Sistemas de Transmisión de Velocidad en Turbinas de Viento

Programa	Fuentes Alternas de Energía y Generación Distribuida
Acrónimo del proyecto	FAE y GD
Tipo (nivel de distribución)	Público con reservas
Fecha de Entrega	2009
Reporte Numero	Eolo2-6
Estatus y Versión	Borrador, 1.00
Número de Páginas	24
Supervisor	Francisco M. González-Longatt
Autor	Alejandro J. Carantoña O.

fgLongatt.org.ve

Tabla de Contenido

Contenido **Pag.**
Tabla de Contenido 2
Índice de Figuras 3
Índice de Tablas 4
Introducción 5
Sistemas de Transmisión de Velocidades 6
Tipos de Sistemas de Transmisión 6
Transmisión por Ruedas de Fricción 6
Transmisión por Correas y Poleas 8
Transmisión por Engranes 15
Ventajas e inconvenientes 21
Comparaciones entre los sistemas de transmisión. 22
Conclusiones 23
Referencias Documentales 24

fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Índice de Figuras

Figura 1. Acción de la rueda de fricción conductora sobre la conducida……7

Figura 2. Cambio del sentido de giro de la rueda conductora por medio de la incorporación de una tercera rueda de ficción……...7

Figura 3. Tipos de poleas según las correas a utilizar……8

Figura 4. Forma Básica de un sistema de Transmisión por correas y poleas……..9

Figura 5. Clasificación de la transmisión por correa y poleas basada en el esquema o disposición de las poleas y correas en el accionamiento……...10

Figura 6. Correa Plana sobre una polea……11

Figura 7. Forma de Correa en V y su sección transversal……12

Figura 8. Sección Convencional de una correa trapezoidal……..12

Figura 9. Sección Estrecha de una correa trapezoidal……...13

Figura 10. Forma de una Correa Dentada……13

Figura 11. Forma Básica de un sistema de Transmisión por engranes……..15

Figura 12. Esquema para la ley de engrane……...17

Figura 13. Forma de un engranaje cilíndrico recto……17

Figura 14. Características de los engranajes……..18

Figura 15. Forma de un engranaje cilíndrico helicoidal, (a) engranaje helicoidal para ejes paralelos, (b) engranaje helicoidal para ejes cruzados a 90º……19

Figura 16. Tornillo sin fin y corona……..20

fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Índice de Tablas

Tabla 1. Comportamiento de los tipos básicos de correas ante algunos criterios comparativos……...14
Tabla 2. Tipos de engranajes cónicos……19
Tabla 3. Comparación entre los sistemas de transmisión de potencia……...22

fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Introducción

En el presente reporte de investigación se presentan los diferentes tipos de sistemas de transmisión mecánica que frecuentemente son empleados en el tren mecánico de turbinas de viento. En cada uno de ellos se resaltan sus principales características: relación de transmisión, eficiencia, elementos que la conforman, ventajas y desventajas, además de los materiales comúnmente usados.

Finalmente se presenta un cuadro comparativo en donde, usando ciertos criterios de evaluación se muestran los aspectos más resaltantes de los tipos de sistemas de transmisión, a fin de facilitar el proceso de selección de cualquiera de ellos.

fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Sistemas de Transmisión de Velocidades

Los sistemas de transmisión de velocidades es uno de los órganos de vital importancia en una turbina de viento, ya que esta permite el acople entre el eje de las palas del rotor (el cual recibe el nombre de eje de baja velocidad), y el eje del generador (conocido como eje de Alta velocidad). Dichos sistemas tienen como objetivo llevar, a los diferentes elementos de una máquina la potencia y el movimiento producidos por un elemento motriz de manera que la máquina pueda funcionar y cumplir la finalidad para la que fue construida. [1]

Tomando en cuenta la idea anterior se puede decir que un mecanismo multiplicador de velocidad es aquél que transforma la velocidad recibida de un elemento motor (velocidad de entrada) en una velocidad mayor (velocidad de salida).

En un mecanismo de transmisión podemos distinguir los siguientes elementos: elemento motriz y elemento conducido. Un elemento motriz. Es el que genera el movimiento, este elemento puede estar acoplado a un motor o ser accionado manualmente. El elemento conducido o arrastrado es el que recibe el movimiento generado por el elemento motriz

En el caso de un aerogenerador el objetivo es aumentar las rpm generadas por acción de los vientos que inciden en el rotor, hasta lograr las rpm necesarias en la cuales el generador comienza a producir energía [2].

Tipos de Sistemas de Transmisión

La transmisión de la fuerza y el movimiento producido por un motor se realiza mediante cadenas cinemáticas que son sistemas de elementos mecánicos convenientemente conectados para transmitir la fuerza y el movimiento. Los elementos mecánicos más empleados para transmitir la fuerza y el movimiento a través de cadenas cinemáticas son [1]:

- Transmisión por ruedas de fricción
- Transmisiones por poleas y correas
- Transmisión por engranajes.

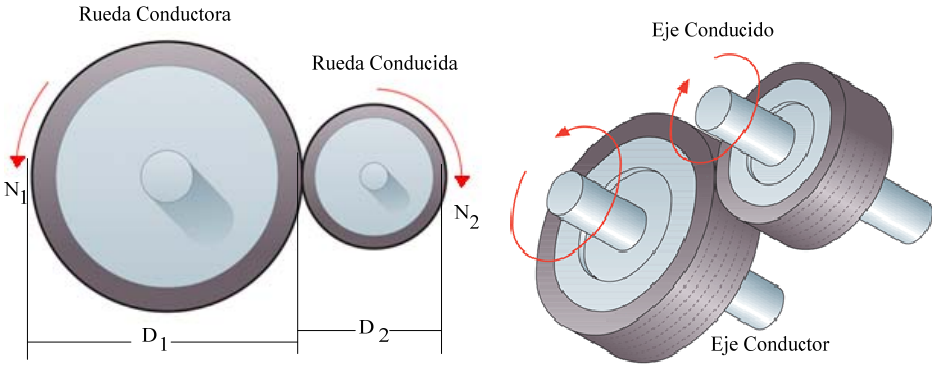
Todos estos elementos mecánicos pueden ir montados sobre los llamados ejes de transmisión o sobre árboles de transmisión. Los ejes de transmisión son piezas cilíndricas, generalmente de corta longitud, que sirven de soporte a poleas, ruedas de fricción, etc. Pueden ser fijos o moverse en sentido giratorio, y no transmiten fuerza sino únicamente movimiento [1].

Los árboles de transmisión son piezas cilíndricas más o menos largas que trabajan a torsión y flexión, son siempre giratorios y transmiten potencia y movimiento. En la práctica se utiliza muchas veces la expresión ejes de transmisión para designar tanto a los árboles de transmisión como a los ejes de transmisión propiamente dichos [1].

Transmisión por Ruedas de Fricción

La transmisión de movimiento mediante ruedas de fricción se realiza poniendo en contacto dos ruedas, de manera que una (Conductora) arrastra a la otra (Conducida) mediante la fuerza que produce el rozamiento entre ambas. Para poder transmitir el movimiento, las ruedas han de estar en contacto ejerciendo una cierta presión una sobre la otra. Así, al mover una de ellas arrastrará a la otra [1], tal como se muestra en la Figura 1.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve



a) Vista Frontal **b) Vista Lateral**

Figura 1. Acción de la rueda de fricción conductora sobre la conducida.

Desde el punto de vista técnico es posible considerar, como mínimo, cuatro operadores:

Eje conductor: que tiene el giro que queremos transmitir. Normalmente estará unido a un motor.

Rueda conductora: solidaria con el eje conductor, recoge el giro de este y lo transmite por fricción (rozamiento) a la rueda conducida

Rueda conducida: recoge el giro de la rueda conductora mediante fricción entre ambas.

Eje conducido: recibe el giro de la rueda conducida y lo transmite al receptor.

Desde el punto de vista tecnológico tenemos que considerar cuatro elementos:

D1: Diámetro de la rueda conductora
D2: Diámetro de la rueda conducida
N1: Velocidad del eje conductor
N2: Velocidad del eje conducido

Que están ligados mediante la siguiente relación:

$$N_1 D_1 = N_2 D_2 \tag{1}$$

$$N_2 = \frac{D_1 N_1}{D_2} \tag{2}$$

El sentido de giro de la rueda conducida es contrario al sentido de giro de la rueda conductora. Por tanto, si se quiere mantener el sentido de giro del motor se tiene que emplear un número impar de ruedas de fricción, como se observa en la Figura 2.

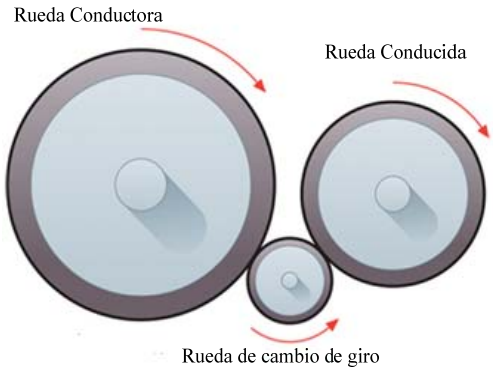


Figura 2. Cambio del sentido de giro de la rueda conductora por medio de la incorporación de una tercera rueda de ficción.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Las ruedas de fricción pueden ser cilíndricas, cónicas o esféricas. Esto permite transmitir el movimiento no sólo entre ejes paralelos, sino también entre ejes que se cortan o se cruzan en el espacio [1].

Este tipo de sistema de transmisión tiene el gran inconveniente de no poder transmitir grandes potencias, ya que puede resbalar una sobre otra, con la consiguiente pérdida de velocidad. Otro de los inconvenientes del uso de las ruedas de fricción es su desgaste, debido a que funcionan por rozamiento y presión [1].

Transmisión por Correas y Poleas

Los sistemas de transmisión de poleas y correas se emplean para transmitir la potencia mecánica proporcionada por el eje del motor entre dos ejes separados entre sí por una cierta distancia. La transmisión del movimiento por correas se debe al rozamiento de éstas sobre las poleas, de manera que ello sólo será posible cuando el movimiento rotórico y de torsión que se ha de transmitir entre ejes, sea inferior a la fuerza de rozamiento [2].

El valor del rozamiento depende, sobre todo, de la tensión de la correa y de la resistencia de ésta a la tracción; es decir, del tipo de material con el que está construida (cuero, fibras, hilos metálicos recubiertos de goma, etc.) y de sus dimensiones [2].

Las poleas son ruedas con una o varias hendiduras en la llanta, sobre las cuales se apoyan las correas. En la Tabla 1 se presentan varios modelos de poleas. Las correas son cintas cerradas de cuero y otros materiales que se emplean para transmitir movimiento de rotación entres dos ejes generalmente paralelos. Pueden ser de forma plana, trapezoidal o dentada [2].

(a)Polea para corea plana (b) Polea para correa dentada (c) Polea para correa trapezoidal
Figura 3.Tipos de poleas según las correas a utilizar [3]

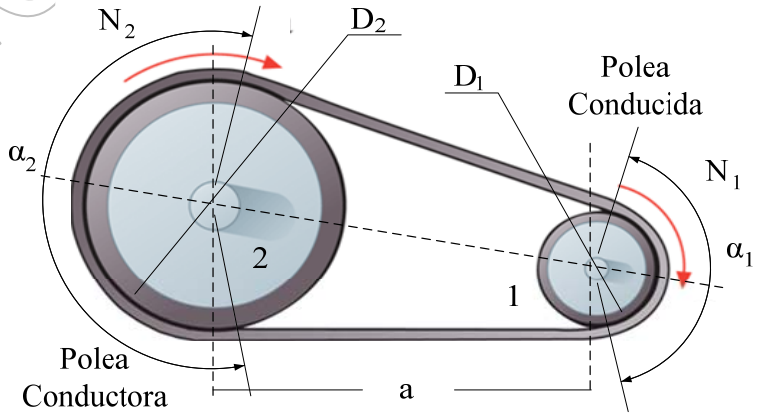


Figura 4. Forma Básica de un sistema de Transmisión por correas y poleas [1].

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

En la Figura 4 son identificados los parámetros geométricos básicos de una transmisión por correas, siendo:

1 - Polea menor.
2 - Polea mayor.
a - Distancia entre centros de poleas.
D_1 - Diámetro primitivo de la polea mayor.
N_2 - Velocidad de giro de la polea 2.
α_1 - Ángulo de contacto en la polea menor
α_2 - Ángulo de contacto en la polea mayor.
D_2 - Diámetro primitivo de la polea menor.
N_1 - Velocidad de giro de la polea 1.

Durante la transmisión del movimiento, en un régimen de velocidad uniforme, el momento producido por las fuerzas de rozamiento en las poleas (en el contacto correa-polea) será igual al momento motriz en el eje conductor y al del momento resistivo en el eje conducido. Cuanto mayor sea el tensado, el ángulo de contacto entre polea-correa, y el coeficiente de rozamiento, tanto mayor será la carga que puede ser trasmitida por el accionamiento de correas y poleas [1].

Cuando un mecanismo se transmite directamente entre dos ejes (motriz y conducido), se trata de un sistema de transmisión simple. Si se consideran dos peleas de diámetros D_1 y D_2 que giran a una velocidad N_1 y k_2 respectivamente, tal y como se indica en la Figura 3, al estar ambas poleas unidas entre sí por medio de una correa, las dos recorrerán el mismo arco, en el mismo periodo de tiempo [2].

$$N_1 D_1 = N_2 D_2 \tag{3}$$

De donde se deduce que los diámetros son inversamente proporcionales a las velocidades de giro y, por tanto, para que el mecanismo actúe como multiplicador de velocidad, la polea motriz ha de ser de mayor diámetro que la polea conducida. En caso contrario actuará como mecanismo reductor [2].

El sentido de giro es el mismo y su relación de de transmisión viene dada por la siguiente ecuación:

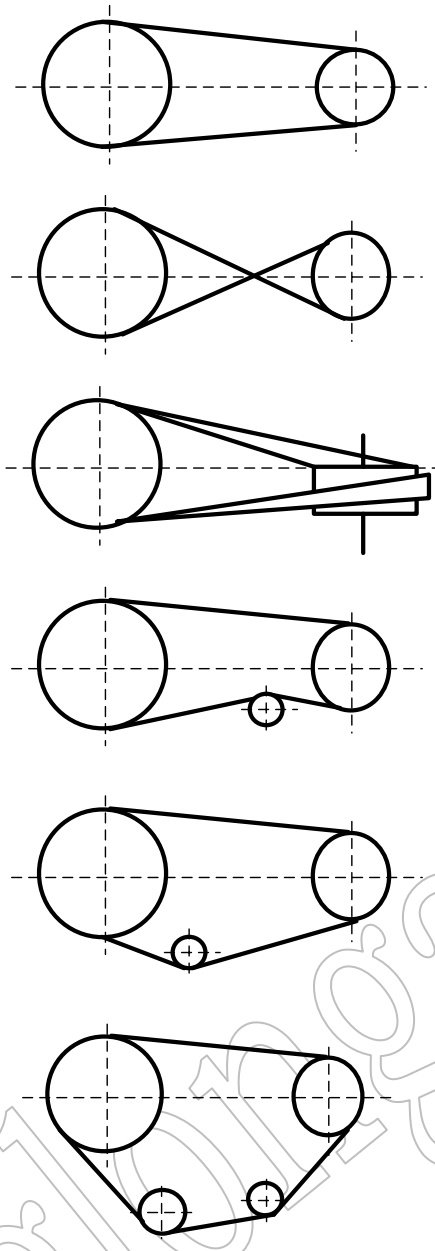
$$i = \frac{Velocidad\ \ de\ \ Entrada}{Velocidad\ \ de\ \ Salida} \quad , \quad i = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1} \tag{4}$$

La relación de transmisión es un valor que establece, cuantas veces gira el elemento conducido en función del elemento motriz [2].

Clasificación de las transmisiones por Correas y Poleas

Gracias a la flexibilidad del elemento de tracción, la transmisión por correa admite una disposición relativamente arbitraria de los ejes de las poleas conductoras y conducidas, y un variado número de poleas en la transmisión. Una forma de clasificar la transmisión por correa y poleas esta basada en el esquema o disposición de las poleas y correas en el accionamiento [1], tal y como se muestra en la Figura 5.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve



Transmisión por correa abierta. Se emplea en árboles paralelos si el giro de estos es un mismo sentido. Es la transmisión más difundida. En estas transmisiones la flexión en la correa es normal y depende fundamentalmente del diámetro de la polea menor

Transmisión por correa cruzada. Se emplea en ejes paralelos si el giro de estos es en sentido opuesto. En perfiles asimétricos la flexión es inversa (alternativa).

Transmisión por correa semicruzada. Se emplea si los ejes se cruzan (generalmente a 90°). Es recomendable que la disposición definitiva de las poleas se haga luego de verificar la transmisión en la práctica, para que no salte la correa de las poleas.

Transmisión por correa con rodillo tensor exterior. Se emplea cuando es imposible desplazar las poleas para el tensado de las correas y se desea aumentar el ángulo de contacto en la polea menor (mayor capacidad tractiva). Las correas con perfil asimétrico sufren una flexión inversa.

Transmisión por correa con rodillo tensor interior. Se emplea cuando es imposible desplazar las poleas para el tensado de las correas. En casos que se pueda disminuir el ángulo de contacto en la polea menor produce una mejora en la vida útil de la correa por producir en ella una flexión normal

Transmisión por correa con múltiples poleas. Se emplea para trasmitir el movimiento desde un árbol a varios árboles que están dispuestos paralelamente. Las poleas puede estar con relación a la correa con un montaje interior o combinado (admisible con perfiles simétricos).

Figura 5. Clasificación de la transmisión por correa y poleas basada en el esquema o disposición de las poleas y correas en el accionamiento [1].

En un accionamiento por correa, el órgano de tracción (correa de transmisión) es un elemento de suma importancia que determina la capacidad de trabajo de toda la transmisión. Las correas se distinguen por la forma de la sección transversal, por la construcción, material y tecnología de fabricación, pero el rasgo más importante que determina la construcción de las poleas y de toda la transmisión, es la forma de la sección transversal de la correa. En función de la forma de la sección transversal, las correas de transmisión son clasificadas como [1]:

- Correas Planas
- Correas Trapeciales o en V
- Correas Dentadas

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Correas Planas: poseen una sección generalmente de tipo rectangular y transmiten la potencia entre las poleas de los ejes, mediante rozamiento entre las superficies correa - polea. Fue el modelo de correa más empleado (denominado "banda") por las industrias de comienzo de siglo para poder transmitir la potencia desde el punto de generación a las diferentes máquinas del local.

En la Figura 6 se muestra una correa plana sobre su respectiva polea. Hoy en día se emplea muy poco debido a la existencia de las correas de sección trapezoidal, que permiten transmitir más par, y a las correas sincronizadas, que permiten un mejor sincronismo entre los ejes de entrada y salida [3].

Figura 6. Correa Plana sobre una polea [3].

Algunas de sus ventajas son [3]:

- Se emplean principalmente cuando la distancia entre centros de eje sea elevada.
- Cuando se utilizan correas planas (o bandas) puede obtenerse acción de embrague.
- Permiten configuraciones cruzadas, es decir, transmisión de potencia entre dos ejes no paralelos.
- Existe la posibilidad de obtener la longitud deseada, por unión entre extremos.
- Suelen ser delgadas, por lo que el efecto de fuerza centrifuga es menor. Esto implica que puedan operar con poleas pequeñas a altas velocidades. Las relaciones de transmisión, por tanto, suelen ser elevadas (i = [1 : 40]).
- Rendimientos altos, entre 0.96 y 0.98 (siempre que se encuentre pretensada correctamente).

Y sus inconvenientes más importantes [3]:

- Debido a los efectos de deslizamiento que se produce entre superficies, la relación de transmisión entre las velocidades angulares de los dos ejes no es siempre constante ni exactamente igual a la relación entre los diámetros de las poleas.
- Precisan de un esfuerzo de pretensado inicial que pude producir problemas de fatiga en los ejes, y daños en los cojinetes (si hubiera).

Existen varios tipos de materiales para poder construir las correas planas. Entre ellos se destacan los siguientes [3]:

- Plásticos Termo-soldables: estás pensados para poder unir los extremos de una correa plana, mediante la aplicación de presión y calor. Generalmente son polímeros tales como el poliuretano, que se caracterizan por tener unos colores llamativos.
- Cuero curtido con corteza de roble. Permite transmitir grandes potencias a velocidades moderadas con una larga duración. Sin embargo, son costosas y pueden sufrir estiramientos y contracciones. Además son más sensibles a la humedad y radiaciones solares.
- Cauchos reforzados mediante cuerdas de algodón, nylon o alambres. gracias a los refuerzos pueden soportar cargas de potencia de hasta 3 KW/mm de ancho de la correa, con velocidades elevadas.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Correa Trapezoidal o en V: Posee una sección de tipo trapezoidal de manera que la transmisión de potencia entre las poleas de dos o más árboles, se realiza mediante rozamiento entre las superficies correa-polea.

La polea utilizada en las transmisiones por correa trapezoidal posee una acanaladura en forma de V donde va alojada la correa (mostrada en la Figura 3). Debido a esta forma, cuando los ramales de la correa están tensos, ésta tiende a clavarse en la polea de manera que la fuerza normal y de rozamiento conseguido en las caras laterales es muy elevada. Gracias a esto, las correas trapezoidales pueden transmitir mucha mayor par sin que se produzca deslizamiento [3]. La Figura 7 muestra la forma de una correa en V y su sección transversal.

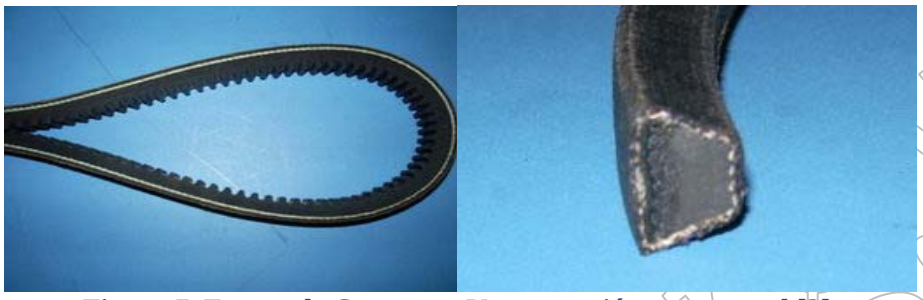


Figura 7. Forma de Correa en V y su sección transversal [3].

Algunas ventajas de estas correas son [3]:

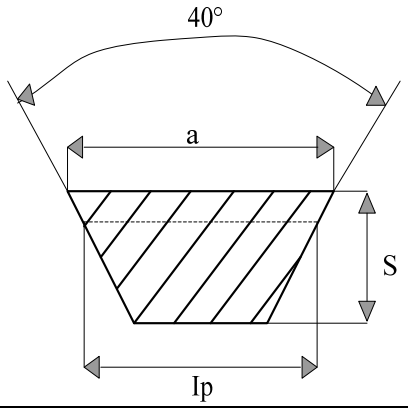
- Pueden transmitir mayor par que las correas planas, gracias al mayor esfuerzo de rozamiento conseguido en sus caras laterales.
- La posibilidad de deslizamiento es menor.
- Poseen mayor resistencia gracias a su sección y forma.
- Existe la posibilidad de obtener la longitud deseada, por unión entre extremos.

Sus inconvenientes son [3]:

- Debido a los grandes esfuerzos de rozamiento, el rendimiento que se consigue es menor (entre 0.94 - 0.97).
- No se admiten velocidades altas en los ejes, en comparación con las correas planas (velocidad máxima 40 m/s).
- El diámetro de la polea pequeña no puede ser muy pequeño, por problemas de fatiga por tensión alternante. La relación de transmisión máxima es de 1:8 aproximadamente.

Las secciones normalizadas más habituales para correas trapezoidales, se presentan en las Figuras 8 y 9 son:

Sección Convencional (40º entre flancos)



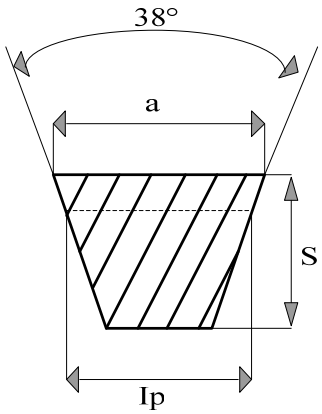
Sección	a (mm)	S (mm)	lp (mm)
Z	10	6	8.5
A	13	8	11
B	17	11	14
C	22	14	19
D	32	19	27
E	40	25	32

Figura 8. Sección Convencional de una correa trapezoidal [3].

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

fglongatt.org.ve

Sección Estrecha (38º entre flancos)



Sección	a (mm)	S (mm)	lp (mm)
SPZ	9.7	8	8.5
SPA	12.7	10	11
SPB	16.3	13	14
SPC	22	18	19

Figura 9. Sección Estrecha de una correa trapezoidal [3].

La elección de un tipo de material u otro está directamente relacionada con el costo, la duración, las dimensiones (longitud y anchura) y el nivel de confianza deseado [3].

Correa Dentada: también denominada correa sincronizada o reguladora, es un tipo de correa que se caracteriza por presentar dientes que engranan con los de las poleas correspondientes, basando la transmisión de potencia en el empuje de los dientes y no en el rozamiento polea-correa [3] La Figura 10 muestra una correa dentada.

En este sentido las transmisiones por correa dentada son similares a una transmisión por engranajes, salvo que en este caso se tiene mucha más flexibilidad en la transmisión gracias a la propia correa. Se emplea en aplicaciones donde se desea una relación de velocidades constante, salvando los problemas que presentan las correas planas y trapezoidales, donde la transmisión se realiza mediante rozamiento y se puede producir deslizamiento [3].

Figura 10. Forma de una Correa Dentada [3].

Algunas de las ventajas de estas correas son:

- Permiten una relación de transmisión constante.
- No requieren pretensado elevado para poder transmitir potencia entre ejes. Por tanto, no se reducen los problemas de fatiga en los ejes donde van montadas.
- Permiten velocidades elevadas en sus ramales (hasta 50 m/s).
- El rendimiento que se consigue es elevado: 0.98.

Como inconvenientes principales frente a otras correas se pueden destacar:

- Suelen ser más caras que una correa convencional.
- No admite relaciones de transmisión altas, debido a que poseen menos flexibilidad que una correa plana. Como mucho se recomiendan relaciones 1:10.
- Requieren que la polea sea dentada, y su construcción (salvo poleas de plástico) suele ser más costosa.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

- Deben de comprarse con una longitud específica, es decir, no se pueden cortar ni unir, ya que de ser así habría dientes de la correa que no engranarían correctamente con la polea dentada.

Se tiene también una variante, es decir, *Correas dentadas por ambas superficies.* Se caracterizan por tener un doble dentado, de manera que permiten engranar de forma simultánea con dos poleas situadas por la parte exterior e interior de la correa. Gracias a esto, pueden invertir el giro de las poleas sin alterar el sincronismo de la correa.

Existen varios tipos de materiales para poder construir las correas. Entre ellos se destacan los siguientes:

- Cauchos reforzados mediante cuerdas de algodón, nylon o alambres.

En la Tabla 1, son comparados los tipos básicos de correas mediante variados criterios, que permiten apreciar las amplias posibilidades de empleo que ofrecen las diferentes correas en la industria actual [1].

Tabla 1. Comportamiento de los tipos básicos de correas ante algunos criterios comparativos [1]

Criterio	Plana	Trapecial	Dentada
Carga en los ejes	Muy Grande	Pequeña	Mínima
Trabajando a V= 25 m/s	Aceptable	Aceptable	Bueno
Resistencia a los choques	Muy buena	Buena	Aceptable
Longitud de Correa	Libre	Normalizada	Dependiente
Tolerancia a la Desalineación	Pequeña	Grande	Pequeña
Nivel de Ruido	Muy Bajo	Muy Bajo	Bajo
Sincronismo	No	No	Si
Costo Inicial	Bajo	Bajo	Moderado
Necesidad de Control de Tensado	Alguna	Escasa	Escasa
Facilidad de Montaje entre apoyos	Si	No	No
Ancho Reducido	No	Si	Si
Diámetro Reducido	Si	No	No

La transmisión por correa y poleas clasifica dentro de las transmisiones mecánicas con movimiento de rotación que emplean como fundamento básico, para dar continuidad al movimiento, la transmisión por rozamiento con un enlace flexible entre el elemento motriz y el movido. Esta particularidad le permite algunas ventajas que posibilitan recomendar las transmisiones por correas y poleas en usos específicos, como son [1]:

- Posibilidad de unir el árbol conductor al conducido a distancias relativamente grandes.
- Funcionamiento suave, sin choques y silencioso.
- Facilidad de ser empleada como un fusible mecánico, debido a que presenta una carga límite de transmisión, valor que de ser superado produce el patinaje (resbalamiento) entre la correa y la polea.
- Diseño sencillo.
- Costo inicial de adquisición o producción relativamente bajo.

Los inconvenientes principales de la transmisión por correa, que limitan su empleo en ciertos mecanismos y accionamientos son [1]:

- Grandes dimensiones exteriores.
- Inconstancia de la relación de transmisión cinemática debido al deslizamiento elástico.
- Grandes cargas sobre los árboles y apoyos, y por consiguiente considerables pérdidas de potencia por fricción.
- Vida útil de la correa relativamente baja.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Transmisión por Engranes

Los engranajes tienen la función de transmitir una rotación entre dos ejes con una relación de velocidades angulares constante. Además se usan los términos "Par de Engranajes, Ruedas Dentadas o Engrane" para referirse al acoplamiento que se utiliza para transmitir potencia mecánica entre dos ejes mediante contacto directo entre dos cuerpos sólidos unidos rígidamente a cada uno de los ejes [4].

El sistema de engranajes es similar al de ruedas de fricción. La diferencia estriba en que la transmisión simple por engranajes consta de una rueda motriz con dientes en su periferia exterior, que engrana sobre otra similar, lo que evita el deslizamiento entre las ruedas [5]. Al engranaje de mayor tamaño se le denomina rueda y al de menor piñón, tal como se muestra en la Figura 11.

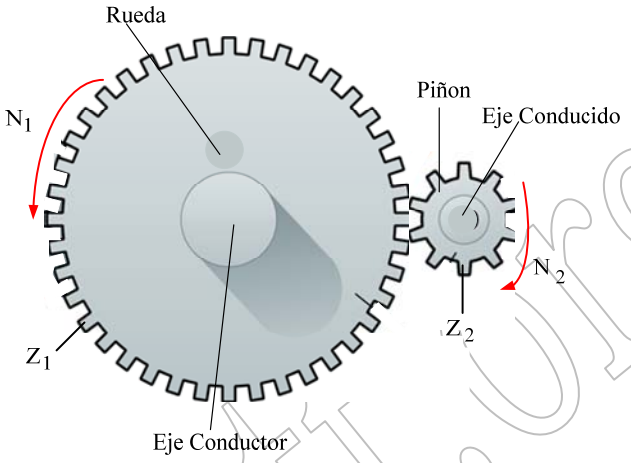


Figura 11. Forma Básica de un sistema de Transmisión por engranes.

A diferencia de los sistemas de correa y polea, este no necesita ningún operador (correa) que sirva de enlace entre las dos ruedas. Los dientes de los engranajes son diseñados para permitir la rotación uniforme (sin saltos) del eje conducido [5].

Las velocidades de entrada (eje conductor) y salida (eje conducido) están inversamente relacionadas con el número de dientes de las ruedas a las que están conectados, cumpliéndose que [5]:

$$N_1 Z_1 = N_2 Z_2 \tag{5}$$

Resultando que la velocidad del eje conducido será:

$$N_1 = N_2 \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) \tag{6}$$

Donde:

N_1 = Velocidad de giro del eje conductor
N_2 = Velocidad de giro del eje conducido
Z_1 = Número de dientes de la rueda
Z_2 = Número de dientes del piñón

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

La relación de transmisión del sistema es [5]:

$$i = \frac{N^o \ de \ dientes \ de \ la \ rueda \ conducida}{N^o \ de \ dientes \ de \ la \ rueda \ conductora} = \frac{Z_1}{Z_2} \qquad (7)$$

Dicha relación puede tener signo positivo si los ejes giran en el mismo sentido o signo negativo si los giros son de sentido contrario. Del mismo modo, si la relación de transmisión es mayor que 1 (i>1) se supondrá el empleo de un mecanismo multiplicador, y si es menor que 1 (i<1) (que suele resultar lo más habitual) supondrá el empleo de un mecanismo reductor [5].

Es claro que la obtención de una relación de transmisión constante entre dos ejes, no es algo privativo de los engranajes, ya que lo mismo puede obtenerse con correas o cadenas o ruedas de fricción, o hasta levas entre los más conocidos. Sin embargo dichos dispositivos poseen ciertas limitaciones principalmente en el orden de la carga o potencia que pueden movilizar [5].

La Ley de Engrane, acción conjugada y obtención de perfiles conjugados

Los dientes de los engranajes para transmitir el movimiento de rotación, actúan conectados de modo semejante a las levas, siguiendo un patrón o pista de rodadura definido. Cuando los perfiles de los dientes (o levas) se diseñan para mantener una relación de velocidades angulares constante, se dice que poseen *Acción Conjugada*. En consecuencia los perfiles de dientes de engranajes que ostenten acción conjugada, se denominarán *perfiles conjugados* [4].

En términos generales, cuando una superficie hipotética empuja a otra (Figura 12), el punto de contacto "c" es aquél donde las superficies son tangentes entre sí. En estas circunstancias las fuerzas de acción-reacción están dirigidas en todo momento a lo largo de la normal común "ab" a ambas superficies. Tal recta se denomina *Línea de Acción* y cortará a la línea de centros *"O1O*2" en un punto P llamado *Punto Primitivo* [4].

En los mecanismos de contacto directo, en los cuales se produce contacto entre superficies que deslizan y/o ruedan, la relación de velocidades angulares es inversamente proporcional a la relación de segmentos que determina el *punto primitivo* sobre la línea de centros, o sea:

$$i == \frac{r_1}{r_2} = \frac{O_1P}{O_2P} \qquad (8)$$

$O_1 P$ y $O_2 P$ se denominan *Radios Primitivos* y a las circunferencias trazadas desde O_1 y O_2 con esos radios *Circunferencias Primitivas*. En consecuencia, para que la relación de transmisión se mantenga constante, el punto P deberá permanecer fijo: la línea de acción, para cada punto de contacto, deberá pasar siempre por P.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

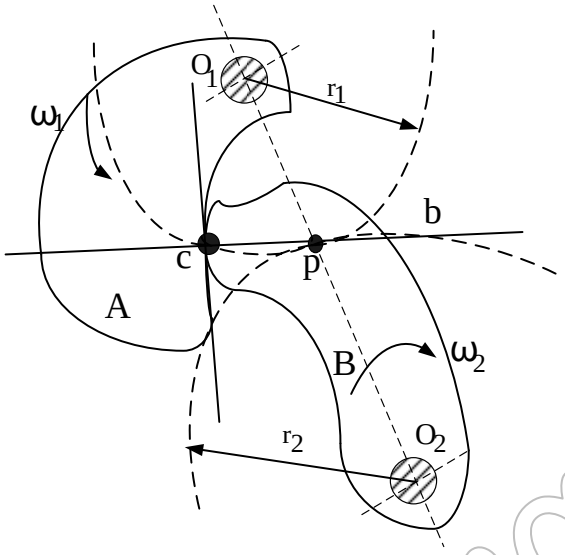


Figura 12. Esquema para la ley de engrane [4].

La ley de engrane basada en el análisis de (8) se puede enunciar como sigue [4]:

"La relación de transmisión entre dos perfiles se mantendrá constante, siempre y cuando la normal a los perfiles en el punto de contacto pase en todo instante por un punto fijo de la línea de centros."

Clasificación de los Engranes

Para un sistema de transmisión por engranes debe considerarse como están clasificados, así como las características de cada uno [6]:

- Engranajes Cilíndricos (para ejes paralelos y que se cruzan)
- Engranajes Cónicos (para ejes que se cortan y que se cruzan)
- Tornillo sin fin y rueda helicoidal (para ejes ortogonales)

Engranajes Cilíndricos: se fabrican a partir de un disco cilíndrico, cortado de una plancha o de un trozo de barra maciza redonda. Este disco se lleva al proceso de fresado en donde se retira parte del metal para formar los dientes [6]. Estos dientes tienen dos orientaciones:

Rectos: poseen dientes paralelos al eje de rotación de la rueda y pueden transmitir potencia solamente entre ejes paralelos [7]. Este tipo de engranes son mas simples de producir y por ello mas baratos, la transmisión del movimiento se realiza por medio de los dientes, quienes se empujan sin resbalar [6].

Figura 13. Forma de un engranaje cilíndrico recto [7].

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

En la Figura 14 se muestra el desarrollo de una parte de la corona de un engranaje cilíndrico de dientes rectos. En la misma se pueden apreciar las entidades geométricas más importantes que definen a los engranajes.

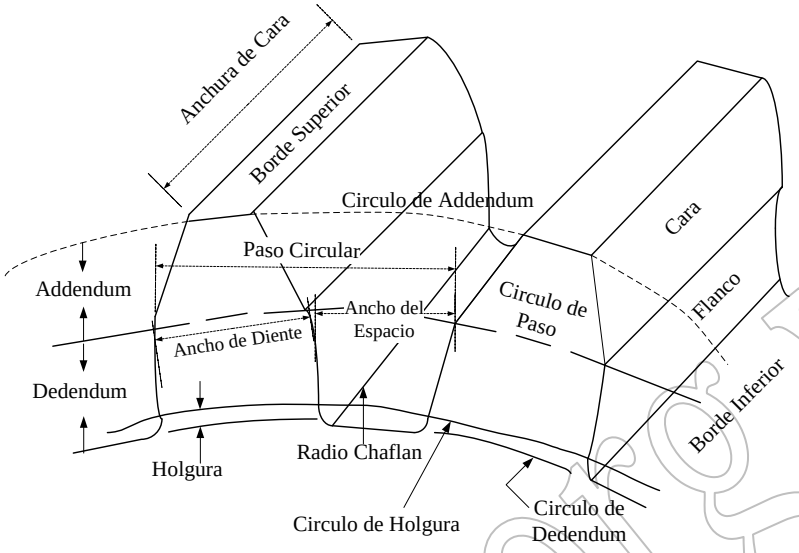


Figura 14. Características de los engranajes [4].

Estas características son explicadas con más detalles a continuación [4]:

- *Circunferencia Primitiva:* Llamada también circunferencia de paso y corresponde a la homónima circunferencia de contacto de las ruedas de fricción.
- *Circunferencia Exterior*: Es denominada también circunferencia de *addendum* o circunferencia de cabeza.
- *Circunferencia inferior:* Es denominada también circunferencia de raíz o de pie o de *deddendum*.
- *Ancho de cara:* Es la longitud del diente medida axialmente. También se la denomina ancho de faja.
- *Addendum:* es la distancia radial desde el radio primitivo al radio de cabeza.
- *Deddendum:* es la distancia radial desde el radio primitivo al radio inferior.
- *Paso Circular:* es la distancia entre dos puntos homólogos de dos dientes consecutivos, medidos sobre la circunferencia primitiva o de paso.
- *Paso angular*: es el ángulo entre dos puntos homólogos de dos dientes consecutivos.
- *Ancho de espacio:* es el espacio entre dos dientes consecutivos, medido en la circunferencia de paso.
- *Juego:* es la diferencia entre el huelgo de un diente y el espesor del engrana junto con aquel.
- *Holgura:* es la diferencia entre el deddendum de un diente y el addendum del que engrana con aquel.
- *Altura de diente*: es la distancia radial entre las circunferencias exterior e inferior.
- *Espesor de diente:* es el espesor medido sobre la circunferencia de paso.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

- *Número de dientes:* es la cantidad de dientes que tiene el engranaje
- *Módulo:* es el cociente entre el diámetro primitivo del engranaje y el número de dientes.
- *Paso diametral:* es el cociente entre el diámetro primitivo del engranaje y el número de dientes.

***Helicoidales**:* poseen dientes inclinados respecto al eje de rotación de la rueda. Esto hace que puedan transmitir potencia entre ejes paralelos o que se cruzan en el espacio formando cualquier ángulo [7].

Para este caso los dientes se empujan y resbalan entre sí, parte de la energía transmitida se pierde por roce y el desgaste es mayor. La ventaja de los helicoidales es la falta de juego entre dientes que provoca un funcionamiento silencioso y preciso [6]. En la Figura 15 se observa la configuración de ejes paralelos y la configuración de ejes que se cruzan formando 90º [7].

(a) **(b)**

Figura 15. Forma de un engranaje cilíndrico helicoidal, (a) engranaje helicoidal para ejes paralelos, (b) engranaje helicoidal para ejes cruzados a 90º [7].

Engranajes Cónicos: Se fabrican a partir de un trozo de cono, formándose los dientes por fresado de su superficie exterior. Estos dientes pueden ser rectos, helicoidales o curvos. Esta familia de engranajes soluciona la transmisión entre ejes que se cortan y que se cruzan [5].

Existen diferentes tipos de engranajes cónicos [5]:

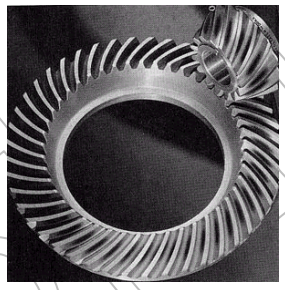
- Rectos
- Helicoidales
- Espirales
- Hipoides

En la Tabla 2 se presentan los diferentes tipos de engranajes cónicos existentes, además de las características y aspectos resaltantes de cada uno.

fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Tabla 2. Tipos de engranajes cónicos.

Engranes Cónicos	*Características*
Rectos:	Efectúan la transmisión de movimiento de ejes que se cortan en un mismo plano, generalmente en ángulo recto, por medio de superficies cónicas dentadas [5].Los dientes convergen en el punto de intersección de los ejes. Son utilizados para efectuar reducción de velocidad con ejes en 90°. Estos engranajes generan más ruido que los engranajes cónicos helicoidales. Se utilizan en transmisiones antiguas en forma de reparación. En la actualidad se usan escasamente [5].
Helicoidales	Engranajes cónicos con dientes no rectos. Al igual que el anterior se utilizan para reducir la velocidad en un eje de 90°. La diferencia con el cónico recto es que posee una mayor superficie de contacto. Es de un funcionamiento relativamente silencioso. Se utilizan en las transmisiones posteriores de camiones y automóviles de la actualidad [5], [9].
Espirales	En los cónico-espirales, la curva del diente en la rueda-plana, depende del procedimiento o máquina de dentar, aplicándose en los casos de velocidades elevadas para evitar el ruido que producirían los cónico-rectos [5].
Hipoides: 	Para ejes que se cruzan, generalmente en ángulo recto, empleados principalmente en el puente trasero del automóvil y cuya situación de ejes permite la colocación de cojinetes en ambos lados del piñón [5]. Parecidos a los cónicos helicoidales, se diferencian en que el piñón de ataque esta descentrado con respecto al eje de la corona. Esto permite que los engranajes sean más resistentes. Este efecto ayuda a reducir el ruido del funcionamiento. Se utilizan en máquinas industriales y embarcaciones, donde es necesario que los ejes no estén al mismo nivel por cuestiones de espacio [9].

Tornillo sin fin y Corona: En su mayoría cilíndricos. Pueden considerarse derivados de los helicoidales para ejes cruzados, siendo el tornillo una rueda helicoidal de un solo diente (tornillo de un filete) o de varios (dos o más). La rueda puede ser helicoidal simple o especial para tornillo sin fin, en la que la superficie exterior y la de fondo del diente son concéntricas con las cilíndricas del tornillo [5] [9].

Este tipo de mecanismo tiene muchas pérdidas por roce entre dientes, esto obliga a utilizar metales de bajo coeficiente de roce y una lubricación abundante, se suele fabricar el tornillo (gusano) de acero y la corona de bronce [8]. En la Figura 16 se aprecia este tipo de mecanismo.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

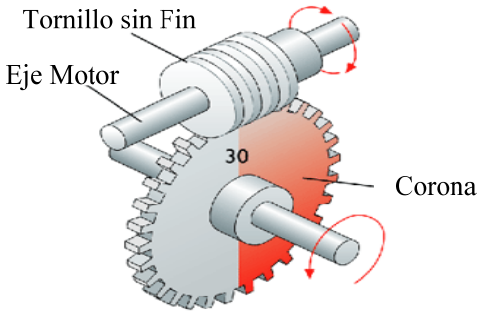


Figura 16. Tornillo sin fin y corona [10].

Generalmente, el ángulo de ejes es de 90º. Permiten la transmisión de potencia sobre ejes perpendiculares. Es un caso extremo de engranajes hipoidales, ya que esta descentrado al máximo. Se aplica para abrir puertas automáticas de casas y edificios Poseen además un bajo costo y son autobloqueantes. Es decir que es imposible mover el eje de entrada a través del eje de salida [9].

Los engranajes de tornillo sinfín se utilizan habitualmente en uno de los tres casos siguientes [9]:

- Cuando se desea reducir enormemente la velocidad de salida (o incrementar el par de salida).
- Cuando se desea transmitir potencia entre ejes que se cruzan.
- Cuando se desea diseñar una transmisión irreversible (autoblocante).

Al igual que los engranes cilíndricos y cónicos, también existen diferentes tipos de tornillos sin fin, como son:

Tornillo sin fin y corona cilíndricos: la rueda conducida es igual a la de los engranajes cilíndricos usuales, el contacto es puntual y por lo tanto el desgaste de ambos es rápido. Se utiliza en la transmisión de pequeños esfuerzos y a velocidades reducidas [10].

Tornillo sin fin y corona de dientes cóncavos: El tornillo mantiene su forma cilíndrica, con sus filetes helicoidales. La rueda está tallada de forma que sus dientes están curvados, con el centro de curvatura situado sobre el eje del tornillo sin fin [8]. El contacto entre los dientes es lineal, lo que hace que se transmita mejor el esfuerzo y por tanto se produce menos desgaste. Se utiliza en mecanismos de reducción [10].

Tornillo sin fin y corona globoidal: El tornillos se adapta a la forma de la rueda, es poco frecuente, debido a su alto coste de fabricación. Se utiliza en las cajas de dirección de los automóviles [10].

Ventajas e inconvenientes

Respecto al sistema polea y correa, presenta una serie de ventajas e inconvenientes:

Las principales ventajas son: Relativa sencillez de construcción. Pueden mantener la relación de transmisión constante incluso transmitiendo grandes potencias entre los ejes (caso de automóviles, camiones, grúas...), lo que se traduce en mayor eficiencia mecánica (mejor rendimiento). Además, permite conectar ejes que se cruzan (mediante tornillo sinfín), o que se cortan (mediante engranajes cónicos) y su funcionamiento puede llegar a ser muy silencioso [9], [10].

Los principales inconvenientes son: su alto costo y poca flexibilidad (en caso de que el eje conducido cese de girar por cualquier causa, el conductor también lo hará, lo que puede producir averías en el mecanismo motor o la ruptura de los dientes de los engranajes) [9].

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Comparación entre los sistemas de transmisión

Anteriormente se presentaron los diferentes tipos de sistemas usados para la transmisión de potencia como son: las ruedas de fricción, las correas y poleas, y los engranes. Todos ellos con sus propiedades y rasgos característicos que determinan su desempeño, así como las clasificaciones de los mismos.

Ahora bien en base a lo antes mencionado en la Tabla 3, se realiza una comparación entre los tres sistemas tomando 4 criterios básicos de comparación, la eficiencia del sistema, potencia que transmite, ruido que genera y finalmente el mantenimiento y costo.

Tabla 3. Comparación entre los sistemas de transmisión de potencia

Criterios de Comparación	Sistema de Transmisión		
	Ruedas de Fricción	**Poleas y Correas**	**Engranajes**
Eficiencia y Flexibilidad	Aunque permiten la transmisión de potencias entre ejes paralelos y cruzados, no son muy eficientes debido a que su principio de funcionamiento se basa en la fricción entre las ruedas.	Posee una buena eficiencia, la cual depende de la tensión de la correa el ángulo de contacto y el coeficiente de rozamiento. Además de brindar una gran variedad de esquemas para transmitir potencia.	Altamente eficiente, lo que se traduce en un buen rendimiento, a causa de su variedad de diseños que permiten transmitir potencia entre ejes paralelos y que se cruzan.
Transmisión de potencia	Este tipo de sistema no es favorable si se desea transmitir grandes potencias, ya que si se aplica mucha fuerza entre ambas ruedas se generan perdidas de potencia a causa del deslizamiento entre ellas.	Para efectos de transmisión de potencia este sistema el punto medio entre la transmisión por rueda de fricción y por engranes, es decir es mucho mas eficiente al poder transmitir mayor potencia que las ruedas, debido a que poseen mayor agarre, pero no supera la capacidad de transmisión de los engranes.	Puede transmitir grandes potencias, debido a que los dientes de la rueda motriz se sincronizan perfectamente con los del piñon, se evita pérdidas por deslizamiento entre las ruedas. Esto hace que sean una buena opción para aplicaciones en aerogeneradores de gran potencia.
Ruido que genera durante su funcionamiento	Este sistema es relativamente silencioso, aunque si existen vibraciones el choque constante entre las ruedas aumentara el ruido.	La acción de enlace amortiguado que produce la correa con las poleas permite a este sistema generar poco ruido durante su funcionamiento.	Los engranes rectos producen mucho por el diseño de sus dientes. Sin embargo los de dientes helicoidales reducen en gran medida los niveles de ruido.
Costo de implementación y Mantenimiento	Su implementación no es costosa; sin embargo el desgaste de las ruedas por la acción del roce constante entre ellas, implica un cambio de piezas continuo lo que se traduce en un mantenimiento constante y poco rentable.	El costo de implementación no es elevado ya que existe gran variedad de poleas en el mercado fabricadas con diferentes materiales, desde platico hasta aleaciones de metal. Sin embargo debido al roce a causa del moviendo circular el desgaste de las correas es constante, traduciéndose en mantenimiento relativamente constante.	Alto costo de fabricación debido a que los engranes son fabricados con aleaciones de diferentes metales. Requiere de lubricación (engrase) adecuada para evitar el desgaste prematuro de los dientes y reducir el ruido de funcionamiento.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Conclusiones

Un sistema de transmisión de potencia, también conocido como caja multiplicadora es uno de los elementos fundamentales para los aerogeneradores destinados a la producción de energía eléctrica. Como se mostró uno de los parámetros de diseño más importante es la relación de transformación, la cual no es mas que el cociente entre la velocidad del eje de giro rápido y el eje de giro lento. Hay que resaltar que la velocidad de giro de la turbina depende en gran medida del diseño aerodinámico de la pala, mientras que la velocidad de giro de salida o eje rápido depende directamente del tipo de generador eléctrico a utilizar.

Este parámetro además de permitir que se transmita la potencia deseada, dicta el tamaño que tendrá la caja e influirá en su costo, por tanto se busca que la relación de transformación sea pequeña. En los casos donde se desee reducir la relación existen dos maneras de hacerlo, la primera es disminuir la velocidad del generador aumentando el número de polos, lo que significa que se reducirán las rpm del eje de giro rápido.

La segunda es para los casos donde se tiene un diámetro de rotor eólico fijo, se aumenta la velocidad de giro de la turbina, pero esta ultima forma de reducción implica aumentar los esfuerzos centrífugos y de las cargas sobre la maquina.

Ahora bien la escogencia de un tipo de sistemas de transmisión en específico, es decir entre ruedas de fricción, poleas-correas y engranes va a depender de los siguientes factores: potencia que se desee transmitir, costo de implementación y mantenimiento, eficiencia y flexibilidad.

fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Referencias Documentales

[1] Sistemas de Transmisión. Documento en línea disponible en: http://jmdiezm.iespana.es/documentos/sistematransmision.pdf

[2] Sistemas de Poleas y Correas. Documento en línea disponible en http://almez.pntic.mec.es/jgonza86/Sistemaspoleaycorreas.htm

[3] Transmisión por Correas. http://www.emc.uji.es/d/mecapedia/transmision_por_correa.htm

[4] Álvaro Rodríguez. "*Diseño de un prototipo de aerogenerador de eje horizontal, de micro generación (1hp) conectado en paralelo a la red eléctrica de servicio".* Trabajo especial de grados para optar al titulo de Ing. Electricista, universidad Bicentenaria de Aragua, Venezuela. 2006

[5] Shigley, J. E. y Mischke, C. *Mechanica Engineering Desing.* 5ta edicion New York: MacGraw Hill Book Company. 1988.

[6] Engranes cilíndricos, Documento en línea disponible en: http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/engrana/encilin.html

[7] Engranajes cilíndricos, Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción Universidad Jaume I Disponible en: http://www.emc.uji.es/d/IngMecDoc/Mecanismos/Engranajes/EngrCilindr.html

[8] Engranajes Cónicos, documento en línea disponible en: http://www.emc.uji.es/d/mecapedia/engranaje_conico.htm

[9] Mott, B. *Diseño de Elementos Mecánicos*. 3era edición, editorial Universal.

[10] Trasmisión por engranes, documento en línea disponible en http://www.emc.uji.es/mecapedia/transmision_por_engranes.htm

fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve