierde en la industria mundial, se debe a la fricción. Países del mundo desarrollado pierden anualmente más de dos millones de dólares como resultado del desgaste.
- **Significado científico:** Es conocido por todos que los procesos macroscópicos en la naturaleza son irreversibles, la tribología es necesaria para el estudio detallado de estos procesos y contribuye a explicar los fenómenos de la pérdida de energía y materiales.
- **Significado interdisciplinario:** Como la tribología es una disciplina científico-técnica, para su estudio es necesaria la concurrencia de físicos, químicos y metalúrgicos así como ingenieros y otros especialistas de diferentes ramas del saber.

En la actualidad la tribología comprende cuatro direcciones fundamentales de trabajo:

- **Triboanálisis:** Rama científica de la tribología que estudia los aspectos mecánicos, físicos, químicos y eléctricos que se presentan en la superficie de los cuerpos sometidos a la fricción y estudia también los aspectos relacionados con la tribomodelación y la tribometría.
- **Tribotecnología:** Comprende dos ramas de la tribología aplicada, una se dedica a los problemas tribotécnicos con la elaboración de los elementos de máquina y comprende los procesos de maquinado, rodillado, extrucción, soldadura, etc., la otra abarca el incremento de la calidad de la superficie por medio de recubrimientos superficiales especiales.
- **Tribomanutención:** Se encarga de los problemas relacionados con la explotación y mantenimiento de los sistemas tribotécnicos, incluye además la técnica de tribodiagnóstico.
- **Tribotécnica:** Rama de la tribología aplicada que se ocupa de los medios y procedimientos para el dominio técnico - económico de los procesos de fricción, lubricación y desgaste en la proyección de los sistemas mecánicos; acumula y aplica los resultados novedosos obtenidos en la tribotecnología y el triboanálisis. Abarca las siguientes ramas específicas:
 - 1- Tribomateriales.
 - 2- Triboacabado .
 - 3- Tribodiseño.

1.2 Sistemas y procesos tribológicos en la técnica.

La mayoría de las veces, el rozamiento se presenta como un fenómeno indeseable cuya consecuencia (la fricción y el desgaste) es necesario reducir todo lo posible. Este es el caso de los cojinetes, elementos de máquinas destinados a permitir el movimiento de rotación relativo de los elementos. En un cojinete con rozamiento por rodadura, los cuerpos rodantes y las pistas forman un sistema tribológico, donde ocurren determinados

fenómenos de fricción, desgaste y lubricación.

Fenómenos semejantes a los enumerados ocurren también en los pares cinemáticos de los mecanismos (de los cuáles los cojinetes son un caso particular). Así los dientes de un engranaje forman un sistema tribológico donde la fricción cambia continuamente de sentido, y se presentan diversos fenómenos de desgaste en dependencia de las condiciones de cargas, velocidad de rodadura y de deslizamientos. La lubricación de los engranajes es un factor que influye mucho en su capacidad de carga, la cual explica las numerosas investigaciones dedicadas a dicho problema.

La complejidad de los procesos tecnológicos dificulta su estudio, pues no resulta fácil representar el cuadro completo de procesos que se desarrollan simultáneamente. Un método que ayuda el análisis de fenómenos complejos es el llamado enfoque “en sistema” o “sistémico” el cual se representa a continuación.

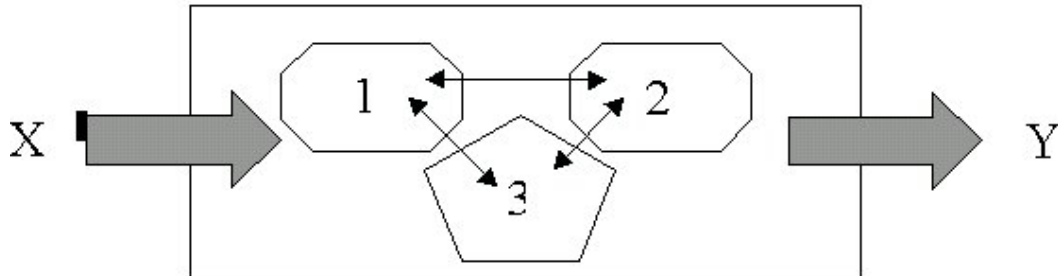


Figura 1.1 Enfoque sistémico (según Rodríguez Martínez, Calixto, 2003)

Considérese un sistema tribológico (Figura 1.1) formado por dos cuerpos sólidos 1 y 2 en contacto. Todas las sustancias que se encuentra en la zona de contacto constituyen el llamado “tercer cuerpo” (3). El sistema intercambia con el medio exterior masa (materiales), energía mecánica (trabajo) y energía térmica (calor).

Analizando el plano funcional y tomando como ejemplo una transmisión por engranajes tanto la entrada X como la salida Y serán trabajos (Figura 1.1).

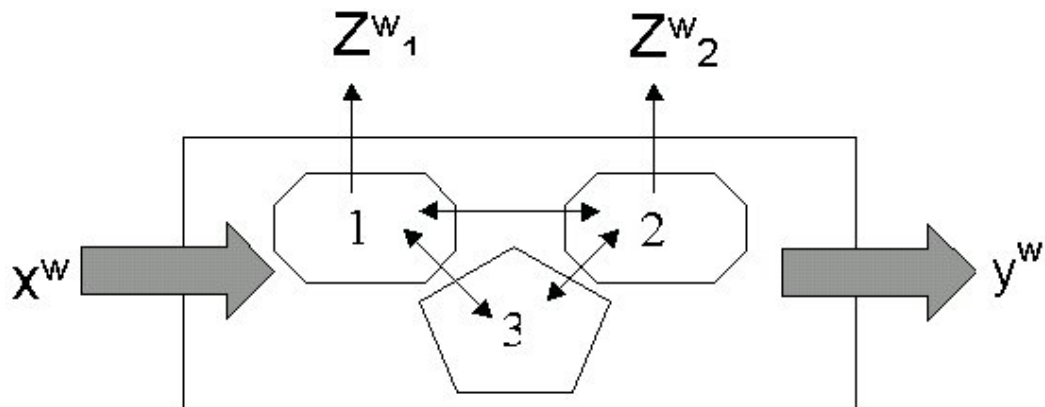


Figura 1.2 Fenómenos donde interviene la energía mecánica en el llamado plano de trabajo (según Rodríguez Martínez, Calixto, 2003).

Si se analizan los fenómenos donde intervienen la energía mecánica; el llamado plano de trabajo (Figura 1.2), se observa que hay una entrada de trabajo X^W , una salida de trabajo útil Y^W , y un trabajo perdido Z^W en el impulso de los fluidos o partículas fuera del sistema, ruidos y otras pérdidas menores. Los procesos de transferencia de calor se realizan en el plano térmico (Figura 1.3). La entrada de energía X^t si existe proviene de fuentes externas de calor, tales como los gases en un motor de combustión interna, que incide sobre el sistema tribológico formado por el pistón y el cilindro respectivamente. Por otro lado el calor, debido a la disipación de energía mecánica en los procesos irreversibles ocurridos en el plano de trabajo, constituye las pérdidas Z^t . El calor también se transfiere de los cuerpos más calientes al más frío.

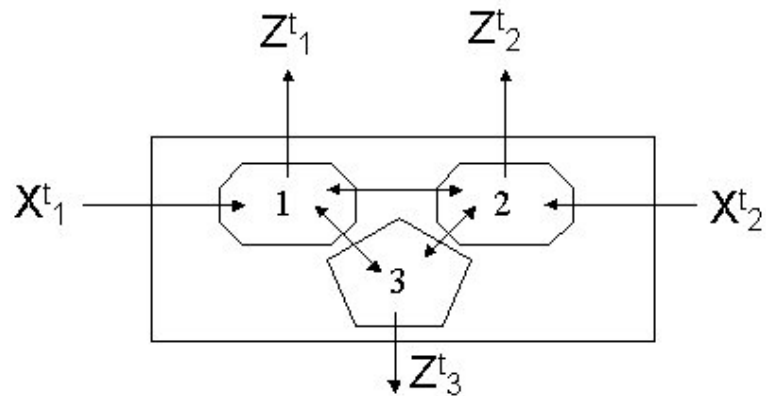


Figura 1.3 Procesos de transferencia de calor en el plano de trabajo (según Rodríguez Martínez, Calixto, 2003).

Analizando los procesos de transferencia y transformación de masa representadas en llamado plano de trabajo (Figura 1.4).

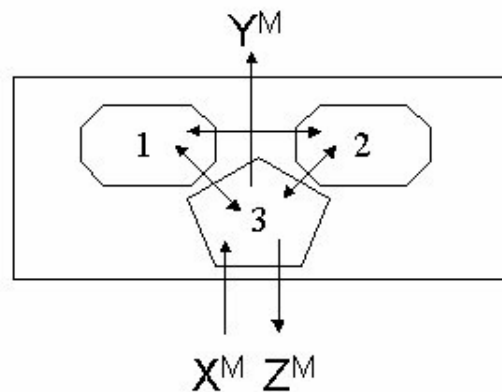


Figura 1.4 Procesos de transferencia de masa en el llamado plano de trabajo (según Rodríguez Martínez, Calixto, 2003).

Se observa que en ellos intervienen los procesos de desgaste, que desprenden material de los cuerpos sólidos 1 y 2 hacia el tercer cuerpo. En algunos casos pueden ocurrir desprendimientos de material de un cuerpo y aportación al otro. Las pérdidas del material Z^m servirán para balancear la entrada X^m y la salida Y^m . En muchos casos la entrada de material se limita al lubricante y las pérdidas a los productos del desgaste.

El análisis de los fenómenos tribológicos que ocurren en los sistemas mecánicos demuestra que es necesario el estudio de los siguientes procesos fundamentales:

- 1- Procesos de deformación por contacto en la superficie de los cuerpos sólidos.
- 2- Proceso de fricción y de desgaste, como los mecanismos fundamentales de pérdidas, de energía y material en el rozamiento.
- 3- Procesos y regímenes de lubricación como el medio más efectivo de influencias en los mecanismos.

1.3 Introducción al fenómeno de fricción.

El problema relacionado con la fricción se remonta a tiempos remotos, así 4000 años a.n.e el hombre primitivo valiéndose de la transformación de la energía mecánica en calor, obtenía el fuego al frotar dos pedazos de madera. El estudio de los fenómenos relacionados con la fricción de los elementos de máquina se hace evidente si tenemos en cuenta que del 30-50% de la energía producida en el mundo se consume en vencer la fricción.

1.3.1 Desarrollo de los estudios sobre la fricción.

Las primeras investigaciones relacionadas con la fricción corresponden a Leonardo Da Vince en el año 1508, bajo la influencia de estos trabajos el científico francés G. Amontons (1699) realiza una serie de experimentos que le permiten plantear que la fuerza de fricción es proporcional a la carga (Primera ley clásica de la fricción) y que es independiente del área geométrica (Segunda ley clásica).

Entre los años 1687-1724, Newton y Desaguimers establecen la teoría que considera como causa de la fricción la adhesión entre los cuerpos la cual es ampliada posteriormente por los ingleses Ewing (1892), Hardy (1919) y por el soviético B. Deriagin (1934).

Según los trabajos realizados por el sabio francés C. Coulomb plantea la independencia de la fricción de la velocidad de deslizamiento (Tercera ley clásica), la cual ha sido modificada en dependencia de la fricción de las

características de los materiales (Cuarta ley clásica).

En 1804 el inglés I. Lesly formula la teoría deformacional sobre la fricción, la cual es desarrollada ampliamente en 1921 por el alemán L. Gombell, que admite la posibilidad de la "soldadura puntual" en los puntos de contacto.

En su obra "Dialéctica de la naturaleza" (1885), F. Engels escribió: "La fricción es un entorpecimiento del movimiento de la masa y ha venido considerándose como la destrucción de este movimiento y por tanto de la energía cinética".

Los ingleses F.P. Browden y D. Tabor (1939) dan a conocer la teoría adhesivo deformacional, consideran la fuerza de fricción como un resultado conjunto de la fuerza necesaria para cizallar las soldaduras puntuales y las fuerzas necesarias para producir el flujo plástico de las capas superficiales al ser comprimidas entre sí.

Después de la segunda Guerra Mundial el soviético I. V. Kragelskii (1946) publica una serie de investigaciones donde plantea sus puntos de vista con relación a los problemas de la fricción. Establece la teoría mecánico - molecular de fricción como resultado combinado de la adhesión molecular y el "engranaje" mecánico entre las asperezas y deformaciones de las superficies en contacto. Establece cinco tipos de uniones friccionantes durante el contacto de los cuerpos sólidos, deformaciones elásticas, plásticas, micro corte, adhesivo superficial y profundo. Las tres primeras definen la componente mecánica y las dos últimas la adhesiva.

En 1965, G. Fleisher plantea un método de cálculo desde el punto de vista energético de la fricción y el desgaste a partir de la teoría mecánico - molecular de la fricción. Como se puede apreciar el estudio de los fenómenos de la fricción, a pesar de haberse iniciado hace varios siglos, aún constituyen un aspecto de gran interés científico.

1.3.2 Definición y clasificación de la fricción.

- **Fricción:** Pérdida de energía mecánica durante el inicio del desarrollo y

fin del movimiento relativo entre dos zonas materiales en contacto.

Siendo ocurrente con la definición anterior la fricción se puede clasificar en:

- **Fricción externa:** Fricción que se presenta entre zonas materiales de dos cuerpos en contacto.
- **Fricción interna:** Fricción que se presenta entre zonas materiales de un mismo cuerpo.

Se introduce el término zonas materiales que abarca los fenómenos que se pueden producir entre cuerpos diferentes (fricción externa) o entre partículas del mismo cuerpo (fricción interna).

En dependencia de las condiciones de contacto la fricción puede clasificarse en:

- **Fricción estática:** Pérdida de energía mecánica al inicio y final del movimiento relativo tangencial entre dos zonas materiales en contacto.
- **Fricción móvil:** Pérdida de energía mecánica al inicio y final del movimiento relativo de materiales en contacto.
- **Fricción de choque:** Pérdida de energía mecánica al inicio y final del movimiento relativo normal entre zonas materiales en contacto.
- **Fricción de deslizamiento:** Fricción que se presenta durante el movimiento relativo tangencial de los elementos sólidos de un sistema tribológico.
- **Fricción de rozamiento:** Fricción que se presenta durante el movimiento relativo de rodadura entre los elementos sólidos de un sistema tribológico.
- **Fricción de rotación:** Fricción que se presenta durante el movimiento relativo de rotación entre los elementos sólidos de un sistema tribológico.

1.3.3 Estados de fricción.

En dependencia del tipo de unión tribológica el ingeniero puede plantearse los siguientes objetivos desde el punto de vista de la fricción.

1. Obtener un alto coeficiente de fricción como una vía para lograr el funcionamiento adecuado de la unión tribológica.
2. Lograr un bajo coeficiente de fricción como una vía de ahorro

energético.

Para el cumplimiento de estos objetivos se pueden o no emplear sustancias lubricantes, por lo que se pueden establecer los siguientes estados de fricción.

- **Fricción sólida:** Es característico de uniones de rozamiento donde se necesita la obtención de un alto coeficiente de fricción (frenos, transmisiones por fricción) y en aquellos donde el lubricante puede influir negativamente en el proceso y calidad del producto que se elabora. Este estado de fricción se puede dividir en dos: fricción limpia o pura y fricción seca.

En el estado de fricción pura o limpia el sistema tribológico está constituido por dos elementos que corresponden a los materiales bases, los cuales se encuentran poco en la práctica industrial y como característica principal en ella las superficies están libres de cualquier película de contaminante. La magnitud del coeficiente de fricción varía de $f = 0.8$ hasta $f = 10$.

- **Fricción seca:** El sistema tribológico está constituido por tres elementos los cuales presentan características de cuerpos sólidos, las superficies de los mismos están cubiertas de una sustancia contaminante (vapor de agua, capas de óxido, etc.). En la práctica industrial se encuentra altamente difundido y la magnitud del coeficiente de fricción varía en el rango de $f = 0.10$ a $f = 0.8$.

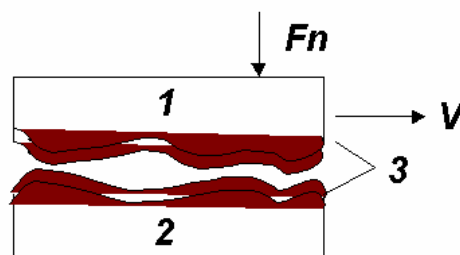


Figura 1.5 Modelo físico de la fricción seca (según Rodríguez Martínez, Calixto, 2003).

Como se ha expuesto anteriormente el fenómeno de la fricción ocasiona pérdidas millonarias en el mundo desarrollado actual y nuestro país no se encuentra ajeno a esto, por lo que para obtener un ahorro energético y una

mayor prolongación de la vida útil de las máquinas es necesario que se adicionen sustancias lubricantes entre los cuerpos sólidos en contacto.

Además se debe tener en cuenta el estado de fricción fluida, en el que se valoran tres elementos, representando uno de ellos las propiedades líquidas, el cual garantiza la separación de los elementos sólidos que constituyen el sistema tribológico. Ella se puede dividir en otros dos estados: fricción hidrodinámica y fricción hidrostática.

En el estado de fricción hidrodinámica durante el movimiento relativo del par friccionante, se determina la relación entre la velocidad y la carga. En este estado de fricción juega un papel importante la viscosidad del lubricante empleado y los valores del coeficiente de fricción varían en el rango de $f=0.001$ a $f=0.002$ en dependencia de la viscosidad del lubricante.

La fricción hidrostática es un estado de fricción en el cual las condiciones hidrodinámicas se logran a través de una presión exterior, esta fricción se emplea en aquellos casos donde la velocidad es tan baja que no permite la formación de películas hidrodinámicas.

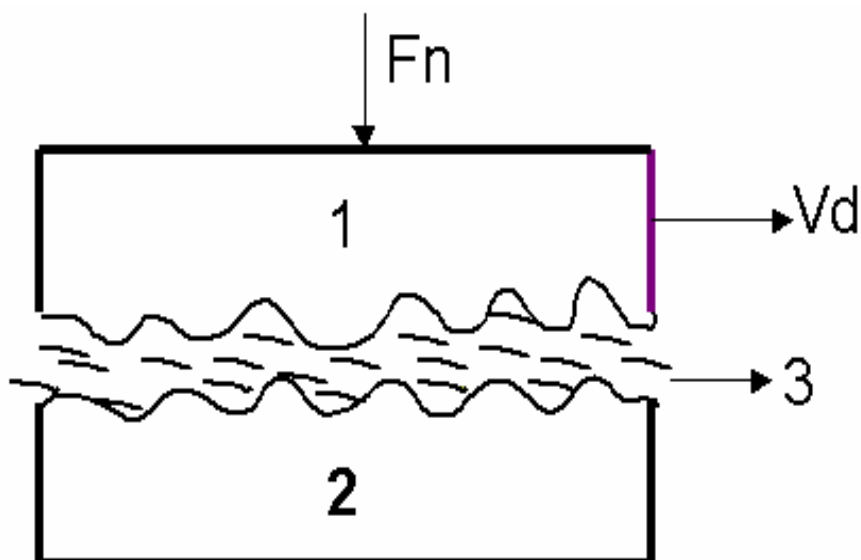


Figura 1.6 Modelo físico fricción fluida (según Rodríguez Martínez, Calixto, 2003).

En dependencia de las condiciones de trabajo se presentan diferentes regímenes de lubricación los que se muestran en la curva de Stribeck (Figura 1.7).

Existe otro tipo de estados de fricción y es la fricción gaseosa en la cual el sistema tribológico está constituido por los menos por tres elementos, presentando o no de ellos propiedades gaseosas. Dentro de la fricción gaseosa una de la más difundida es la que utiliza el aire como elemento gaseoso, el cual separa la superficie de los elementos sólidos que constituyen el sistema tribológico. La fricción aerodinámica se logra a través del movimiento relativo de los elementos sólidos, mientras que la aerostática se logra por medio de una presión exterior.

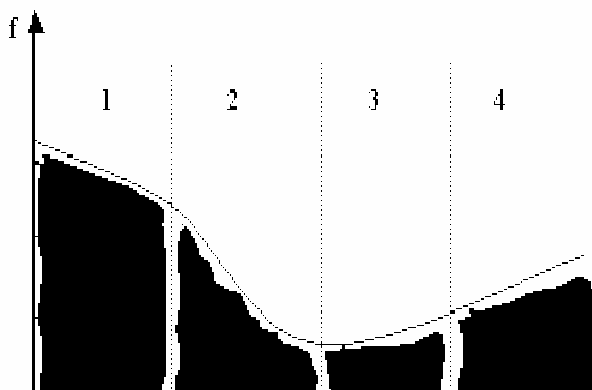


Figura 1.7 Curva de Stribeck (según Rodríguez Martínez, Calixto, 2003).

La combinación de los diferentes estados de fricción hasta ahora planteados define los estados de fricción mixta que no es más que un estado de fricción mezclado, integrado por lo menos por dos estados de fricción que se presentan simultáneamente en un sistema tribológico. La fricción mixta formada por los estados de fricción sólida y fluida se encuentra ampliamente difundida en la práctica industrial, sobre todo en aquellas uniones tribotécnicas que se caracterizan por bajas velocidades y grandes cargas, las propiedades de los materiales que constituyen la

unión juega un papel de primer orden. La magnitud del coeficiente de fricción varía de $f = 0.05$ a $f = 0.20$.

1.3.4 Determinación del coeficiente de fricción.

El conocimiento de la magnitud del coeficiente de fricción es de vital importancia para los trabajos de ingeniería, para ello el ingeniero dispone de varias vías:

- Determinación experimental del coeficiente de fricción, esta vía constituye la más exacta ya que en los experimentos se pueden lograr las condiciones reales del par de rozamiento, sin embargo en muchas ocasiones el ingeniero no dispone de los medios y el tiempo exigido para la investigación.
- Selección de los coeficientes de fricción a partir de manuales, libros elaborados por diferentes autores. Esta es la vía más simple pero a la vez la menos exacta, se puede utilizar en cálculos aproximados de ingeniería y otras.
- Determinación analítica del coeficiente de fricción, constituye una vía en desarrollo.

En el caso de fricción hidrodinámica en los cojinetes de deslizamientos existen métodos analíticos altamente desarrollados y de gran exactitud.

1.4 Procesos de desgaste.

Para el cumplimiento de la base teórica de la tribología, es necesario estudiar los procesos que ocurren en el plano de materiales, relacionados con el desgaste. Este no es más que la pérdida progresiva de sustancias en las superficies de trabajo del cuerpo, que se origina como resultado del movimiento relativo y debe analizarse como un proceso que conlleva a la pérdida de las magnitudes materiales de entrada del sistema.

Los intentos realizados para explicar sistemáticamente los diversos procesos de desgaste han tropezado con serias dificultades. Estos se debe a su complejidad la cual está dada por la participación en este proceso de muchas variables como: dureza, tenacidad, ductilidad, módulo de elasticidad, resistencia de fluencia, propiedades de fatiga, estructura y composición de la

superficie también es un factor importante en algunos casos.

Cuando el desgaste es perjudicial por las pérdidas de material, este puede ser reducido pero no eliminado, esta reducción se puede conseguir recurriendo a las siguientes técnicas:

- Diseño
- Elección de materiales
- Lubricación

1.4.1 Clasificación de los procesos de desgaste.

Con el fin de tener una idea clara del desgaste es esencial conocer los tipos de desgaste, aunque a todos no se les pueda catalogar atendiendo solamente a las pérdidas de material.

1. Desgaste adhesivo: En este mecanismo de desgaste el papel fundamental lo juega la interacción entre los materiales y se caracteriza como la subcategoría básica o fundamental, en virtud de que ocurre en cierta medida siempre que dos superficies sólidas están en contacto y permanece activo cuando todos los demás modos de desgaste se han eliminado. Este fenómeno puede comprenderse mejor recordando que todas las superficies reales sin importar cuan cuidadosamente se hayan preparado y pulido, presentan una sinuosidad general en la que se superponen una serie de protuberancias o asperezas locales, así cuando dos superficies se ponen en contacto solo se tocan realmente unas cuantas asperezas y el área de contacto real es apenas una fracción del área de contacto aparente, de este modo, incluso bajo cargas aplicadas muy pequeñas, las presiones locales en los sitios de contacto se hacen suficientemente grandes para superar la resistencia de fluencia de una o ambas superficies y de este modo queda asegurado la ocurrencia del flujo plástico local.

2. Desgaste abrasivo: El desplazamientos de partículas del material y en lo fundamental los procesos de formación por contacto caracterizan el desgaste abrasivo. El fenómeno de desprendimiento de partículas tiene lugar por el contacto físico – directo de dos superficies de las cuales una es mucho

más duro que la otra; es decir, las partículas desprendidas son eliminadas de la superficie por la acción del ranurado y excavadura de las asperezas de una superficie en contacto más dura, o por partículas duras atrapadas entre las superficies frontales. Este tipo de desgaste se manifiesta por conjunto de surcos y ralladuras superficiales que se llaman escariado.

La condición de desgaste abrasivos en la cual las asperezas duras de una superficies eliminan la superficie opuesta, suelen llamarse desgaste entre dos cuerpos y la condición en que partículas abrasivas duras atrapadas entre dos superficies causan el desgaste se denomina desgaste entre tres cuerpos. El proceso de desgaste abrasivo esta muy difundido en la industria ya que más del 50% de los casos de desgaste se llevan a cabo por mecanismos abrasivos.

3. Desgaste por fatiga superficial: El desgaste por fatiga superficial generalmente se considera debido a la acción de las tensiones y esfuerzos superficiales, sin mediar necesariamente otras interacciones físicas entre las superficies de los cuerpos sólidos. Este proceso está relacionado con ciclos de tensiones repetitivas en el contacto por rodadura o por deslizamiento, provocando deterioros en el material debido a las tensiones variables, cuyo nivel máximo no sería perjudicial si actuara de forma constante, a tracción o compresión.

Este proceso de desgaste es modo común de fallas en cojinetes antifricción, engranajes, levas y en todas las partes mecánicas con superficies de rodamiento en contacto.

4. Desgaste corrosivo – mecánico: Es el deterioro indeseable de un material debido a la interacción química o electroquímica con el ambiente o por medios distintos de la acción puramente mecánica. Una peculiaridad de este fenómeno de desgaste es que en él interactúan dos elementos: los cuerpos sólidos y el medio ambiente.

Otros tipos de desgaste son por cavitación en el cual se basan en la formación de cavidades de roturas explosivas de burbujas en el fluido y el desgaste eléctrico que son picaduras, eléctricas, erosión, chispas, corrosión galvánica y

ataques eléctricos.

1.5 Fundamentos de la lubricación.

Un lubricante es toda sustancia sólida, semisólida o líquida de origen animal, vegetal, mineral o sintético que pueda utilizarse para reducir el rozamiento entre piezas y mecanismo en movimiento proporcionándole con esto un funcionamiento suave y una duración satisfactoria a los componentes o elementos de máquina.

Entre los lubricantes más empleados se encuentran los aceites y las grasas, las cuales se utilizan ampliamente para todo tipo de elemento de máquinas sobre grandes intervalos de velocidades, presiones y temperaturas de trabajo. Para su funcionamiento adecuado estos se eligen para consideraciones diferentes de los requisitos de lubricación.

Debido a su fluidez el aceite posee varias ventajas sobre la grasa:

- Puede entrar con mayor facilidad en la configuración para expulsar contaminantes, como agua y suciedad.
- Transfiere más calor desde elementos de máquina fuertemente cargados.

No obstante a esto, las grasas poseen ventajas sobre los aceites como:

- Permiten diseños simplificados de cotamientos.
- Más eficaz para el sellado contra ingreso de suciedad y otros contaminantes lo que requiere menos mantenimiento.

1.5.1 Clasificación de los lubricantes.

Los lubricantes presentan una amplia clasificación, según su estado ellos se clasifican en sólidos como son el grafito y el sulfuro de molibdeno; semisólidos entre los que se encuentran las grasas y en líquidos los aceites.

En cuanto a su naturaleza se dividen en tres grandes grupos, el primero de estos son los parafínicos los que se caracterizan por su alto índice de viscosidad, baja volatilidad, bajo poder disolvente, sedimentos y alto punto de congelación; los nafténicos que presentan bajo índice de viscosidad, alta volatilidad, fácil oxidación tendencia a formar resina y se emulsionan con agua fácilmente.

1.5.2 Propiedades de los lubricantes.

Los principales fabricantes de máquinas y equipos en general exigen que los lubricantes que se deben utilizar cumplan ciertas especificaciones y exigencias acorde con la severidad de las condiciones de diseño y servicios de sus máquinas.

Sus propiedades se analizan desde el punto de vista físico, superficial, térmico y químico. Según la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Propiedades de los lubricantes.

Propiedades Físicas
- Color y Fluorescencia
- Densidad
- Rigidez Dialéctica
Propiedades Térmicas
- Punto de Inflamación y Combustión
- Punto de Congelación y Enturbiamiento.
Propiedades Superficiales
- Tensión Interfacial.
- Formación de Espumas.
- Emulsibilidad.
- Aeroemulsión.
Propiedades Térmicas
- Numero de Neutralización.
- Residuo de Carbono.
- Corrosión al Cobre.
- Punto de Anilina.

De las propiedades que aparecen en la tabla 1.1 la más importante es la viscosidad, la cual es la propiedad de un fluido el cual debe su resistencia a fluir, es decir la resistencia externa entre las moléculas de un fluido a deslizarse entre sí, es la fuerza tangencial o esfuerzo de fricción para rozar

una capa de fluido de 1 cm^2 y 1 cm de espesor a una velocidad de 1 cm/s .

Cuando la viscosidad se le considera atendiendo a esta fuerza, se le designa con los nombres de viscosidad absoluta cinemática y dinámica.

- **Viscosidad absoluta dinámica:** Es la fuerza necesaria por unidad de superficie para conseguir y mantener una velocidad de 1 cm/s entre dos superficies paralelas de 1 cm^2 de base, que se encuentra entre sí a una distancia de 1 cm . En el sistema CGS la unidad es: $\text{dina/seg/cm}^2 = \text{Poise}$.

- **Viscosidad absoluta cinemática:** Es el coeficiente de viscosidad absoluta dinámica por la temperatura. En el sistema CGS la unidad es el Stoke en la práctica la más utilizada es Centistoke.

La viscosidad es la que determina la capacidad líquida del fluido para mantener la lubricación, el rendimiento mecánico, la capacidad de carga y el gasto de lubricantes para unas condiciones fijas de velocidad, temperatura, carga y dimensiones del elemento que se calcula.

La viscosidad se mide por equipos relativamente sencillos llamados viscosímetros, los más usados son los viscosímetros de Saybol, Redwood y Ostwald. (Dudley D., Fuller, 1976).

1.5.3 Importancia de la lubricación.

Se pone de manifiesto si consideramos que todas las partes móviles de las máquinas y equipos en general están sujetas a frotamiento y desgastes y su control y reducción es uno de los principales problemas con los que se encuentran los técnicos responsables de su diseño.

Para ello los ingenieros están conscientes de la enorme pérdida que sería proponer un método de lubricación inadecuado o el empleo de un lubricante inapropiado. En nuestro país la importancia de la lubricación en las máquinas se resume en cuatro objetivos fundamentales:

- 1- Obtención del máximo rendimiento de las máquinas.
- 2- Reducción de gastos en mantenimiento, respecto a periodicidad, compras de lubricantes y piezas de repuesto.
- 3- Reducción del consumo de energía motriz.

4- Suspensión de paradas anormales de la máquina y averías en las mismas.

1.6 Conclusiones del capítulo.

La tribología es la ciencia que estudia los procesos de fricción, desgaste y lubricación; procesos verdaderamente complejos y donde aún faltan herramientas que posibiliten su mejor estudio. En el tema que se trata la mecánica del contacto tiene como objetivo fundamental los procesos de pérdidas de potencia debido a la fricción. Contrario a lo que muchos piensan los procesos de desgaste no son fenómenos de baja complejidad sino que presentan una alta dificultad para su comprensión y cálculos en general, por la cantidad de variantes que puede contener un mismo fenómeno, también la alta connotación económica que puede estar relacionada con los mismos los hacen procesos de gran importancia para la industria en general.

Para reafirmar lo anteriormente expuesto se mencionan algunos datos para mejor comprensión:

- Del 30 - 40 % de la energía que se genera en el mundo se consume producto de la fricción.
- Del 80 - 90 % de los elementos que se sustituyen en las máquinas se debe al desgaste.

El ahorro de la energía es un tema polémico, pero desde hace aproximadamente una o dos décadas se comienza a tratar el tema seriamente, entonces la tribología es utilizada como arma fundamental para contrarrestar pérdidas energéticas, es decir si se logra disminuir la fricción se utiliza menor cantidad de energía para la puesta en marcha de una máquina en general, además a menor fricción aumenta la durabilidad en los pares de fricción y se logra el ahorro mediante el aumento de los tiempos de trabajo para una pieza en general.

Luego la mecánica del desgaste tiene una elevada importancia no solo para la economía, también es vital que esta se desarrolle para bien del medio ambiente.

CAPITULO 2. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA POR FRICCIÓN EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA POR FRICCIÓN EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS

2.1 Metodología de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por cadenas.

Pérdidas de potencia

Las pérdidas de potencia en una transmisión por cadena se adicionan de las pérdidas que se invierten en vencer la rigidez de la cadena (rozamiento de las articulaciones, entre las chapas de los eslabones adyacentes), por rozamiento entre la cadena y los dientes de las ruedas de estrella, en los cojinetes de los árboles y de la resistencia que ofrece el aceite al avance de la cadena.

La mayor parte de las pérdidas esta condicionada por la rigidez de la cadena (por la resistencia al giro relativo de los eslabones) que además de determinar la magnitud del coeficiente de rendimiento, limitan la capacidad de carga de la transmisión.

Al entrar los eslabones de la cadena en engrane con la rueda de estrella, estos hacen un giro relativo y en los cargados se produce rozamiento. El trabajo de rozamiento W_x en una articulación de la cadena al entrar ésta en la rueda (o salir de ella) es proporcional al esfuerzo en la cadena, al coeficiente de rozamiento en la articulación, al diámetro del pasador y al ángulo de giro relativo de los eslabones de la cadena.

La fuerza que actúa sobre la articulación, depende de la carga útil, la tensión del ramal conducido, la velocidad, y varía en función del caso de las pérdidas por rozamiento que se examina: al entrar la cadena en la rueda de estrella o al salir de ella.

Las pérdidas de potencia por rozamiento en las transmisiones por cadena se calculan de la siguiente forma:

$$N_p = N_{PArt} + N_{PAc} + N_{PCoj} \quad (\text{kW}) \quad (2.1)$$

Siendo:

N_{PArt} : Pérdida de potencia en las articulaciones (kW).

N_{PAc} : Pérdida de potencia por el lubricante (kW).

$$N_{PArt} = \frac{W_{Roz}}{T} \quad (2.2)$$

Donde:

T : Tiempo para una carrera de la cadena (s).

W_{Roz} : Trabajo de rozamiento total de las articulaciones (kJ).

N_{PAc} : 4 o 5 % de las pérdidas de potencia en las articulaciones (N_{PArt}) (2.3)

Metodología de cálculo.

Para calcular las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por cadena se elaboró la siguiente metodología:

1. Calcular diámetro primitivo (m):

$$d_w = \frac{t}{\pi / z_1} \quad (2.4)$$

Donde t : Paso de la cadena (mm)

z_1 : Cantidad de dientes de la estrella conductora.

2. Calcular la velocidad de la cadena (m/s):

$$v = \frac{d_w \times n \times \pi}{60} \quad (2.5)$$

Donde:

n : revoluciones del árbol conductor (rpm).

3. Calcular tiempo de carrera de la cadena (s):

$$T = \frac{y \times t}{v} \quad (2.6)$$

Donde:

y : Cantidad de eslabones de la cadena

4. Calcular la fuerza útil que se aplica a la transmisión (kN):

$$F_u = \frac{N}{v} \quad (2.7)$$

Donde:

N : Potencia del árbol conductor (kW).

5. Calcular la fuerza centrífuga que tensa la cadena (kN):

$$F_f = q \times v^2 \quad (2.8)$$

Donde:

q : Peso de la cadena por cada metro de longitud (kg/m).

6. Calcular el ángulo de giro de los eslabones al entra en la estrella conductora (rad).

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{z_1} \quad (2.9)$$

7. Calcular ángulo de giro al salir de la estrella conducida (rad).

$$\alpha_2 = \frac{2\pi}{z_2} \quad (2.10)$$

Donde:

z_2 : Cantidad de dientes de la estrella conducida

8. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conductora (kJ).

$$W_{PEst1} = (F_u + F_f) f \times r \times \alpha_1 \quad (2.11)$$

Donde: r : Radio del pasador de los eslabones.

f : Coeficiente de fricción.

9. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conductora (kJ).

$$W_{PEst1.1} = F_f \times f \times r \times \alpha_1 \quad (2.12)$$

10. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conducida (kJ).

$$W_{PEst2} = (F_u + F_f) f \times r \times \alpha_2 \quad (2.13)$$

11. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conducida (kJ).

$$W_{PEst2.1} = F_f \times f \times r \times \alpha_2 \quad (2.14)$$

12. Calcular el trabajo de rozamiento de una articulación (kJ).

$$\sum W_{Est} = W_{PEst1} + W_{PEst1.1} + W_{PEst2} + W_{PEst2.1} \quad (2.15)$$

13. Calcular el trabajo de rozamiento total en las articulaciones (kJ).

$$W_{Ros} = y \sum W_{Est} \quad (2.16)$$

14. Calcular la pérdida de potencia en las articulaciones (N_{PArt}), según ecuación 2.2.

15. Calcular pérdidas debido al lubricante, (N_{PAc}) son del 4 al 5 % de las pérdidas de potencia en las articulaciones (N_{PArt}) según ecuación 2.3.

16. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{PCoj}), según la ecuación 2.26.

17. Calcular la pérdida de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.1.

18. Calcular la eficiencia (η) para cada término.

$$\eta_1 = \frac{N}{N + N_{PArt}} \quad (2.17)$$

$$\eta_2 = \frac{N}{N + N_{PAc}} \quad (2.18)$$

$$\eta_3 = \frac{N}{N + N_{PCoj}} \quad (2.19)$$

19. Calcular la eficiencia total de la transmisión (η_t):

$$\eta_t = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \quad (2.20)$$

2.2 Metodología de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en cojinetes de rodamiento.

Pérdidas de potencia

Para comenzar se obtiene la fuerza necesaria para vencer las pérdidas por rodadura. Estas pérdidas se harán más notables en las transmisiones por fricción y por correa.

Tabla 2.1 Coeficiente de rozamiento de rodadura.

Materiales	k en mm
Madera por madera	0,5-0,6
Acero blando por acero blando	0,05
Madera por acero	0,3-0,4
Bola de acero templado	0,01

$$Q = F_N \quad (\text{N}) \quad (2.21)$$

$$F'' = \left(\frac{2}{D} + \frac{k}{r} \right) F_N \quad (2.22)$$

Donde:

F_N : Fuerza normal (N)

F'' : Fuerza total de rozamiento (N)

k : Coeficiente de rozamiento de rodadura.

D : Diámetro de un rodillo o bola (m).

$$f'_{rod} = 1,27k \left(\frac{2}{D} + \frac{1}{r} \right) \quad (2.23)$$

Donde:

f'_{rod} : Coeficiente reducido de rozamiento para el cojinete de rodamiento.

El 1,27 es el coeficiente que tiene en cuenta la distribución de la carga en los rodillos.

Para los cojinetes de bolas.

$$f'_{bol} = 1,22k \left(\frac{2}{D} + \frac{1}{r} \right) \quad (2.24)$$

El 1,22 es el coeficiente que tiene en cuenta la distribución de la carga en las bolas.

$$P_{rod} = f' \times F_N = f' \times Q \quad (N) \quad (2.25)$$

P_{rod} : Fuerza necesaria para vencer las pérdidas por rodadura (Baránov, 1979).

Las pérdidas de potencia se componen en las pérdidas por rozamiento entre los cuerpos de rodadura y los anillos, entre los cuerpos de rodadura y el separador; las por resistencia interior (hidrodinámica) del lubricante y por el rozamiento en las empaquetaduras quedando el modelo matemático para su cálculo de la siguiente manera:

$$N_{PCojCR} = \frac{P_{rod} \times \pi \times d_m \times n}{1000 \times 60 \times 102} \quad (2.26)$$

Donde:

N_{PCojCR} : Pérdida de potencia en cojinetes de contacto rodante (kW).

f' : Coeficiente de rozamiento reducido al diámetro de la circunferencia.

d_m : Diámetro medio de la circunferencia (mm).

Algunos valores del coeficiente reducido de fricción los podemos encontrar en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Coeficiente reducido de fricción.

Tipo de rodamiento	Coeficiente de fricción
De bolas a rótulas	0,0010
Rodillos cilíndricos	0,0011
Axial de bolas	0,0013
Rígidos de bolas	0,0015
De rodillos a rótulas	0,0018

Rodillos cónicos	0,0018
Axial de rodillo a rótula	0,0018
Rodillos cilíndricos con jaulas	0,0020
De bolas con contacto angular (1 hilera)	0,0020
De bolas con contacto angular (2 hileras)	0,0024
De agujas	0,0025
Axial de rodillos cilíndricos	0,0050
Axial de agujas	0,0050

También existen las pérdidas debido a la fuerza o el peso ejercido por los árboles a los rodamientos, los cuales causan pérdidas al aumentar la fuerza de fricción en las bolas o rodillos al incrementarse las presiones de contacto de los anillos interiores y exteriores.

Metodología de cálculo.

1- Determinación del coeficiente de fricción para cojinetes de rodillos el coeficiente de fricción es muy pequeño por tener la propiedad de antifricción, oscila entre 0,0011 y 0.0018. El valor tomado para los cálculos es de 0,0015 que pertenece a los cojinetes de bolas.

2- Cálculo de la magnitud de carga normal equivalente que actúa sobre el par (Pi)

Para la determinación de la carga en los cojinetes se efectúa una rotación de los ejes de coordenadas, ubicando las cargas en los planos (XZ) y (YZ) respectivamente para obtener la carga resultante en el par

$$P_{ixz} = \sqrt{(P_{ixz})^2 + (P_{iyz})^2} \quad (N) \quad (2.27)$$

3- Determinación de la fuerza originada en una transmisión por cadena.

$$Q_i = 1.115 \times P_r \quad (N) \quad (2.28)$$

4- Determinación del momento torsor.

$$M = 9550 \frac{N}{n} \quad (N*m) \quad (2.29)$$

5- Determinación de la fuerza que depende del momento torsor en una

transmisión por cadena.

$$P_r = \frac{2 * M_t}{d_w} \quad (N) \quad (2.30)$$

d_w : Diámetro primitivo de la estrella.

6- Determinación de la fuerza que aparece producto de una transmisión por poleas y correa.

$$Q_i = \frac{2 * K * M_t}{d_p} \quad (N) \quad (2.31)$$

K : Coeficiente de carga dinámica que depende del carácter de la carga.

d_p : Diámetro de la polea (m)

7- Determinación de la velocidad relativa en el punto de contacto entre las superficies que forman en el par de fricción.

$$v = \frac{\pi * n * d}{60} \quad (m/s) \quad (2.32)$$

- Para el caso del cojinete $d=d_m$

$$d_m = \frac{D + d}{2} \quad (m)$$

8- Cálculo de la fuerza de fricción.

$$F_{fi} = f_i * P_i \quad (N) \quad (2.33)$$

9- Determinación de las pérdidas de potencia por fricción en el par.

$$N_{fi} = F_{fi} * v * 10^{-3} \quad (kW) \quad (2.34)$$

10- Cálculo de la eficiencia en el rodamiento.

$$\eta = \frac{N}{N + N_{fi}} \quad (2.35)$$

2.3 Metodología de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por engranajes.

Pérdidas de potencia.

Los dientes de evolvente tienen como característica que ruedan y se deslizan uno sobre otro, por consiguiente, a un movimiento relativo de los dientes se produce un rozamiento de rodamiento y otro de deslizamiento. Esta clase de rozamiento genera pérdidas de potencia. El rozamiento en el engrane calienta la transmisión, reduce la capacidad de las superficies de los dientes de resistir las acciones de las cargas exteriores, desgasta los dientes, disminuye el rendimiento de la transmisión, para evitar parte de los efectos negativos de la fuerza de rozamiento se debe lubricar el engranaje (Castillo, 1979).

Una transmisión proyectada y fabricada correctamente no debe calentarse ni producir ruido fuerte durante su funcionamiento. Un aumento excesivo de la temperatura de la transmisión por engranaje tiene lugar por la insuficiencia de la derivación del calor o por las excesivas pérdidas interiores.

La elevación de la temperatura puede ser provocada por tener muy poca viscosidad el aceite (incremento del rozamiento debido al contacto directo de los dientes) o al contrario, demasiada viscosidad o por haber demasiada cantidad de aceite, lo que produce grandes pérdidas por su agitación.

La lubricación contribuye en gran medida a reducir las tensiones por contacto sobre las superficies de los dientes, puesto que su presencia entre los dientes hace que la presión se propague a una gran área y más uniformemente. Gracias a la lubricación se suaviza considerablemente la influencia de las irregularidades en las superficies de los dientes y disminuye la fuerza del choque al entrar estos en engrane.

Los dos ejes de un engranaje pueden ser paralelos, cortarse o cruzarse. En el primer caso, se utilizan engranajes rectos o helicoidales, y cuando los ejes no son paralelos se utilizan engranajes que, en general, son helicoidales cruzados, de tornillo sinfín, cónicos o hipoidales. Si los ejes son paralelos o se cortan, se puede conseguir que el deslizamiento en los puntos de contacto sea pequeño y,

por tanto, el rendimiento alto. Si los ejes son cruzados no se puede evitar un deslizamiento alto y, por tanto, el rendimiento será más bajo (Cardona, 2001).

Las pérdidas en el engranaje surgen debido al rozamiento de deslizamiento y rodamiento. La magnitud de estas pérdidas depende de la forma de los dientes, de su cantidad y del coeficiente de rozamiento en el engrane. Las pérdidas principales son las originadas por el rozamiento de deslizamiento.

La magnitud de estas pérdidas depende de la calidad superficial (acabado) de los dientes, de las propiedades y de la cantidad de lubricante, de la velocidad de las ruedas, de la magnitud de la carga a transmitir, puesto que todos estos factores influyen en la magnitud del coeficiente de rozamiento. Los experimentos han mostrado que el coeficiente de rozamiento disminuye con el aumento de la viscosidad del aceite, de la velocidad de deslizamiento y la velocidad periférica.

De acuerdo a la rugosidad superficial, la velocidad periférica y la viscosidad del lubricante, el coeficiente de rozamiento “ f ” puede variar en los Límites de: 0,03 a 0,10. En las transmisiones abiertas la magnitud del coeficiente f crece bruscamente y puede alcanzar las magnitudes de 0,7 a 0,8. En las transmisiones que poseen ruedas de plástico tienen como distinción altas propiedades de antifricción, por lo cual el coeficiente f para las transmisiones puede ser menor a igual a 0,08.

La magnitud media de las pérdidas para una potencia que se transmite N , en kW, se puede determinar aproximadamente por la siguiente expresión:

$$N_{PEng} = \frac{\pi \times \varepsilon \times f}{2} \left(\frac{1}{z_1} \pm \frac{1}{z_2} \right) \times N \quad (2.36)$$

En esta expresión se utiliza el signo (+) para el engrane exterior y (-) para el interior.

Donde:

N_{PEng} : Pérdida de potencia en el engranaje, en kW.

ε : Acabado superficial en los dientes.

f : Coeficiente de fricción.

z_1 : Número de dientes del engrane conductor.

z_2 : Número de dientes del engrane conducido.

N : Potencia en el árbol conductor, en kW.

Pérdidas en la agitación del aceite no es posible determinarlas analíticamente, con este fin se usa la expresión siguiente:

$$N_{P_{Agit}} = 75 \times 10^{-5} v \times b \sqrt{v \times \nu \frac{200}{z_1 + z_2}} \quad (2.37)$$

Donde:

$N_{P_{Agit}}$: Pérdidas de potencia por la agitación del aceite, kW.

v : Velocidad periférica (m/s).

b : Ancho de las ruedas (mm).

ν : Viscosidad del aceite (Cst).

Para un cálculo más detallado a fin de diferenciar los tipos de engranes se calcula la pérdida por el tipo de ángulo que tiene el diente.

$$M_t = N/n \quad (2.38)$$

M_t : Momento torsor que trasmite la rueda 1(Nm).

n : Frecuencia de rotación (rpm)

$$P_{12} = M_t / r_1 \quad (2.39)$$

Donde:

P_{12} : Fuerza en el centro instantáneo de rotación para el movimiento relativo de la rueda (N).

$$D_p = y_E / \pi \times z \quad (2.40)$$

D_p : Diámetro primitivo (m).

y_E : Paso de la rueda dentada (m).

Si el engrane es helicoidal (presenta ángulos en los dientes) entonces:

$$P_{12} \times \sin \beta \quad (2.41)$$

Donde:

$\text{sen}\beta$: Ángulo del diente con respecto al árbol de apoyo.

$$M_2 = P_{12} \times r_2 \times \cos \alpha - \mu \times P_{12} (r_2 \times \text{sen} \alpha + x) \quad (2.42)$$

Donde:

M_2 : Momento de fuerzas de resistencia útil sobre la rueda 2 (Nm).

r_2 : Radio de la circunferencia primitiva rueda 2 (m).

α : Ángulo del engranaje en la sección frontal.

x : Distancia entre el polo del engranaje y el punto K de contacto (m).

$$M_1 = -M_2 \frac{r_1}{r_2} \quad (2.43)$$

Donde:

M_1 : Momento producido por las fuerzas motrices en dependencia de la variación de "x" en función de la posición del punto de contacto.

Se desprecian los segundos términos en el numerador y en el denominador de la expresión hallada a causa de su pequeña magnitud, obtenemos:

$$W_{FR} = \mu \frac{M_2}{r_2 \times \cos^2 \alpha} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \frac{l_1^2 + l_2^2}{2} \quad (2.44)$$

W_{FR} : Trabajo elemental de fricción (Nm).

l_1 : Longitud de la línea práctica de engranaje (m).

Por mediciones prácticas se ha determinado que: $l_1 = l_2 = 2,3$ m (Castillo, 1979)

$$w_2 = \frac{\pi \times r \times n}{60} \quad (2.45)$$

w_2 : Velocidad angular (rad/seg).

$$t = \frac{l_1^2 + l_2^2}{r_2 \times w_2 \times \cos \alpha} \quad (2.46)$$

t : Tiempo de trabajo de un par de dientes (seg.).

$$t_T = t \times z_n \quad (2.47)$$

t_T : Tiempo total de engrane (seg.)

$$N_{FR} = \frac{W_{FR}}{t_T} \quad (2.48)$$

Donde:

N_{FR} : Potencia media de fricción (kw).

$$\eta_D = \frac{N}{N + N_{FR}} \quad (2.49)$$

η_D : Eficiencia en el diente del engrane.

Según Castillo, 1979.

La expresión general para el cálculo de la pérdida de potencia sería:

$$N_p = N_{PEng} + N_{PAgit} + N_{PCoj} + N_{FR} \quad (\text{kW}) \quad (2.50)$$

Según Benlloch Maria (1986), para aumentar el coeficiente de rendimiento es necesario efectuar la transmisión con el mayor número posible de dientes (siendo prefijados los diámetros de las ruedas), asegurar que la superficie de los dientes esté suficientemente lisa y emplear un lubricante de viscosidad óptima en función de la temperatura ambiente.

Durante el funcionamiento es necesario cargar en lo posible la transmisión con la máxima carga admisible. Con la disminución de la carga, disminuye el coeficiente de rendimiento de la transmisión, ya que incrementa el valor relativo de las pérdidas de las marchas en vacío (pérdidas en la agitación del aceite y en los cojinetes, condicionadas por el peso de las ruedas y de los árboles (Reshetov, 1985; Zinoviev, 2001).

Metodología de cálculo.

Para el cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por engranajes se elaboró la siguiente metodología:

1. Calcular las pérdidas debidas a la agitación del lubricante (N_{PAgit}), según ecuación 2.2.
2. Calcular las pérdidas en los engranes (N_{PEng}), según ecuación 2.36.
3. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{PCoj}), según la ecuación 2.26.
4. Calcular las pérdidas de potencia por el tipo de ángulo que tiene el diente según ecuación 2.38.

5. Calcular las pérdidas de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.50.

6. Calcular la eficiencia (η) para cada término de la ecuación.

$$\eta_1 = \frac{N}{N + N_{PAgit}} \quad \text{Eficiencia en la agitación del aceite} \quad (2.51)$$

$$\eta_2 = \frac{N}{N + N_{PEng}} \quad \text{Eficiencia en la transmisión por engranajes} \quad (2.52)$$

$$\eta_3 = \frac{N}{N + N_{PCoj}} \quad \text{Eficiencia en los cojinetes} \quad (2.53)$$

$$\eta_4 = \frac{N}{N + N_{FR}} \quad \text{Eficiencia en la fricción} \quad (2.54)$$

7. Calcular la eficiencia total de la transmisión (η_i):

$$\eta_i = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4 \quad (2.55)$$

2.4 Metodología de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por correas.

Las pérdidas en una transmisión por correa se componen de las pérdidas (Nel), relacionadas con la elasticidad de la correa y condicionadas por el deslizamiento en las poleas y el rozamiento interno entre las partículas de las correas al variar las flexiones, extensiones y compresiones y las pérdidas por la resistencia del aire al movimiento de la correa y de las poleas, así como por frotamiento de las poleas en los apoyos.

En una transmisión por correa no solo sirven de índice de los gastos no rentables, sino que las pérdidas se convierten en calor a causa de esto, ante todo se calienta la correa. A diferencia de los materiales que se emplean en la mayoría de los elementos de máquinas, los materiales que se utilizan en las correas (fibras naturales o artificiales, goma y distintos compuestos de impregnación) son muy sensibles al calentamiento. Con el aumento de la temperatura, la resistencia mecánica y la longevidad de las correas disminuyen bruscamente. Puesto a igualdad de las demás condiciones la temperatura de la correa es proporcional a las pérdidas, magnitud de (Nel) que

puede utilizarse como uno de los índices de la capacidad de trabajo de la transmisión. Las pérdidas por resistencia del aire se toman en consideración sólo en casos particulares, por ejemplo, en las poleas de gran diámetro dotadas de rayos: en las transmisiones ordinarias, incluso en las rápidas, el valor de las pérdidas de este tipo es insignificante.

$$N_{el} = F \times v \times k_p \quad (\text{kW}) \quad (2.56)$$

F: área de la sección transversal de la correa. (m^2)

v: velocidad de la correa (m/s)

k_p : Coeficiente de proporcionalidad.

$$v = \frac{\pi \times (D + h) \times n}{60 \times 100} \quad (\text{m / s}) \quad (2.57)$$

D: Diámetro de la polea (m)

h: Espesor de la correa (cm)

El rendimiento de una transmisión por correa se determina de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{N}{N + N_{el}} \quad (2.58)$$

Metodología de cálculo.

Para el cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por correa se elaboró la siguiente metodología:

1. Calcular velocidad de la correa:

$$v = \frac{\pi \times r_1 \times n_1}{60 \times 100} \quad (\text{m/s}) \quad (2.59)$$

Donde:

d_1 : Diámetro de la polea conductora (m)

2. Calcular el esfuerzo útil

$$k_0 = w \frac{h}{d_{\min}} \quad (2.60)$$

Donde:

w : Constante.

h : Espesor de la correa (m).

d_{\min} : Diámetro de la polea menor (m).

3. Calcular el esfuerzo proporcionado por la fuerza periférica que transmite la correa.

$$k = k_0 \times C_v \times C_\alpha \times C_0 \times C_r \quad (2.61)$$

Donde:

C_v : Coeficiente de velocidad (tabla 2.4).

C_α : Coeficiente del ángulo abrazo por la correa (tabla 2.5).

C_0 : Coeficiente que depende del esfuerzo de la correa (tabla 2.3).

C_r : Coeficiente del régimen de trabajo y la carga dinámica (tabla 2.6).

4. Calcular coeficiente de proporcionalidad (K_p)

$$k_p = k \times \sigma_0 \frac{h}{d_1} \quad (2.62)$$

5. Calcular la pérdida de potencia por deslizamiento debido a la elasticidad de la correa (N_{PElast}), según ecuación 2.56.

6. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{PCoj}), según la ecuación 2.26.

7. Calcular la pérdida de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.50

8. Calcular la eficiencia (η) para cada término de la ecuación.

$$\eta_1 = \frac{N}{N + N_{PElast}} \quad (2.63)$$

$$\eta_2 = \frac{N}{N + N_{PCoj}} \quad (2.64)$$

9. Calcular la eficiencia total de la transmisión (η_t).

$$\eta_t = \eta_1 \times \eta_2 \quad (2.65)$$

10. Calcular el coeficiente de pérdida (k_{pe}), según ecuación 2.75

Tabla 2.3 Coeficiente C_0 que depende de las condiciones del esfuerzo de la correa.

Transmisión por correa	Ángulo de inclinación del eje de transmisión hacia el horizonte: C_0		
	Desde 0 hasta 60	Desde 60 hasta 80	Desde 80 hasta 90
Con autotensado de la correa	1,0	1,0	1,0
Abierta con tensado constante simple	1,0	0,9	0,8
Cruzada	0,9	0,8	0,7
Semicruzada y angular con rodillos guidores.	0,8	0,7	0,6

Tabla 2.4 Coeficiente de velocidad C_v .

Velocidad de la correa (m/s).	1	5	10	15	20	25	30
Para correas planas	1,04	1,03	1,0	0,95	0,88	0,79	0,68
Para correas trapezoidales	1,05	4,04	1,0	0,94	0,85	0,74	0,60

Tabla 2.5 Coeficiente C_α del ángulo de abrazo de la correa.

Ángulo de abrazado por la correa α° .	80	120	140	160	180	200
Para correas planas.	-	0,82	0,88	0,94	1,0	1,12
Para correas trapezoidales.	0,62	0,83	0,90	0,96	1,0	1,08

Tabla 2.6 Coeficiente C_r del régimen de trabajo y la carga dinámica.

Carga	Tipo de máquina	C_r
Normal. De arranque hasta 120% de la normal	Generadores eléctricos. Ventiladores, bombas y compresores centrífugos. Transportadores de cinta. Máquinas de corte continuo: tornos, taladradoras, rectificadoras.	1,0
De oscilaciones no bruscas. De arranque hasta 150% de la normal	Bombas y compresores de emboló de tres y más cilindros. Transportadores de placas. Máquinas de herramientas automáticas, fresadoras.	0,9
De oscilaciones Considerables. De arranque hasta de 200% de la normal.	Acoplamientos reversibles. Cepilladuras, mortajadoras. Bombas y compresores de embolo de uno y dos cilindros. Transportadores de tornillo y de rasquetas. Elevadores. Prensas de tornillo de excéntrica con volantes relativamente pesados.	0,8
De choque y muy irregular. De arranque hasta el 300% de lo normal	Elevadores, excavadores, dragas. Prensas de tornillo y de excéntrica con volantes relativamente ligeros. Cizallas, martillos, trapiches, molinos.	0,7

2.5 Metodología de cálculo para determinar las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por fricción.

Pérdidas de potencia.

Las pérdidas de potencia en la transmisión por fricción se pueden calcular mediante la ecuación:

$$N_{pf} = N_{pHist} + N_{pDesl} + N_{pCoj} \quad (\text{kW}) \quad (2.66)$$

Donde:

N_{pf} : Pérdidas de potencia en el elemento de máquina (kW).

N_{pHist} : Pérdidas de potencia por histéresis (kW).

N_{pDesl} : Pérdidas de potencia por deslizamiento (kW).

N_{pCoj} : Pérdidas de potencia en los cojinetes, en kW (ver ecuación 2.26

$$N_{pHist} = \frac{Q \times k}{10^7} (n_1 + n_2) \quad (2.67)$$

Siendo:

Q : Presión normal a la línea de contacto (N).

k : Coeficiente de rodadura (mm).

n_1 : Frecuencia de rotación de la rueda conductora (rpm).

n_2 : Frecuencia de rotación de la rueda conducida (rpm).

Mediante la ecuación 2.67 se determinan las pérdidas por histéresis al rodar las ruedas.

$$N_{pDesl} = s \times N \quad (2.68)$$

$$s = \frac{n_2 - n_2'}{n_2} \times 100 \quad (2.69)$$

Donde:

s : Deslizamiento (%)

N : Potencia en el árbol conductor (kW).

n_2 : Frecuencia de rotación de la rueda conducida (rpm).

n_2' : Frecuencia de rotación de rueda conducida bajo la carga (rpm).

La ecuación 1.3 nos muestra las pérdidas por deslizamiento elástico y la expresión 1.4, el deslizamiento en tanto por ciento (Yordanis, 2002).

Metodología de cálculo

Para el cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por fricción se elaboró la siguiente metodología:

1. Calcular el deslizamiento (s), según ecuación 2.69.

2. Calcular las pérdidas por deslizamiento (N_{pDesl}), según ecuación 2.68.
3. Calcular pérdidas por histéresis (N_{pHist}), según ecuación 2.67.
4. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{pCoj}), según ecuación 2.26.
5. Calcular las pérdidas de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.66.
6. Calcular el costo de las pérdidas para un mes de trabajo (C).

$$C = 0.09 \times N_p \times t_p \quad (2.70)$$

Donde:

C : Costo de las pérdidas de potencia para un mes de trabajo (\$).

t_p : Tiempo promedio trabajado en el mes, en horas.

8. Calcular la eficiencia (η) para cada término de la ecuación.

$$\eta_1 = \frac{N}{N + N_{pHist}} \quad (2.71)$$

$$\eta_2 = \frac{N}{N + N_{pDesl}} \quad (2.72)$$

$$\eta_3 = \frac{N}{N + N_{pCoj}} \quad (2.73)$$

9. Calcular la eficiencia total de la transmisión

$$\eta_t = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \quad (2.74)$$

10. Calcular el coeficiente de pérdida

$$k_{pe} = 1 - \eta_t \quad (2.75)$$

Donde:

k_{pe} : Coeficiente de pérdida de potencia (%).

η_t : Eficiencia total de la transmisión.

2.6 Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se presentan las distintas metodologías de cálculo para las pérdidas de potencia por fricción en elementos de máquinas entre las que tenemos:

- Transmisiones por cadenas.
- Transmisiones por correas y poleas.
- Transmisiones por engranajes.
- Transmisiones por fricción.
- Cojinetes de rodamiento.

CAPITULO 3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA POR FRICCIÓN EN TRANSMISIONES POR CADENAS DEL TRANSPORTADOR DE LA KTP-2M

CAPITULO 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA POR FRICCIÓN EN TRANSMISIONES POR CADENAS DEL TRANSPORTADOR DE LA KTP-2M

3.1 Cálculo de las pérdidas de potencia en transportador Primario.

Como el transportador primario cuenta con varias transmisiones realizaremos el cálculo de cada una de ellas.

3.1.1 Cálculo de las pérdidas de potencia en la primera transmisión (Árbol del primer ventilador) transmisión intermedia de los transportadores (contramarcha).

1. Diámetro primitivo empleando la fórmula (2.4)

Donde:

$$t = 19.05 \text{ mm}$$

$$z = 17$$

$$\text{Entonces } dw = 0.1035 \text{ m}$$

2. Velocidad de la cadena a razón de la fórmula (2.5)

Donde:

$$dw = 0.1035 \text{ m}$$

$$n = 869 \text{ rpm}$$

$$\pi = 3.14$$

$$\text{Entonces } V = 4.71 \text{ m/s}$$

3. Tiempo de carrera de la cadena empleando la fórmula (2.6)

Donde:

$$Y = 100$$

$$t = 0.01905 \text{ m}$$

$$v = 4.71 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces: } T = 0.40 \text{ s}$$

4. Fuerza útil aplicando la fórmula (2.7)

Donde:

$$N = 13 \text{ kW}$$

$$v = 4.71 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces } F_{\mu} = 2.76 \text{ kN}$$

5. Fuerza centrífuga empleando la fórmula (2.8)

Donde:

$$q = 1.9 \text{ kg/m}$$

$$v = 4.71 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces } F_f = 0.042, \text{ kN}$$

6. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.9)

Donde:

$$Z_1 = 17$$

$$\text{Entonces } \alpha_1 = 0.37 \text{ rad}$$

7. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.10)

$$Z_2 = 40$$

$$\text{Entonces } \alpha_2 = 0.16 \text{ rad}$$

8. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.11)

Donde:

$$r = 0.003 \text{ m} \text{ Radio del pasador de los eslabones.}$$

$$f = 0.25 \text{ Coeficiente de fricción.}$$

$$F_u = 2.76 \text{ kN}$$

$$F_f = 0.042 \text{ kN}$$

$$\alpha_1 = 0.37 \text{ rad}$$

$$W_{PEst1.1} = 0.000777 \text{ kN}$$

9. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.12)

$$W_{PEst1.1} = 0.000011 \text{ kN.m}$$

10. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.13)

Donde:

$$\alpha_2 = 0.16 \text{ rad}$$

$$W_{PEst2} = 0.000014 \text{ kN.m}$$

11. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.14)

$$W_{PEst2.1} = 0.000005 \text{ kN.m}$$

12. Calcular el trabajo de rozamiento de una articulación (kJ). Aplicando la fórmula (2.15)

$$\sum W_{Est} = 0.000807 \text{ kN.m}$$

13. Calcular el trabajo de rozamiento total en las articulaciones (kJ). Aplicando la fórmula (2.16)

$$W_{Ros} = y \sum W_{Est}$$

Donde:

$$y = 100$$

$$W_{Ros} = 0.0805 \text{ kN.m}$$

14. Calcular la pérdida de potencia en las articulaciones (N_{PArt}), según ecuación 2.2.

$$N_{PArt} = 0.20 \text{ kW}$$

15. Calcular pérdidas debido al lubricante, (N_{PAc}).

Son del 4 al 5 % de las pérdidas de potencia en las articulaciones (N_{PArt}) según ecuación 2.3.

$$N_{PAc} = 0.01 \text{ kW}$$

16. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{PCoj}).

$$\text{Asumimos por recomendación } N_{PCoj} = 0.10 \text{ kW}$$

17. Calcular la pérdida de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.1.

$$N_p = 0.31 \text{ kW}$$

18. Calcular la eficiencia total de la transmisión (η_t):

$$\eta_t = 0.9767$$

19. Calcular el coeficiente de pérdida (k_{pe}), según ecuación 2.75 (Dobrovolski, 1980; Yohalexis, 2002).

$$k_{pe} = 0.0232$$

3.1.2 Cálculo de las pérdidas de potencia en la segunda transmisión (transmisión intermedia de los transportadores (Contramarcha)) - (Árbol motriz del primer transportador)

1. Diámetro primitivo empleando la fórmula (2.4)

Donde:

$$t = 19.05 \text{ mm}$$

$$z = 16$$

$$\text{Entonces } dw = 0.098 \text{ m}$$

2. Velocidad de la cadena a razón de la fórmula (2.5)

Donde:

$$dw = 0.098 \text{ m}$$

$$n = 370 \text{ rpm}$$

$$\pi = 3.14$$

$$\text{Entonces } v = 1.90 \text{ m/s}$$

3. Tiempo de carrera de la cadena empleando la fórmula (2.6)

Donde:

$$Y = 111$$

$$t = 0.01905 \text{ m}$$

$$v = 1.90 \text{ m/s}$$

Entonces: $T = 1.11 \text{ s}$

4. Fuerza útil aplicando la fórmula (2.7)

Donde:

$$N = 12.69 \text{ kW}$$

$$v = 1.9 \text{ m/s}$$

Entonces $F_{\mu} = 6.67 \text{ kN}$

5. Fuerza centrífuga empleando la fórmula (2.8)

Donde:

$$q = 1.9 \text{ kg/m}$$

$$v = 1.90 \text{ m/s}$$

Entonces $F_f = 0.068, \text{ kN}$

6. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.9)

Donde:

$$Z_1 = 16$$

Entonces $\alpha_1 = 0.39 \text{ rad}$

7. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.10)

$$Z_2 = 32$$

Entonces $\alpha_2 = 0.20 \text{ rad}$

8. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.11)

Donde:

$r = 0.003\text{m}$ Radio del pasador de los eslabones.

$f = 0.25$ Coeficiente de fricción.

$$F_u = 6.67 \text{ kN}$$

$$F_f = 0.068 \text{ kN}$$

$$\alpha_1 = 0.39 \text{ rad}$$

$$W_{PEst1.1} = 0.001970 \text{ kN}$$

9. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.12)

$$W_{PEst1.1} = 0.000019 \text{ kN.m}$$

10. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.13)

Donde:

$$\alpha_2 = 0.20 \text{ rad}$$

$$W_{PEst2} = 0.001001 \text{ kN.m}$$

11. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.14)

$$W_{PEst2.1} = 0.000010 \text{ kN.m}$$

12. Calcular el trabajo de rozamiento de una articulación (kJ). Aplicando la fórmula (2.15)

$$\sum W_{Est} = 0.003 \text{ kN.m}$$

13. Calcular el trabajo de rozamiento total en las articulaciones (kJ). Aplicando la fórmula (2.16)

$$W_{Ros} = y \sum W_{Est}$$

Donde:

$$y = 111$$

$$W_{Ros} = 0.333 \text{ kN.m}$$

14. Calcular la pérdida de potencia en las articulaciones (N_{PArt}), según ecuación 2.2.

$$N_{PArt} = 0.30 \text{ kW}$$

15. Calcular pérdidas debido al lubricante, (N_{PAc}).

Son del 4 al 5 % de las pérdidas de potencia en las articulaciones (N_{PArt}) según ecuación 2.3.

$$N_{PAc} = 0.015 \text{ kW}$$

16. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{PCoj}).

Asumimos por recomendación $N_{pCoj} = 0.10$ kW

17. Calcular la pérdida de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.1.

$$N_p = 0.415 \text{ kW}$$

18. Calcular la eficiencia total de la transmisión (η_t): aplicando la fórmula (2.20)

$$\eta_t = 0.9681$$

19. Calcular el coeficiente de pérdida (k_{pe}), según ecuación 2.75 (Dobrovolski, 1980; Yohalexis, 2002).

$$k_{pe} = 0.0319$$

3.1.3 Cálculo de las pérdidas de potencia en la tercera transmisión por cadena (Árbol motriz del primer transportador – Árbol inferior del primer transportador)

1. Diámetro primitivo empleando la fórmula (2.4)

Donde:

$$t = 0.058 \text{ mm}$$

$$z = 10$$

$$\text{Entonces } dw = 0.184 \text{ m}$$

2. Velocidad de la cadena a razón de la fórmula (2.5)

Donde:

$$dw = 0.184 \text{ m}$$

$$n = 869 \text{ rpm}$$

$$\pi = 3.14$$

$$\text{Entonces } v = 1.78 \text{ m/s}$$

3. Tiempo de carrera de la cadena empleando la fórmula (2.6)

Donde:

$$Y = 110$$

$$t = 0.058 \text{ m}$$

$$v = 1.78 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces: } T = 3.58 \text{ s}$$

4. Fuerza útil aplicando la fórmula (2.7)

Donde:

$$N = 12.25 \text{ kW}$$

$$v = 1.78 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces } F_{\mu} = 6.88 \text{ kN}$$

5. Fuerza centrífuga empleando la fórmula (2.8)

Donde:

$$q = 1.9 \text{ kg/m}$$

$$v = 1.78 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces } F_f = 0.006 \text{ kN}$$

6. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.9)

Donde:

$$Z_1 = 10$$

$$\text{Entonces } \alpha_1 = 0.63 \text{ rad}$$

7. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.10)

$$Z_2 = 10$$

$$\text{Entonces } \alpha_2 = 0.63 \text{ rad}$$

8. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.11)

Donde:

$$r = 0.005 \text{ m} \text{ Radio del pasador de los eslabones.}$$

$$f = 0.25 \text{ Coeficiente de fricción.}$$

$$F_u = 6.88 \text{ kN}$$

$$F_f = 0.006 \text{ kN}$$

$$\alpha_1 = 0.63 \text{ rad}$$

$$W_{PEst1.1} = 0.005427 \text{ kN}$$

9. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.12)

$$W_{PEst1.1} = 0.000004 \text{ kN.m}$$

10. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.13)

Donde:

$$\alpha_2 = 0.63 \text{ rad}$$

$$W_{PEst2} = 0.005427 \text{ kN.m}$$

11. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.14)

$$W_{PEst2.1} = 0.000004 \text{ kN.m}$$

12. Calcular el trabajo de rozamiento de una articulación (kJ). Aplicando la fórmula (2.15)

$$\sum W_{Est} = 0.010862 \text{ kN.m}$$

13. Calcular el trabajo de rozamiento total en las articulaciones (kJ). Aplicando la fórmula (2.16)

$$W_{Ros} = y \sum W_{Est}$$

Donde:

$$y = 110$$

$$W_{Ros} = 1.1948 \text{ kN.m}$$

14. Calcular la pérdida de potencia en las articulaciones (N_{PArt}), según ecuación 2.2.

$$N_{PArt} = 0.333 \text{ kW}$$

15. Calcular pérdidas debido al lubricante, (N_{PAc}).

Son del 4 al 5 % de las pérdidas de potencia en las articulaciones (N_{PArt}) según ecuación 2.3.

$$N_{PAc} = 0.016 \text{ kW}$$

16. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{PCoj}).

$$\text{Asumimos por recomendación } N_{PCoj} = 0.10 \text{ kW}$$

17. Calcular la pérdida de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.1.

$$N_p = 0.45 \text{ kW}$$

18. Calcular la eficiencia total de la transmisión (η_t): aplicando la fórmula (2.20).

$$\eta_t = 0.964$$

19. Calcular el coeficiente de pérdida (k_{pe}), según ecuación 2.75 (Dobrovolski, 1980; Yohalexis, 2002).

$$k_{pe} = 0.036$$

En la otra cadena, las dimensiones son las mismas que la analizada anteriormente, por lo tanto tiene la misma pérdida y su eficiencia es igual.

3.1.4 Análisis de los resultados.

Después de haber realizado los cálculos y determinar los valores de las pérdidas de potencia por fricción se pueden resumir los siguientes resultados:

Tabla 3.1 Representación de los resultados en las transmisiones por cadenas en el primer transportador.

Transmisiones	Pérdida de potencia por fricción (kW)	Eficiencia
Transmisión 1	0.31	0.9767
Transmisión 2	0.41	0.9681
Transmisión 3	0.45	0.9640
Transmisión 4	0.45	0.9640

3.2 Cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en el transportador secundario.

3.2.1 Cálculo de las pérdidas de potencias en la primera transmisión por cadena transmisión intermedia de los transportadores (contramarcha) – transmisión intermedia del segundo transportador (contramarcha).

1. Diámetro primitivo empleando la fórmula (2.4)

Donde:

$$t = 19.05 \text{ mm}$$

$$z = 16$$

Entonces $dw = 0.098 \text{ m}$

2. Velocidad de la cadena a razón de la fórmula (2.5)

Donde:

$dw = 0.098 \text{ m}$

$n = 370 \text{ rpm}$

$\pi = 3.14$

Entonces $v = 1.90 \text{ m/s}$

3. Tiempo de carrera de la cadena empleando la fórmula (2.6)

Donde:

$Y = 122$

$t = 0.01905 \text{ m}$

$v = 1.90 \text{ m/s}$

Entonces: $T = 1.22 \text{ s}$

4. Fuerza útil aplicando la fórmula (2.7)

Donde:

$N = 10 \text{ kW}$

$v = 1.90 \text{ m/s}$

Entonces $F_{\mu} = 5.26 \text{ kN}$

5. Fuerza centrífuga empleando la fórmula (2.8)

Donde:

$q = 1.9 \text{ kg/m}$

$v = 1.90 \text{ m/s}$

Entonces $F_f = 0.00686 \text{ kN}$

6. Ángulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.9)

Donde:

$Z_1 = 16$

Entonces $\alpha_1 = 0.39 \text{ rad}$

7. Ángulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.10)

$$Z_2 = 22$$

Entonces $\alpha_2 = 0.28$ rad

8. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.11)

Donde:

$r = 0.003$ m Radio del pasador de los eslabones.

$f = 0.25$ Coeficiente de fricción.

$$F_u = 5.26 \text{ kN}$$

$$F_f = 0.00686 \text{ kN}$$

$$\alpha_1 = 0.39 \text{ rad}$$

$$W_{PEst1.1} = 0.001540 \text{ kN.m}$$

9. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.12)

$$W_{PEst1.1} = 0.000002 \text{ kN.m}$$

10. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.13)

Donde:

$$\alpha_2 = 0.28 \text{ rad}$$

$$W_{PEst2} = 0.001105 \text{ kN.m}$$

11. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.14)

$$W_{PEst2.1} = 0.000001 \text{ kN.m}$$

12. Calcular el trabajo de rozamiento de una articulación (kJ). Aplicando la fórmula (2.15)

$$\sum W_{Est} = 0.002648 \text{ kN.m}$$

13. Calcular el trabajo de rozamiento total en las articulaciones (kJ). Aplicando la fórmula (2.16)

$$W_{Ros} = y \sum W_{Est}$$

Donde:

$$y = 122$$

$$W_{Ros} = 0.323 \text{ kN.m}$$

14. Calcular la pérdida de potencia en las articulaciones (N_{PArt}), según ecuación 2.2.

$$N_{PArt} = 0.26 \text{ kW}$$

15. Calcular pérdidas debido al lubricante, (N_{PAc}).

Son del 4 al 5 % de las pérdidas de potencia en las articulaciones (N_{PArt}) según ecuación 2.3.

$$N_{PAc} = 0.01 \text{ kW}$$

16. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{PCoj}).

$$\text{Asumimos por recomendación } N_{PCoj} = 0.10 \text{ kW}$$

17. Calcular la pérdida de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.1.

$$N_p = 0.37 \text{ kW}$$

18. Calcular la eficiencia total de la transmisión (η_t): aplicando la fórmula (2.20).

$$\eta_t = 0.964$$

19. Calcular el coeficiente de pérdida (k_{pe}), según ecuación 2.75 (Dobrovolski, 1980; Yohalexis, 2002).

$$k_{pe} = 0.036$$

3.2.2 Cálculo de las pérdidas de potencias en la segunda transmisión por cadena (transmisión intermedia del segundo transportador (contramarcha) – árbol propulsor).

1. Diámetro primitivo empleando la fórmula (2.4)

Donde:

$$t = 19.05 \text{ mm}$$

$$z = 16$$

$$\text{Entonces } dw = 0.098 \text{ m}$$

2. Velocidad de la cadena a razón de la fórmula (2.5)

Donde:

$$dw = 0.098 \text{ m}$$

$$n = 269 \text{ rpm}$$

$$\pi = 3.14$$

$$\text{Entonces } v = 1.38 \text{ m/s}$$

3. Tiempo de carrera de la cadena empleando la fórmula (2.6)

Donde:

$$Y = 122$$

$$t = 0.01905 \text{ m}$$

$$v = 1.38 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces: } T = 1.58 \text{ s}$$

4. Fuerza útil aplicando la fórmula (2.7)

Donde:

$$N = 9.63 \text{ kW}$$

$$v = 1.38 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces } F_{\mu} = 6.97 \text{ kN}$$

5. Fuerza centrífuga empleando la fórmula (2.8)

Donde:

$$q = 1.9 \text{ kg/m}$$

$$v = 1.38 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces } F_f = 0.0036 \text{ kN}$$

6. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.9)

Donde:

$$Z_1 = 16$$

$$\text{Entonces } \alpha_1 = 0.39 \text{ rad}$$

7. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.10)

$$Z_2 = 32$$

Entonces $\alpha_2 = 0.20$ rad

8. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.11)

Donde:

$r = 0.003$ m Radio del pasador de los eslabones.

$f = 0.25$ Coeficiente de fricción.

$F_u = 6.97$ kN

$F_f = 0.0036$ kN

$\alpha_1 = 0.39$ rad

$W_{PEst1.1} = 0.002039$ kN.m

9. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.12)

$W_{PEst1.1} = 0.000001$ kN.m

10. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.13)

Donde:

$\alpha_2 = 0.20$ rad

$W_{PEst2} = 0.001046$ kN.m

11. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.14)

$W_{PEst2.1} = 0.000001$ kN.m

12. Calcular el trabajo de rozamiento de una articulación (kJ). Aplicando la fórmula (2.15).

$\sum W_{Est} = 0.003087$ kN.m

13. Calcular el trabajo de rozamiento total en las articulaciones (kJ). Aplicando la fórmula (2.16)

$W_{Ros} = y \sum W_{Est}$

Donde:

$y = 115$

$$W_{Ros} = 0.355 \text{ kN.m}$$

14. Calcular la pérdida de potencia en las articulaciones (N_{PArt}), según ecuación 2.2.

$$N_{PArt} = 0.22 \text{ kW}$$

15. Calcular pérdidas debido al lubricante, (N_{PAc}).

Son del 4 al 5 % de las pérdidas de potencia en las articulaciones (N_{PArt}) según ecuación 2.3.

$$N_{PAc} = 0.01 \text{ kW}$$

16. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{PCoj}).

Asumimos por recomendación $N_{PCoj} = 0.10 \text{ kW}$

17. Calcular la pérdida de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.1.

$$N_p = 0.33 \text{ kW}$$

18. Calcular la eficiencia total de la transmisión (η_t): aplicando la fórmula (2.20).

$$\eta_t = 0.964$$

19. Calcular el coeficiente de pérdida (k_{pe}), según ecuación 2.75 (Dobrovolski, 1980; Yohalexis, 2002).

$$k_{pe} = 0.036$$

3.2.3 Cálculo de las pérdidas de potencias en la tercera transmisión por cadena (Árbol propulsor – Árbol inferior).

1. Diámetro primitivo empleando la fórmula (2.4)

Donde:

$$t = 0.0508 \text{ m}$$

$$z = 10$$

$$\text{Entonces } dw = 0.164 \text{ m}$$

2. Velocidad de la cadena a razón de la fórmula (2.5)

Donde:

$$dw = 0.164 \text{ m}$$

$$n = 135 \text{ rpm}$$

$$\pi = 3.14$$

$$\text{Entonces } v = 1.16 \text{ m/s}$$

3. Tiempo de carrera de la cadena empleando la fórmula (2.6)

Donde:

$$Y = 78$$

$$t = 0.0508 \text{ m}$$

$$v = 1.16 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces: } T = 3.42 \text{ s}$$

4. Fuerza útil aplicando la fórmula (2.7)

Donde:

$$N = 9.30 \text{ kW}$$

$$v = 1.16 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces } F_{\mu} = 8.01 \text{ kN}$$

5. Fuerza centrífuga empleando la fórmula (2.8)

Donde:

$$q = 1.9 \text{ kg/m}$$

$$v = 1.16 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces } F_f = 0.0025 \text{ kN}$$

6. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.9)

Donde:

$$Z_1 = 10$$

$$\text{Entonces } \alpha_1 = 0.63 \text{ rad}$$

7. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.10)

$$Z_2 = 10$$

$$\text{Entonces } \alpha_2 = 0.63 \text{ rad}$$

8. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.11)

Donde:

$r = 0.003\text{m}$ Radio del pasador de los eslabones.

$f = 0.25$ Coeficiente de fricción.

$F_u = 8.01\text{ kN}$

$F_f = 0.0025\text{ kN}$

$\alpha_1 = 0.63\text{ rad}$

$W_{PEst1.1} = 0.003785\text{ kN.m}$

9. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.12)

$W_{PEst1.1} = 0.000001\text{ kN.m}$

10. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.13)

Donde:

$\alpha_2 = 0.63\text{ rad}$

$W_{PEst2} = 0.003785\text{ kN.m}$

11. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.14)

$W_{PEst2.1} = 0.000001\text{ kN.m}$

12. Calcular el trabajo de rozamiento de una articulación (kJ). Aplicando la fórmula (2.15)

$\sum W_{Est} = 0.007572\text{ kN.m}$

13. Calcular el trabajo de rozamiento total en las articulaciones (kJ). Aplicando la fórmula (2.16).

$W_{Ros} = y \sum W_{Est}$

Donde:

$y = 78$

$W_{Ros} = 0.590\text{ kN.m}$

14. Calcular la pérdida de potencia en las articulaciones (N_{PArt}), según ecuación 2.2.

$$N_{PArt} = 0.17 \text{ kW}$$

15. Calcular pérdidas debido al lubricante, (N_{PAc}).

Son del 4 al 5 % de las pérdidas de potencia en las articulaciones (N_{PArt}) según ecuación 2.3.

$$N_{PAc} = 0.008 \text{ kW}$$

16. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{PCoj}).

$$\text{Asumimos por recomendación } N_{PCoj} = 0.10 \text{ kW}$$

17. Calcular la pérdida de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.1.

$$N_p = 0.28 \text{ kW}$$

18. Calcular la eficiencia total de la transmisión (η_t): aplicando la fórmula (2.20).

$$\eta_t = 0.97$$

19. Calcular el coeficiente de pérdida (k_{pe}), según ecuación 2.75 (Dobrovolski, 1980; Yohalexis, 2002).

$$k_{pe} = 0.03$$

En la otra cadena, las dimensiones son las mismas que la analizada anteriormente, por lo tanto tiene la misma pérdida y su eficiencia es igual.

3.2.4 Análisis de los resultados.

Tabla 3.2 Representación de los resultados en las transmisiones por cadenas en el segundo transportador.

Transmisiones	Pérdidas de potencia por fricción (kW)	Eficiencia
Transmisión 1	0.37	0.964
Transmisión 2	0.33	0.966

Transmisión 3	0.28	0.970
Transmisión 4	0.28	0.970

3.3 Cálculo de las pérdidas de potencia en la transmisión por cadena en el transportador de descarga.

1. Diámetro primitivo empleando la fórmula (2.4)

Donde:

$$t = 0.058 \text{ mm}$$

$$z = 10$$

$$\text{Entonces } dw = 0.184 \text{ m}$$

2. Velocidad de la cadena a razón de la fórmula (2.5)

Donde:

$$dw = 0.184 \text{ m}$$

$$n = 869 \text{ rpm}$$

$$\pi = 3.14$$

$$\text{Entonces } v = 1.78 \text{ m/s}$$

3. Tiempo de carrera de la cadena empleando la fórmula (2.6)

Donde:

$$Y = 110$$

$$t = 0.058 \text{ m}$$

$$v = 1.78 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces: } T = 3.58 \text{ s}$$

4. Fuerza útil aplicando la fórmula (2.7)

Donde:

$$N = 9.00 \text{ kW}$$

$$v = 1.78 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces } F_{\mu} = 5.16 \text{ kN}$$

5. Fuerza centrífuga empleando la fórmula (2.8)

Donde:

$$q = 1.9 \text{ kg/m}$$

$$v = 1.78 \text{ m/s}$$

$$\text{Entonces } F_f = 0.006 \text{ kN}$$

6. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.9)

Donde:

$$Z_1 = 10$$

$$\text{Entonces } \alpha_1 = 0.63 \text{ rad}$$

7. Angulo de giro de los eslabones al entrar y salir de la estrella conducida aplicando la fórmula (2.10)

$$Z_2 = 10$$

$$\text{Entonces } \alpha_2 = 0.63 \text{ rad}$$

8. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.11)

Donde:

$$r = 0.005 \text{ m} \text{ Radio del pasador de los eslabones.}$$

$$f = 0.25 \text{ Coeficiente de fricción.}$$

$$F_u = 5.16 \text{ kN}$$

$$F_f = 0.006 \text{ kN}$$

$$\alpha_1 = 0.63 \text{ rad}$$

$$W_{PEst1.1} = 0.0042 \text{ kN}$$

9. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conductora (kJ). Aplicando la fórmula (2.12)

$$W_{PEst1.1} = 0.000004 \text{ kN.m}$$

10. Calcular el trabajo de rozamiento al entrar los eslabones en la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.13)

Donde:

$$\alpha_2 = 0.63 \text{ rad}$$

$$W_{PEst2} = 0.0042 \text{ kN.m}$$

11. Calcular el trabajo de rozamiento al salir los eslabones de la estrella conducida (kJ). Aplicando la fórmula (2.14)

$$W_{PEst2.1} = 0.000004 \text{ kN.m}$$

12. Calcular el trabajo de rozamiento de una articulación (kJ). Aplicando la fórmula (2.15)

$$\sum W_{Est} = 0.00842 \text{ kN.m}$$

13. Calcular el trabajo de rozamiento total en las articulaciones (kJ). Aplicando la fórmula (2.16)

$$W_{Ros} = y \sum W_{Est}$$

Donde:

$$y = 110$$

$$W_{Ros} = 0.9262 \text{ kN.m}$$

14. Calcular la pérdida de potencia en las articulaciones (N_{PArt}), según ecuación 2.2.

$$N_{PArt} = 0.267 \text{ kW}$$

15. Calcular pérdidas debido al lubricante, (N_{PAc}).

Son del 4 al 5 % de las pérdidas de potencia en las articulaciones (N_{PArt}) según ecuación 2.3.

$$N_{PAc} = 0.013 \text{ kW}$$

16. Calcular la pérdida en los cojinetes (N_{PCoj}).

$$\text{Asumimos por recomendación } N_{PCoj} = 0.10 \text{ kW}$$

17. Calcular la pérdida de potencia en la transmisión (N_p), según ecuación 2.1.

$$N_p = 0.38 \text{ kW}$$

18. Calcular la eficiencia total de la transmisión (η_t): aplicando la fórmula (2.20).

$$\eta_t = 0.959$$

19. Calcular el coeficiente de pérdida (k_{pe}), según ecuación 2.75 (Dobrovolski, 1980; Yohalexis, 2002).

$$k_{pe} = 0.041$$

En la otra cadena, las dimensiones son las mismas que la analizada anteriormente, por lo tanto tiene la misma pérdida y su eficiencia es igual.

3.3.1 Análisis de los resultados.

Tabla 3.3 Representación de los resultados en las transmisiones por cadenas en el transportador de descarga.

Transmisiones	Pérdidas potencia por fricción (kW)	Eficiencia
Transmisión 1	0.38	0.959
Transmisión 2	0.38	0.959

3.4. Conclusiones del capítulo.

Las pérdidas por fricción que ocurren en las transmisiones por cadenas se corresponden con los valores recomendados por la bibliografía especializada y por los especialistas estando relacionado con los factores de diseño y explotación de estos elementos. Aunque se debe señalar que haciendo un análisis de todos los cálculos realizados en el transportador el valor de las pérdidas es de 3.64 kW, lo cual hace pensar a los diseñadores en buscar soluciones mediante las cuales se disminuyan la cantidad de transmisiones (sin que con ello se afecte la calidad y eficiencia del proceso productivo) con lo que se lograría disminuir las pérdidas de potencia y por lo tanto una mejor utilización de la potencia generada por el órgano motriz.

CONCLUSIONES.

1- La bibliografía consultada sobre el tema nos demuestra que los procesos de desgaste no son fenómenos de baja complejidad sino que presentan una alta dificultad para su comprensión y cálculos en general, por la cantidad de variantes que puede contener un mismo fenómeno, también la alta connotación económica que puede estar relacionada con los mismos los hacen procesos de gran importancia para la industria en general y un ejemplo de ello es que del 30 - 40 % de la energía que se genera en el mundo se consume producto de la fricción y del 80 - 90 % de los elementos que se sustituyen en las máquinas se debe al desgaste.

2- Se elaboraron las metodologías para el cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en:

- Transmisiones por cadenas.
- Transmisiones por engranajes.
- Transmisiones por correas y poleas.
- Transmisiones por fricción.
- Cojinetes de rodamiento.

3- Se aplicó la metodología de cálculo de las pérdidas de potencia por fricción en transmisiones por cadenas en el transportador de la KTP-2M donde se obtuvieron los siguientes resultados:

- Las pérdidas de potencia por fricción en el transportador primario son de 1,62 kW.
- Las pérdidas de potencia por fricción en el transportador secundario son de 1,26 kW.
- Las pérdidas de potencia por fricción en el transportador de descarga son de 0,76 kW.
- Las pérdidas totales en el transportador son de 3,64 kW.

RECOMEDACIONES.

- 1- Emplear las metodologías de cálculos confeccionadas para calcular las pérdidas de potencia por fricción en elementos de máquinas.
- 2- Tener en cuenta los gastos de potencia que se obtuvieron en el transportador de la KTP-2M a la hora de diseñar una nueva máquina.
- 3- Que se confeccionen software que agilicen el proceso de cálculo partiendo de las metodologías propuestas.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1- Amargos Hernández, Lyana. “Algunas consideraciones sobre el coeficiente de fricción”. Construcción de maquinaria. Villa Clara, 1988, Abril-Junio, Num. 2.
- 2- Baumeister, Theodore. Manual del Ingeniero mecánico. Segunda edición en español volumen I Editorial Mc Graw Hill Latinoamericana, S.A, Bogotá, Colombia.
- 3- Baránov, Teoría de Máquinas y Mecanismos, 1979.
- 4- Benloch María, José. Lubricantes y lubricación aplicada. Primera parte. Editorial Edición revolucionaria, Primera edición cubana, 1986. Tomada de la primera Edición de Barcelona, 1984.
- 5- C#3 Specification. Microsoft Corporation. Consultado en <http://www.msdn.microsoft.com/net>. Febrero 2010.
- 6- Calzadilla Méndez, Enrique. “Aleaciones cubanas antifricción usadas en la restauración de cojinetes”. Construcción de maquinarias. Villa Clara, 1988, julio-Septiembre, Núm. 3.
- 7- Cardona Foix, Salvador. Teoría de las máquinas. Editorial Ediciones UPC. Barcelona, 2001.
- 8- Castillo Asenjo, Gerardo. Teorías de mecanismos y máquinas: dinámicas de máquinas. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, 1979.
- 9- Chacón Feliciano, Yohalexis. “Confección de un software para la determinación de las pérdidas de potencia por fricción en las transmisiones por cadena”. (Trabajo de diploma). Uho “Oscar Lucero Moya”, Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica, 2002.
- 10-Cojinetes de rodamiento. Disponible en <http://www2.ing.puc.cl/icm2312/apuntes/roda/roda2.html>. Consultado el 10 de enero del 2010.
- 11- Decaer, Kart-Heinz. Elementos de máquinas. Editorial Ediciones Urno. Bilbao, 1980.
- 12- Dobrovolski, V. Elementos de máquinas. Editorial MIR. Moscú, 1980.

- 13-Dudley D., Fuller. Teoría y práctica de la lubricación. Editorial Edición Revolucionaria. La Habana, 1976. XIV.
- 14-Elementos de máquinas: Manual complementario. Editorial ISPJAE. Ciudad de La Habana, 1985.
- 15-García Pascual, Luis. Teorías de Máquinas: diseño y cálculo. Editorial ICAI. Madrid, 1982.
- 16-Golubev, Teoría de Máquinas y mecanismos. Editorial Instituto Cubano del Libro. La Habana, 1976.
- 17-Gunnerson, Eric. A programmer's introduction to C#. Publicado por Apress. USA 2000.
- 18-INGECLUB. Elementos de tribología. Disponible en <http://www.ingelub.com.co>. Consultado Mayo del 2010.
- 19-Kragelski, I.V. Fricción y lubricación. Editorial Mir. Moscú, 1981.
- 20-Martínez Escanaverino, José. Teorías y prácticas del rozamiento. Editorial ISPJAE. Ciudad de la Habana, 1986.
- 21-Martínez Pérez, Francisco. "Enfoque algorítmico para el cálculo del desgaste en pares de fricción, de materiales metálicos". Revista de metalurgia. Madrid, 2000, Vol. 36, Noviembre-Diciembre.
- 22-Martínez, M. "Introducción al estudio de la fricción y el desgaste de plásticos". Revista de plásticos modernos. Barcelona, 1994, Vol. Febrero, num.452.
- 23-Navarro Ojeda, Marcelo N. Recomendaciones metodológicas para la elaboración del informe técnico. Universidad de Holguín. Facultad de ingeniería. Holguín 2003.
- 24-Peraza López, Leonidas. "Resistencia al desgaste seco metal-metal" Tecnología mecánica. Villa Clara, 1988. Enero-Marzo, Num.1.
- 25-Perry, John. Manual de Ingeniería. Editorial Labor, S.A. (Barcelona-Madrid-Buenos Aires –Rio de Janeiro-México-Montevideo), 1966.
- 26-Reshetov, D. N. Elementos de máquinas. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1985.

- 27-Rodríguez Martínez, Calixto. "Notas sobre tribología. Términos y definiciones. Fricción externa". Construcción de maquinarias. Villa Clara, 1987, Julio-Septiembre, Num. 3.
- 28- Rodríguez Martínez, Calixto. Fundamentos de la fricción. Universidad de Oriente. ISJAM. Santiago de Cuba, 2003.
- 29-Rodríguez Martínez, Calixto. Tribología. Ciencia y técnica. Universidad de Oriente. ISJAM. Santiago de Cuba, 2003.
- 30-SCA Mecánica, S.A. Teoría de engranes. Disponible en: <http://www2.ing.puc.cl/icm2312/apuntes/cadenas/index.html>. Consultado en Febrero del 2008.
- 31-Shigley, Edgard Mitchell. Diseño en ingeniería mecánica. Editorial Mc Graw Hill. México, 1985.
- 32-Transmisión utilizando Cadenas de rodillos. Disponible en: <http://www2.ing.puc.cl/icm2312/apuntes/cadenas/index.html>. Consultado el 22 de Mayo del 2010.
- 33-Transmisiones utilizando correas trapeciales. Disponible en: <http://www2.ing.puc.cl/icm2312/apuntes/correas/index.html>. Consultado en Mayo 2010.
- 34-Zinoviev, V. A. Teorías de los mecanismos y máquinas. Editorial Ediciones UPC. Barcelona, 2001.