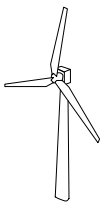
Reporte de Investigación
2007-13

Sistema Mecánico de Transmisión de Aerogeneradores de Eje Horizontal

Francisco M. González-Longatt



Línea de Investigación:
Fuentes Alternas de Energía
y
Generación Distribuida

Mayo, 2007

1. Introducción al Sistema Mecánico de Transmisión

El *sistema mecánico de la transmisión o tren de potencia* lo constituyen todos los elementos y componentes de la turbina que transmiten par mecánico al eje de giro.

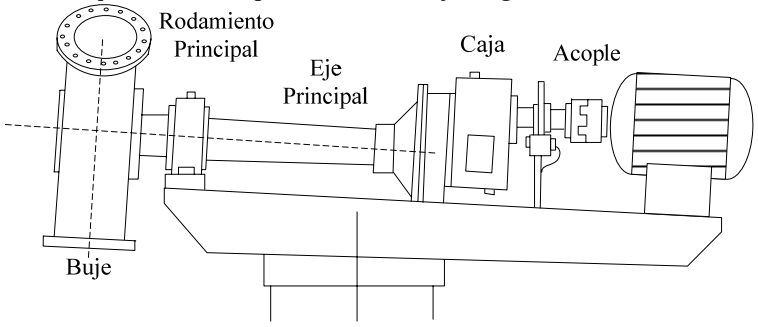


Figura 1. Componentes de un Tren Mecánico

Según esta definición, el sistema mecánico de la transmisión, en una aeroturbina de eje horizontal, lo componen al menos el rotor eólico y el generador eléctrico.

Figura 2. Ensamble del Tren Mecánico y Generador

En la mayoría de los diseños, la velocidad de giro de la turbina no se corresponde con la velocidad de giro del generador y es necesario incluir una caja multiplicadora.

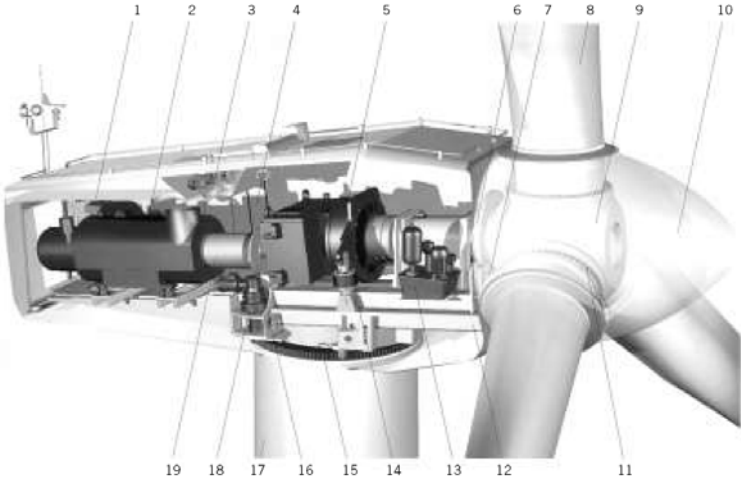


Figura 3. Componentes básicos de un Aerogenerador Marca Gamesa. 1. Polipasto, 2. Generador, 3. Sist. Refrigeración, 4. Unidad control, 5. Multiplicadora, 6. Eje principal con dos rodamientos, 7. Sistema bloqueo rotor, 8. Pala, 9. Buje, 10. Cono, 11. Rodamiento pala, 12. Bastidor, 13. Sistema hidráulico, 14. Amortiguador, 15. Corona de giro, 16. Disco de freno, 17. Torre, 18. Reductora de giro, 19. Transmisión. Eje de alta.

El cuerpo de baja velocidad de este elemento se acopla al rotor eólico a través del eje primario o eje lento y el cuerpo de alta velocidad al generador eléctrico mediante el eje secundario o eje rápido. Además, en el tren de potencia se incluyen los apoyos del sistema de giro con la estructura de la góndola y el freno mecánico, cuya función es bloquear la turbina en operaciones de mantenimiento y eventualmente contribuir a paradas de emergencia.

Las funciones del tren de potencia no se limitan a transmitir la potencia mecánica con el mayor rendimiento posible, sino que sus componentes deben estar diseñados para soportar los esfuerzos de empuje transmitidos por el rotor eólico. Por otra parte, un buen diseño del tren de potencia debe garantizar que todos sus elementos sean de fácil montaje y sustitución en caso de avería.

1.1. Aspectos Generales

Los requisitos que hoy día se exigen a las turbinas de las centrales convencionales (hidráulicas, vapor o gas) que accionan generadores eléctricos conectados a red son por una parte un elevado grado de uniformidad en su velocidad de giro y en el par que transmiten. Por otra parte, las turbinas y el generador eléctrico, se diseñan de tal forma que, la velocidad de giro de ambos elementos sea similar. Así por ejemplo, los turboalternadores que están movidos por turbinas de vapor tienen gran rendimiento cuando se mueven a velocidades elevadas, este tipo de generadores eléctricos está diseñado con 2 o 4 polos, que para una red eléctrica de 50 Hz supone una velocidad de giro del conjunto de 3000 o 1500 rpm respectivamente.

Los generadores eléctricos de las centrales hidráulicas están movidos por turbinas cuyo tipo y velocidad de giro depende de las características del salto hidráulico. En saltos de gran altura se utilizan turbinas Pelton que impulsan grupos de eje horizontal que giran a velocidades comprendidas entre 750 (8 polos) y 375 rpm (16 polos). En saltos medios se utilizan turbinas Francis que funcionan con velocidades más reducidas que las aplicaciones con saltos elevados pudiéndose llegar a velocidades de giro cercanas a 150 rpm (20 polos). En saltos de pequeña altura se emplean turbinas Kaplan donde la velocidad del grupo puede ser inferior a 100 rpm (30 polos).

Las turbinas eólicas actuales están diseñadas con velocidades específicas cercanas a 7 en el punto de diseño. Esto hace que para una velocidad del viento de 10 m/s y una velocidad lineal en la punta de la pala de 70 m/s la turbina funcione en condiciones de diseño. Si consideramos que esta turbina es de 1MW de potencia nominal con un diámetro de rotor de 60 m, para la velocidad de punta de pala anterior, el régimen de giro de esta máquina es de 22,28 rpm. Si se pretende diseñar un generador eléctrico tal que su velocidad de sincronismo coincida con el régimen de giro de la turbina eólica anterior, cuando se conecta directamente a una red de 50 Hz, el número de polos de diseño sería aproximadamente 270. Este número de polos implicaría diseñar el generador con un diámetro de al menos 10 o 15 m. Evidentemente, este tipo de diseño resultaría poco rentable económicamente y demasiado pesado para ubicarlo a una altura de decenas de metros sobre el nivel del suelo.

Sin embargo, hoy día el empleo de generadores multipolares directamente acoplados, esto es sin caja multiplicadora, es una solución muy prometedora en los diseños de turbinas más modernas. Este avance ha sido posible gracias a que este tipo de sistemas funcionan con un cambiador de frecuencias que permite reducir el número de polos del generador y por lo tanto el diámetro del generador y su peso.

Es evidente que excluir del diseño del tren de potencia al multiplicador de velocidad es una ventaja importante ya que este elemento está sometido a esfuerzos cíclicos que provocan fatiga de sus componentes y reducen su vida útil. La disminución de esfuerzos en el tren de potencia es uno de los aspectos que más preocupa hoy día a los diseñadores de turbinas.

Una manera de disminuir este tipo de cargas se consigue variando la velocidad de giro de la turbina. Cuando la velocidad de giro permanece constan-te las variaciones de la velocidad del viento se traducen en oscilaciones bruscas del par transmitido, sin embargo cuando la velocidad de la turbina varía, el rotor eólico actúa como un volante de inercia capaz de almacenar parte de la energía mecánica transitoria introducida en el sistema en energía cinética de rotación. Esto hace que se suavice tanto el par transmitido como la potencia eléctrica generada.

Existen dos formas de conseguir que el sistema gire a velocidad variable. La primera de ellas, y la más utilizada en la actualidad, es utilizar convertido-res electrónicos entre el generador y la red eléctrica. Este tipo de dispositivos permiten controlar el generador a velocidad variable y por lo tanto la velocidad de giro de la turbina. La relación de multiplicación de la caja, en el caso de que exista, permanece constante. La segunda forma de proporcionar una variación en la velocidad de giro de la turbina es utilizando cajas de transmisión variable y generadores eléctricos directamente conectados a red evitando así el uso de

convertidores electrónicos. Esta práctica, que condiciona en gran medida el diseño del tren de potencia, se ha empleado en algunos prototipos [5], sin embargo la experiencia no ha sido demasiado satisfactoria.

2. Configuración del Sistema de Transmisión

La configuración del sistema de transmisión en las turbinas de eje horizontal está condicionada por la posición del rotor eólico. Este elemento se encuentra situado en la parte superior de la torre a una altura que debe ser en cualquier caso superior a la mitad del diámetro de la turbina. La configuración más habitual del tren de potencia consiste en ubicar todos los elementos que lo componen dentro de la góndola y alineados según el eje de giro detrás del rotor eólico. Sin embargo, históricamente se han realizado diseños del tren de potencia donde parte de sus componentes se han ubicado fuera de la góndola. A continuación se indican las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos diseños.

2.1. Diseño Estándar

El diseño más habitual del tren de potencia consiste en ubicar la caja multiplicadora y el generador eléctrico detrás del rotor eólico y dentro la góndola. Otros componentes auxiliares como los motores de orientación o el grupo hidráulico se ubican también en la góndola. La principal ventaja de esta configuración es que se puede considerar como la más compacta posible. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes: en primer lugar, el peso total del tren de potencia se concentra en la parte superior de la torre lo que condiciona de forma definitiva el diseño estructural de toda la turbina. Por otra parte, los aspectos relativos a accesibilidad y mantenimiento de componentes se hacen más complejos

2.2. Generador de eje vertical en la zona superior de la torre

Una forma de reducir peso en la góndola es utilizar un generador eléctrico de eje vertical en la zona superior de la torre. Con esta configuración se evita el problema de retorcimiento de los cables de potencia durante los procesos de orientación, sin embargo las desventajas de esta configuración son numerosas, ya que es necesario utilizar una caja multiplicadora más compleja con engranajes cónicos. Además, el par que opone el generador presenta una componente vertical que puede afectar al rotor durante paradas de emergencia. El prototipo *germano-sueco AEOLUS II*, [3.5] presenta esta disposición del tren de potencia, Figura 5.

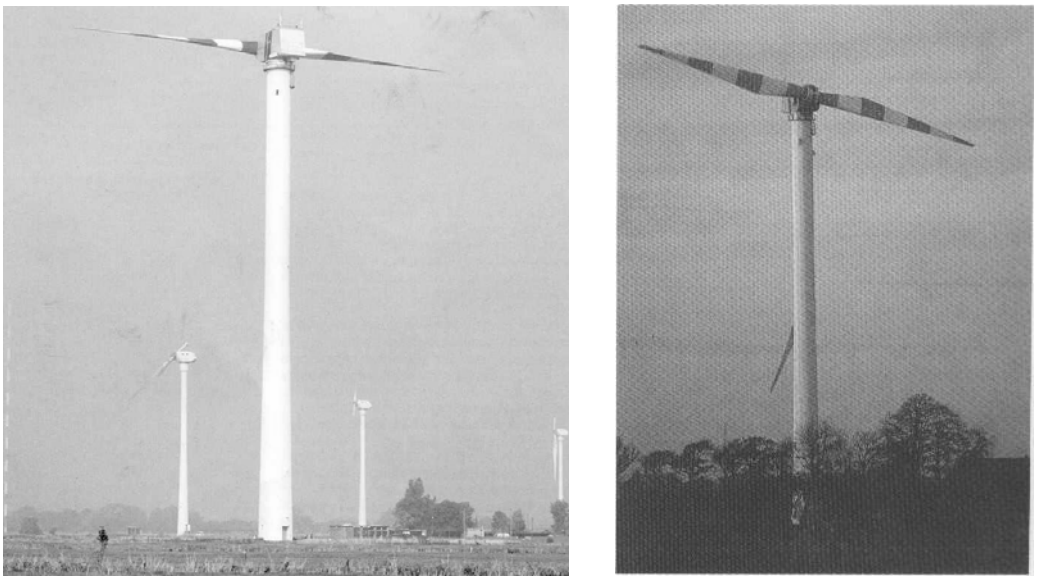


Figura 4. Tren de potencia de la turbina AEOLUS II con generador de eje vertical

2.3. Generador en la base de la torre

La solución más radical para solucionar el problema de peso excesivo en la góndola es ubicar los componentes del tren de potencia en la base de la torre. Esta opción implica que el eje lento de la caja

multiplicadora debe tener una longitud similar a la altura de la torre. Una alternativa a este diseño es mantener la caja multiplicadora en la góndola y el generador en la parte inferior de la torre. En cualquier caso, la excesiva longitud de algunos de los ejes de acopla-miento hace que hayan aparecido problemas de vibraciones en los escasos prototipos de estas características, WEC-520 [5].

2.4. Generador directamente acoplado

Los diseños basados en generadores multipolares directamente acoplados al rotor eólico que no utilizan multiplicadora son hoy día una de las opciones más utilizadas en los sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. Los primeros diseños comerciales basados en este concepto son del fabricante alemán ENERCON en sus modelos E-33, E-44 y E53, E70 y E82, Figura 5.

Figura 5. Generador sincrónico directamente acoplado. Turbina Enercon E-44

Este tipo de diseño se basa en utilizar generadores sincrónicos de excitación independiente con un número elevado de polos y gobernados mediante un convertidor electrónico que desacopla la frecuencia de funcionamiento del generador con la frecuencia de la red. En la actualidad, otros fabricantes como Lagerwey, Mtorres (www.mtorres.com.ve), Joumont, WindFormer, Multihidrid (http://www.multibrid.com) [3.11] utilizan este tipo de sistemas. La desventaja fundamental que presenta esta máquina es su elevado peso y su diseño poco convencional.

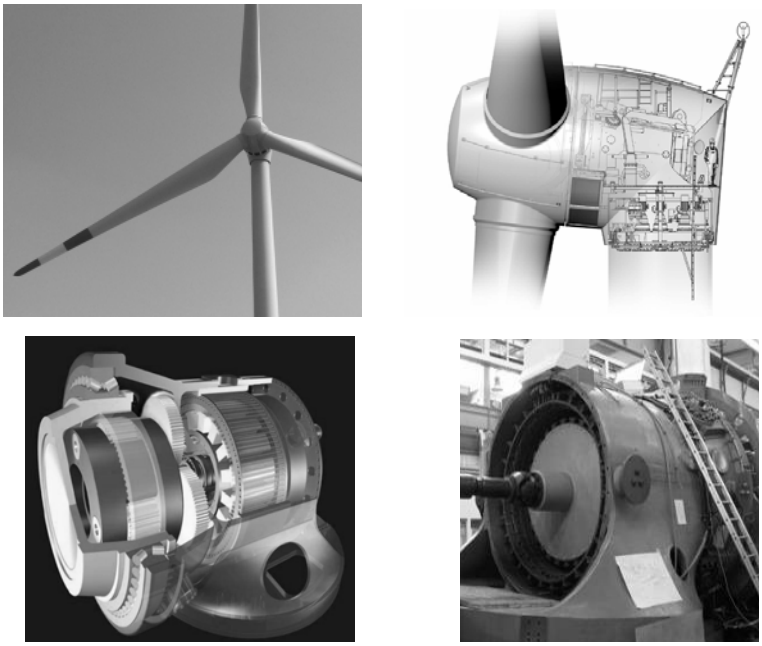


Figura 6. Tubina Multihibrid M5000

En la Figura 8 se muestran las diferentes configuraciones del tren de potencia indicadas anteriormente.

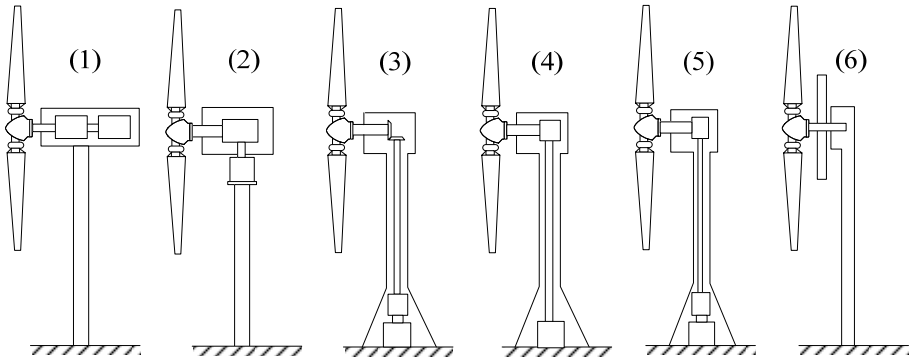


Figura 7. Diferentes configuraciones del tren de potencia. 1 Configuración estándar. 2 Generador de eje vertical en la zona superior de torre. 3 Generador y caja multiplicadora en la zona superior de la torre. 4 Generador en la base de la torre y caja multiplicadora en la zona superior de la torre. 5 Generador en la base de la torre y dos cajas multiplicadoras separadas. 6 Generador directamente acoplado al rotor eólico.

3.1. Eje del rotor con apoyos separados

En este tipo de diseño el eje del rotor se monta sobre dos cojinetes unidos a una estructura o bancada solidaria a la torre mediante apoyos longitudinales y transversales. Todas las cargas del rotor se transmiten a la torre a través de este elemento. Con esta disposición la caja multiplicadora no soporta ninguna carga excepto el par transmitido por el eje de rotación. La ventaja fundamental de este diseño es que emplea cojinetes y cajas multiplicadoras convencionales, sin embargo presenta el inconveniente de ser una configuración demasiado pesada.

Una alternativa a este diseño es integrar el cojinete posterior en la estructura de la caja multiplicadora. Con esta variante la distancia entre cojinetes se reduce, lo que implica una reducción en las cargas transmitidas a la bancada de unión con la torre. En esta configuración el multiplicador de velocidad se monta con dos apoyos adicionales sobre la bancada, de tal forma que el tren de potencia se apoya sobre tres puntos de suspensión. La ventaja fundamental de esta configuración es que se reduce notablemente el peso de la bancada y mejora su montaje en la góndola. El lector interesado en el tipo de rodamientos de estos cojinetes y su lubricación puede encontrar más información en [5]

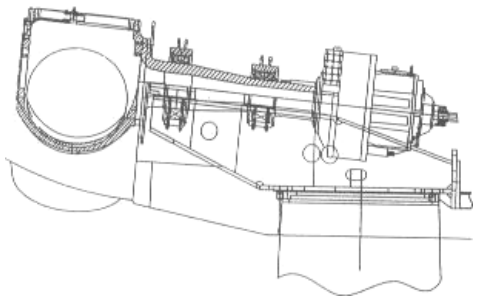


Figura 8. Eje de rotor con apoyos separados. Turbina v-66

3.2. Eje del rotor integrado en la caja multiplicadora

En este diseño el rotor eólico se apoya completamente sobre la estructura de la caja multiplicadora. El diseño de este tipo de cajas multiplicadoras deja de ser convencional y se emplea sólo, exclusivamente, en aplicaciones de energía eólica. El coste de este componente evidentemente se incrementa, sin embargo este tipo de cajas de multiplicación se justifica si se produce en serie. Este diseño debe garantizar que las cargas que recibe su estructura no afectan a la función de transmisión. La bancada de unión de la transmisión con la torre se reduce significativamente con esta opción de diseño. En algunos casos, la carcasa de la caja multiplicadora hace las funciones de bancada y a través de ella se transmiten las cargas del rotor eólico a la torre.

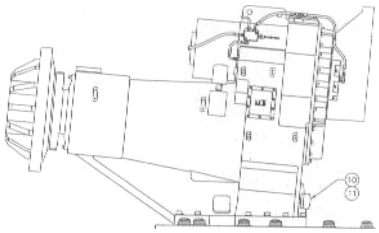


Figura 9. Eje de rotor integrado en la caja multiplicadora. Zond 750

3.3. Eje del rotor conectado a un soporte fijo

En las configuraciones anteriores el eje del rotor está sometido a momentos flectores muy acentuados que implican diseños muy robustos de todos los componentes del tren de potencia. Para evitar este problema, en algunos diseños, el rotor se une a un eje soporte fijo conectado a la torre a través de una brida cuya función es absorber los momentos flectores transmitidos por el rotor eólico. Este diseño ha sido adoptado en algunos diseños (ENERCON E-40 y BONUS 500 kW), [5]

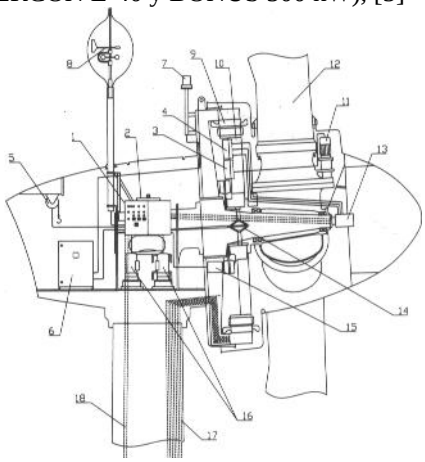


Figura 10. Eje de rotor conectado a un soporte fijo. E-40

Existen numerosas variantes sobre los conceptos básicos indicados anteriormente, en concreto algunos diseños tienen el cojinete frontal de apoyo del eje del rotor integrado en la estructura de la góndola. En la Figura 12 se muestra un esquema de todas estas configuraciones.

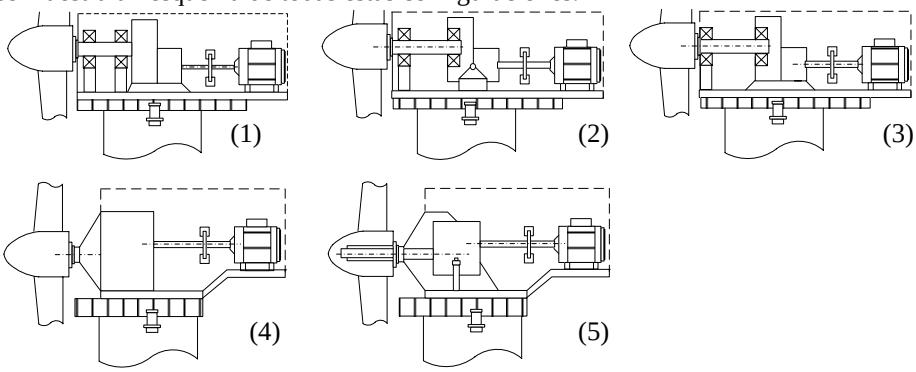


Figura 11. Esquema de apoyos del tren de potencia en aeroturbinas. 1 Eje principal con cojinetes separados. 2 Cojinete posterior integrado en la caja multiplicadora. 3 Cojinete principal en la góndola y cojinete posterior integrado en la caja multiplicadora. 4 Cojinete principal integrado en la caja multiplicadora. 5 Cojinete principal apoyado sobre eje hueco.

4. Freno Mecánico

La función principal del freno mecánico es mantener bloqueado el eje de giro durante las operaciones de puesta en marcha y mantenimiento del aerogenerador. Además del freno mecánico, es práctica habitual

durante los períodos de reparación impedir el giro del rotor eólico mediante unos pernos colocados entre este elemento y la góndola. Cuando el freno mecánico se diseña únicamente para bloquear el rotor, el par que debe soportar, es el transmitido por el rotor eólico puesto en bandera en condiciones de viento extremo y con el eje de giro bloqueado. [2]

Además de la función de bloqueo, algunos diseños de frenos mecánicos se pueden emplean para contribuir al frenado dinámico del rotor eólico durante procesos de parada de emergencia. El freno mecánico se puede utilizar como freno secundario de apoyo al freno aerodinámico que incorporan todas las turbinas de cierta potencia. Como se comenta en el capítulo 4, la función de parada aerodinámica se realiza, o bien actuando sobre el control de paso girando la pala un ángulo cercano a 90° sobre su eje de giro (condiciones de puesta en bandera) cuando la turbina lleva incorporado un sistema de control de paso de pala, o bien activando los aerofrenos en el caso que el control aerodinámico de la turbina sea pasivo. El empleo del freno mecánico para contribuir a los procesos de parada dinámica sólo está justificado en turbinas de reducida o mediana potencia. Para máquinas de elevada potencia (cercanas al MW), el freno mecánico se utiliza sólo para funciones de bloqueo ya que un diseño de este componen-te durante procesos de parada supondría unas dimensiones del disco de frenado excesivamente grandes.

La constitución física de este componente consiste en un disco que gira solidario al eje de transmisión y unas zapatas de frenado que rozan con el disco cuando se activan ya sea por vía eléctrica, hidráulica o neumática. En la Figura 13 se muestra el freno mecánico de una turbina alojado en el eje de alta velocidad.

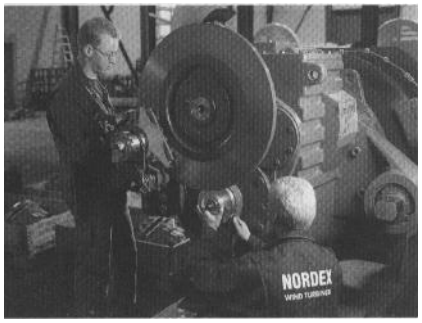


Figura 12. Freno mecánico de una turbina alojado en el eje de alta velocidad

Uno de los aspectos más relevantes en el diseño del freno mecánico es su ubicación en el tren de potencia. Este componente se puede colocar tanto en el eje lento como en el eje rápido. En la mayoría de los diseños el freno mecánico está colocado en el eje que acopla la caja multiplicadora con el generador eléctrico, ya que en este eje la potencia mecánica generada por el rotor se transmite con una elevada velocidad de giro y un par reducido, lo que implica diámetros del disco de frenado reducidos.

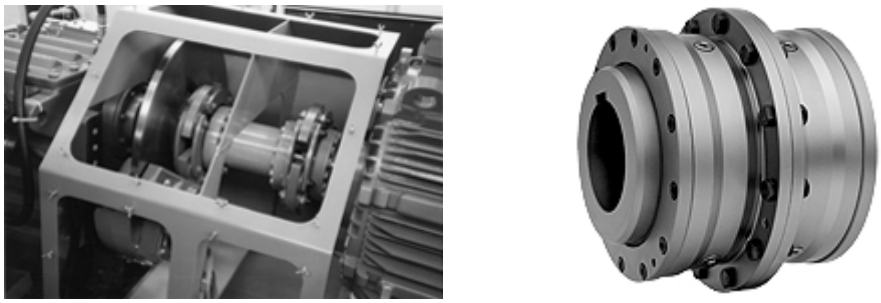


Figura 13. Acople de Enlace Flexible tipo GKG (*rubber socket-and-joint coupling*) con disco de freno. Acople Flender/ARPEX Torsionalmente Rigido

Sin embargo, este diseño presenta ciertos inconvenientes: por un lado no se garantiza el bloqueo del rotor eólico cuando por accidente se desacopla del tren de potencia el eje lento o el cuerpo de baja velocidad de la caja multiplicadora. Por otra parte, en el caso de bloqueo del rotor los dientes de la caja multiplicadora están sometidos a esfuerzos producidos por la variabilidad del viento, aún cuando el giro se impide desde el eje de alta velocidad. Este problema da lugar a desgaste de los engranajes de la caja multiplicadora. Para solucionar estos problemas, algunos fabricantes han opta-do por no bloquear completamente el tren de potencia, incluso durante los periodos de mantenimiento.

Figura 14. Acople Felxible Fender/BIPEX

Otra solución a los inconvenientes anteriores es colocar el freno mecánico en el eje de baja velocidad. Esta ubicación es muy apropiada en turbinas de reducida potencia, sin embargo para máquinas de elevada potencia el tamaño del freno en esta posición es excesivamente grande, incluso en el caso que estuviera diseñado para funciones de bloqueo. Por razones económicas, este componente rara vez se dispone en el eje lento de los grandes aerogeneradores.

5. Caja Mutiplicadora [1]

La caja multiplicadora como elemento del tren de potencia aparece como una opción de diseño habitual ya desde las primeras turbinas eólicas concebidas para producir energía eléctrica. La necesidad de este elemento se justifica por el diferente régimen de giro que requiere un rotor eólico y un generador eléctrico de diseño convencional.

Tabla 1. Características de Cajas Multiplicadoras Planetarias Flender http://www.flender.com

Caracteristica	*Valor*
Potencia Nominal	30 a 13.000 kW
Rango de Torque	22.000 hasta 600.000 Nm
Relación De transmisión	25 hasta 4.000

Por una parte, la velocidad de giro de la turbina depende en gran medida del diseño aerodinámico de las palas. Los modernos rotores eólicos, ya sean de velocidad fija o variable, se diseñan con velocidades lineales en la punta de la pala que pueden variar entre 70 y 80 m/s. Considerando constante este parámetro, es inmediato concluir que cuanto mayor sea el diámetro de la máquina y por lo tanto su potencia asignada, menor ha de ser la velocidad de giro del rotor eólico.

(1) (2) (3) (4)

Figura 15. Unidad Convertidora Planetaria (1) PEAS 4390/1.500 kW, (2) PEAB 4435/2.000 kW, (3) PZAB 3450/2.500 kW, PZFB 3680/5.000 kW. http://www.winergy-ag.com

Por otra parte, considerando un generador eléctrico conectado directamente a una red de frecuencia constante, por ejemplo 50 Hz, su velocidad de sincronismo depende exclusivamente del número de pares de polos. El empleo de generadores multipolares que se adapten al régimen de giro del rotor eólico sin necesidad de cajas multiplicadoras es una opción de diseño que no se ha considerado hasta hace pocos años por los siguientes motivos:

- Para que el número de polos no sea excesivamente elevado la frecuencia eléctrica del generador ha de ser más reducida que la frecuencia de la red, ya que diseñar un generador directamente acoplado a una turbina que gire, por ejemplo, a 20 r.p.m. con una frecuencia de alimentación de 50 Hz, supondría ubicar 300 polos en el inductor de la máquina, lo cual no es en la mayoría de los casos viable económica-mente y supondría, además, serios problemas estructurales y de montaje del aerogenerador.
- Gobernar un generador eléctrico con una frecuencia distinta de la frecuencia de la red requiere utilizar convertidores electrónicos con una fiabilidad suficiente de sus componentes. Esta madurez tecnológica de los convertidores electrónicos para una gama de potencias entre 500 y 1000 kW se ha alcanzado recientemente.

Como se verá posteriormente, uno de los parámetros de diseño de las cajas multiplicadoras es la relación de transformación (cociente entre la velocidad de giro rápido y el eje de giro lento). Parece claro que, cuanto menor sea esta relación menor será el tamaño de este elemento y por lo tanto su coste. Las dos únicas formas de reducir la relación de transmisión son: disminuir la velocidad del generador aumentando el número de polos y para una turbina en la que el diámetro está fijado aumentar la velocidad de giro de la turbina. Esta última forma de reducir la relación de transmisión implica aumentar los esfuerzos centrífugos y lleva asociado un aumento de las cargas aerodinámicas sobre la estructura de la máquina. A pesar de esto, los diseñadores siguen realizando esfuerzos considerables para aumentar la velocidad de giro del rotor eólico.

Esta necesidad inicial de reducir la relación de transmisión no se percibe en la actualidad como un problema de diseño crítico. Hoy día es posible encontrar en el mercado cajas multiplicadoras de elevada potencia (hasta 2 MW) y relación de transmisión (1:100) con rendimientos y fiabilidad muy altos durante todo su período de funcionamiento.

Este grado de madurez actual se ha alcanzado gracias a la experiencia adquirida durante años en los que las cajas de multiplicación fueron causa continuada de avería, sobre todo en los primeros diseños. Las causas de fallo en este elemento no se debían al diseño de la caja multiplicadora en sí, sino a las condiciones de trabajo tan especiales a las que se ve sometida. El par que transmite una caja multiplicadora y los esfuerzos que soporta su estructura presentan una componente oscilatoria muy marcada que provoca fatiga y por lo tanto aumento de la probabilidad de fallo. Actualmente, los diseños de cajas multiplicadoras se realizan con unos coeficientes de seguridad muy elevados en los que se considera el estado real de cargas con los que trabaja este componente. La tendencia en cuanto al número de averías de cajas multiplicadoras se ha reducido considerablemente en los últimos años.

5.1. Tipos de Cajas Multiplicadoras

Los engranajes de las cajas multiplicadoras pueden ser de dos tipos: engranajes rectos o helicoidales. Los primeros se utilizan en cajas multiplicadoras de ejes paralelos y presentan una relación de multiplicación máxima en cada etapa de 1:5. Los engranajes helicoidales tienen un diseño más sofisticado que los engranajes rectos y se emplean en cajas multiplicadoras de tipo planetario. La relación de multiplicación en cada etapa puede ser como máximo de 1:12.

Las necesidades de transmisión de las turbinas actuales requieren el empleo de al menos dos o tres etapas de multiplicación. En la Figura 17 se muestran diferentes configuraciones de cajas multiplicadoras.

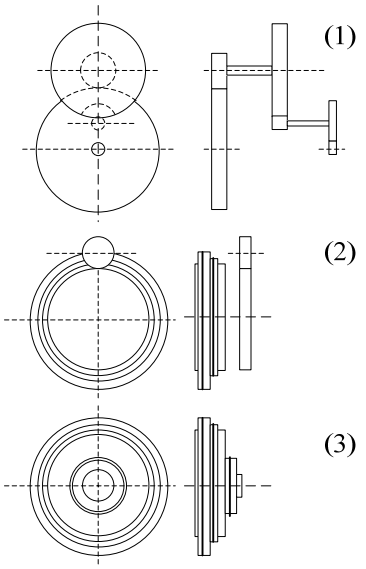


Figura 16. Diferentes configuraciones de cajas multiplicadoras. 1. 3 etapas de ejes paralelos. 2. 3 etapas: 2 planetarias y 1 de ejes. 3. 3 etapas planetarias.

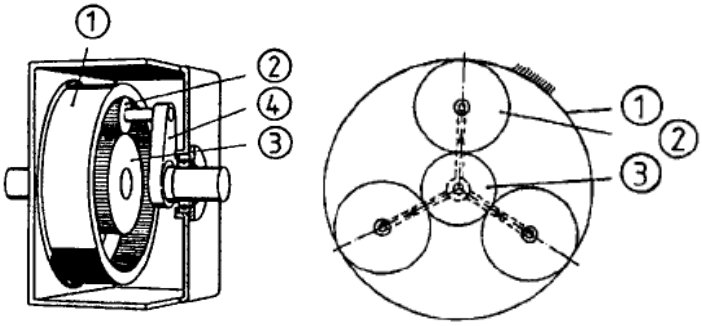


Figura 17. Esquema de un sistema planetario. DIN 686. 1. rueda de aro, 2. rueda de planeta, 3. rueda del sol. 4. Impulsor planetario

En general, las cajas multiplicadoras de ejes paralelos son más sencillas de diseño y por lo tanto más baratas que los diseños planetarios. Sin embargo, ante igualdad en la relación de transmisión y en la potencia transferida los diseños con ejes planetarios son más robustos y menos pesados, lo que hace que ésta opción sea la más utilizada en máquinas de gran potencia.

En la actualidad los diseños de cajas multiplicadoras que incorporan los aerogeneradores se realizan de forma específica para esta aplicación. Los nuevos diseños de este componente incluyen parte de los apoyos del eje de baja velocidad en su propia estructura. Las ventajas que presenta este diseño es por una parte su reducido peso y su facilidad de ensamblaje con otros elementos del tren de potencia durante el período de montaje. Otros diseños utilizan, al menos una etapa de engranajes rectos para conseguir que los ejes de la caja multiplicadora no estén alineados. Esta configuración se emplea en la actualidad en máquinas de paso variable donde es posible utilizar un eje de baja velocidad hueco a través del cual se conecta un vástago movido por un pistón hidráulico para modificar el ángulo de paso de las palas.

5.2. Dimensionamiento

Para diseñar correctamente una caja multiplicadora no es suficiente conocer las velocidades y pares que transmitirán sus ejes en condiciones nominales. Como se indicó con anterioridad, el hecho de no considerar las variaciones de par tan bruscas que se transmiten en una caja multiplicadora ha sido causa de fallos sistemáticos en los primeros diseños.

Para que el fabricante de cajas multiplicadoras sea capaz de realizar un diseño adecuado de los engranajes, ejes y apoyos, es necesario que conozca las solicitaciones mecánicas y esfuerzos que sus componentes han

de transmitir y soportar durante toda la vida útil del componente. Esta información previa se conoce tras un detallado estudio de cargas que el diseñador del aerogenerador debe proporcionar.

El parámetro de diseño más importante es el par transmitido por el eje de baja en condiciones nominales, sin embargo este par está sujeto a variaciones importantes. Una forma de considerar las variaciones de par es mediante el *espectro de carga* que consiste en representar la magnitud y fase de estas pulsaciones de par durante la vida de operación de la caja multiplicadora. El diseño ha de realizarse de tal forma que la línea de resistencia a fatiga del material en función del número de ciclos sea superior en todo momento al espectro de carga, Figura 19.

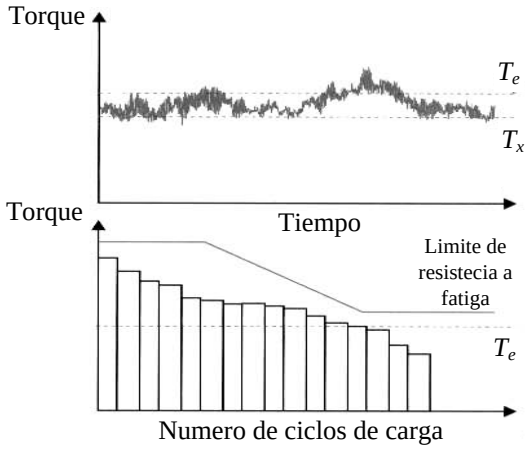


Figura 18. Espectro de carga y límite de resistencia a fatiga de una caja multiplicadora

En muchas ocasiones, no es conocido el espectro de carga con el que la caja multiplicadora debe trabajar, por lo que es habitual utilizar métodos empíricos para realizar su diseño. El parámetro inicial de partida es el par nominal, T_n, que se calcula, aproximadamente, como el cociente entre la potencia eléctrica asignada al aerogenerador y la velocidad de giro nominal. Se define el par equivalente, T_e como aquel que aplicado de forma continua sobre el eje de la caja multiplicadora tuviera los mismos efectos mecánicos que el espectro real de cargas. El cociente entre el par equivalente y el par nominal se conoce como el *factor de servicio* ($K_a = T_e/T_n$).

La magnitud de este factor de servicio depende en gran medida de la tecnología de aerogenerador, es decir, si es de velocidad fija o variable, o si el rotor eólico se controla de forma activa o pasiva. Además el factor de servicio de la caja multiplicadora depende de la disposición del freno mecánico y de la existencia de amortiguamientos mecánicos para reducir las oscilaciones del par transmitido. Los sistemas que presentan factores de servicio mayores son los sistemas de velocidad fija y control de paso de pala pasivo con valores cercanos a 2.0 [5]. Los aerogeneradores de velocidad variable y control de paso de pala activo presentan factores de servicio para el diseño de la caja de multiplicación inferiores a 2.0.

Este criterio de diseño es completamente empírico y su aplicación de-pende en gran medida de la experiencia del diseñador. En cualquier caso, cabe decir, que diseños con factores de servicio cercanos a 2.0, presentan generalmente límites de resistencia superiores en tres veces el par nominal de diseño. Este par tan elevado sólo se presenta durante un accidente de cortocircuito. Para prevenir esta situación, que puede provocar una avería irreversible en la caja multiplicadora, algunos diseños disponen de embragues en el eje de alta velocidad con el fin de limitar el par transmitido a otros componentes del sistema en caso de avería.

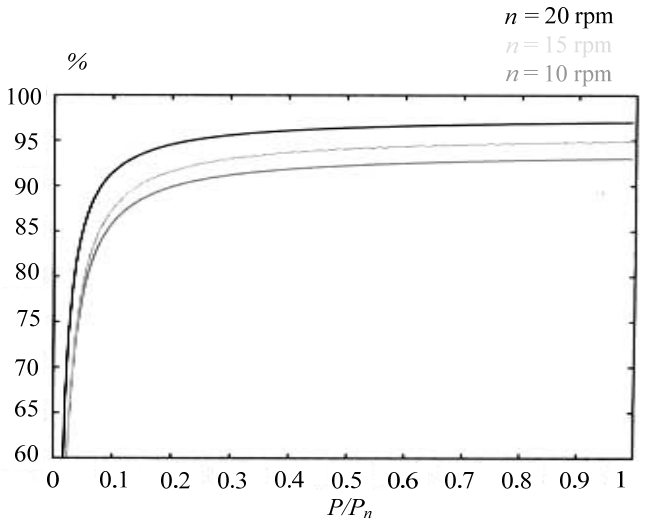


Figura 19. Rendimiento de una Caja Multiplicadora en función de la velocidad de giro y la potencia transmitida frente a su valor nominal

5.3. Rendimiento

Los modernos multiplicadores de velocidad se caracterizan por las pocas pérdidas que presentan durante todo el proceso de transmisión. Estas pérdidas mecánicas se deben a la fricción entre dientes del engranaje y al flujo de aceite necesario para la lubricación. En las pérdidas mecánicas se incluyen también las debidas a la fricción entre los rodamientos y los cojinetes de apoyo. La irreversibilidad de estos procesos da lugar a una transmisión de calor que puede llegar a ser un problema, sobre todo en cajas multiplicadoras con diseño planetario de elevada potencia y muy compactas. Por esta razón, en muchos casos es necesario utilizar sistemas de refrigeración por aire o agua.

El rendimiento mecánico, en principio depende de: el número y tipo de etapas multiplicadoras, la potencia mecánica transmitida y la velocidad de giro.

La pérdida de potencia por etapa se estima en un 2% para cajas multiplicadoras con engranajes rectos (sistemas de ejes paralelos) y un 1% para cajas multiplicadoras con engranajes helicoidales (sistema planetario). En la Figura 21 se muestran diferentes bandas de rendimiento máximo de caja multiplicadoras en función de la potencia nominal transmitida y el tipo y número de sus etapas de transmisión.

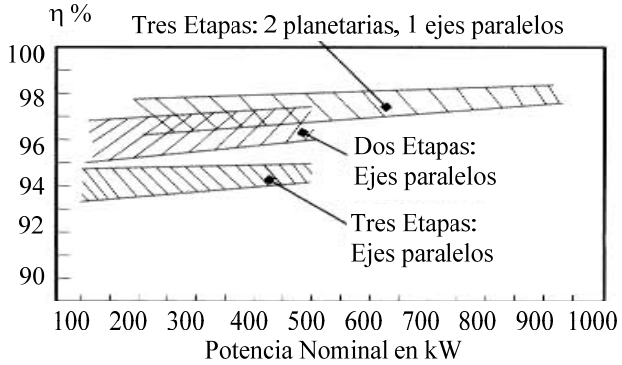


Figura 20. Rendimiento de cajas multiplicadoras en función de la potencia transmitida, número y tipos de etapas

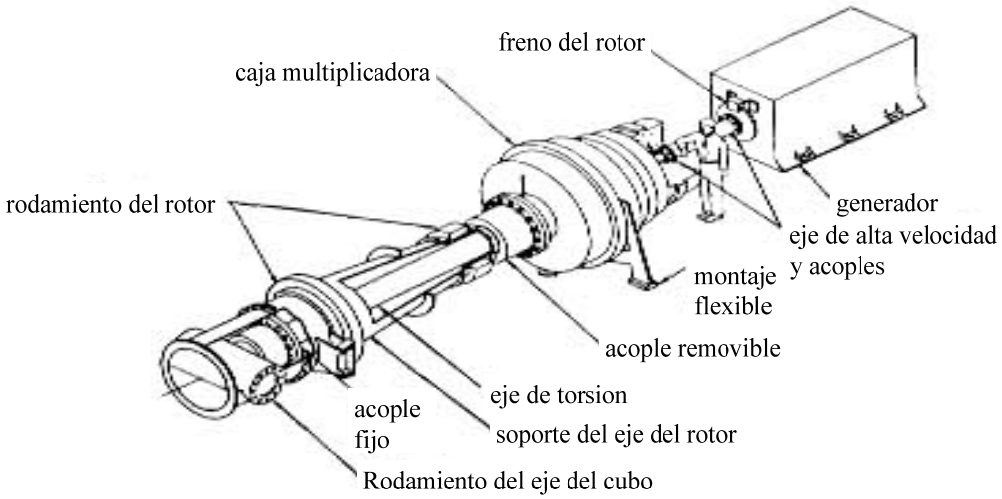


Figura 21. Eje del Aerogenerador MOD 2

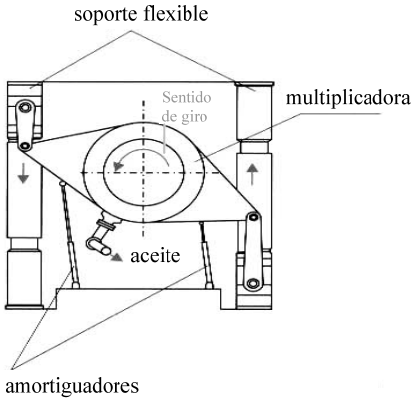


Figura 22. Caja multiplicadora con suspensión

5.4. Ruido acústico

Parte de las pérdidas de potencia se convierten en ruido acústico. Este factor puede ser determinante en algunos diseños, sobre todo cuando el aerogenerador se ubica en zonas cercanas a núcleos de población. El ruido acústico depende en gran medida del tipo de materiales utilizados y del tamaño de la caja multiplicadora. El ruido acústico se mide por el nivel de presión de las ondas sonoras, en dBA. Los diseños de mediana potencia con ejes paralelos, hasta 1MW, presentan niveles de presión entre 80 a 85 dBA a 1 m de distancia del aerogenerador. Para cajas multiplicadoras de gran potencia, hasta 3MW, el ruido acústico puede ser de 100 a 105 dBA [5].

5.6. Amortiguamientos mecánicos

Los aerogeneradores conectados directamente a la red mantienen prácticamente constante su velocidad de giro, esto hace que las variaciones de la velocidad del viento se traduzcan en oscilaciones de par que se transmiten directamente al tren de potencia. En concreto, los generadores asincrónicos presentan pequeñas variaciones de velocidad cuando aumenta el par transmitido (deslizamiento), sin embargo los generadores sincrónicos están diseñados de tal forma que su velocidad de giro permanezca constante, al menos en régimen permanente, lo que da lugar a un acoplamiento muy rígido con la red. Son pocos los diseños de aerogeneradores, que se han realizado con generadores sincrónicos directamente acoplados a la red, sin embargo en todos ellos se ha incluido algún sistema de amortiguamiento de las oscilaciones mecánicas para reducir las cargas sobre el tren de potencia.

A continuación se indican algunas técnicas empleadas para amortiguar estas oscilaciones mecánicas.

5.6.1 Diseño flexible a torsión del eje del rotor

Este diseño se utilizó, no con demasiado éxito, en el aerogenerador americano MOD-2. Esta máquina estaba equipada con un generador sincrónico directamente conectado a la red (sin convertidores electrónicos). Para aportar cierto amortiguamiento al tren de potencia se diseñó el eje principal con dos ejes concéntricos; el más interior se encargaba de transmitir par mecánico y el más exterior aportaba flexibilidad torsional al tren de potencia, Figura 22. La siguiente generación de este prototipo, MOD-5, se diseño con un sistema de velocidad variable para solucionar los problemas estructurales ocurridos en el eje de baja del aerogenerador MOD-2.

5.6.2. Cajas multiplicadoras con suspensión

Una solución para aportar flexibilidad torsional al tren de potencia es utilizar cajas multiplicadoras con suspensión mecánica conectada entre la carcasa de la caja multiplicadora y la bancada de unión a la estructura de la góndola, Figura 23. Esta suspensión consiste en amortiguadores hidráulicos que permiten, en algunos diseños, hasta 300 de torsión en el caso de ráfagas extremas.

5.6.3. Acoplamientos Fluidos

Otra forma de reducir las oscilaciones de par en el tren de potencia es introducir un acoplamiento fluido entre el generador y la caja multiplicadora, sin embargo este tipo de sistemas introduce pérdidas adicionales de potencia y un mayor mantenimiento del sistema, Figura 23.

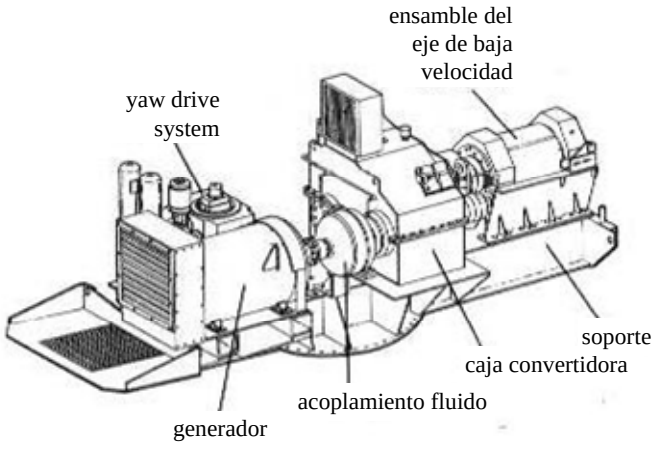


Figura 23. Sistema de Transmisión Con Amortiguamiento por Fluidos

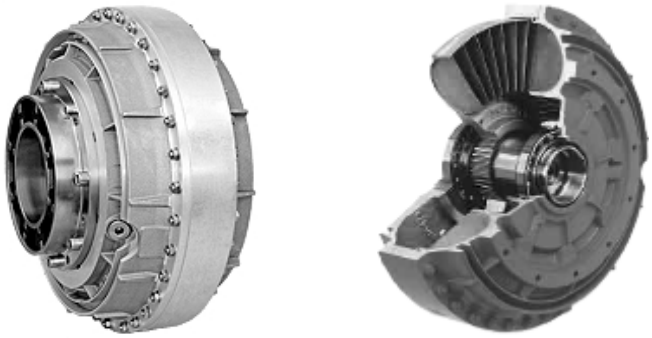


Figura 24. Acomplamiento Felxible. Flender/FLUDEX

5.6.4. Transmisiones Variables

Los problemas asociados a las oscilaciones de par se pueden solventar en el momento que la velocidad de giro del eje lento se pueda modificar, ya que la aceleración y la inercia del rotor eólico permite almacenar las variaciones transitorias de potencia en forma de energía cinética de rotación. Una

forma de cambiar la velocidad de giro del eje del rotor, utilizando generadores eléctricos acoplados directamente a la red sin necesidad de convertidores electrónicos, es empleando un sistema de transmisión mecánica de relación variable. Este sistema, que no ha pasado de la fase de prototipo, presenta como inconveniente fundamental la complejidad mecánica que se introduce al tren de potencia. Los sistemas de velocidad variable actuales, modifican la velocidad de giro del sistema alimentando al generador a frecuencia variable utilizando convertidores electrónicos. En la Figura 16 se muestra el esquema de un sistema mecánico de transmisión variable.

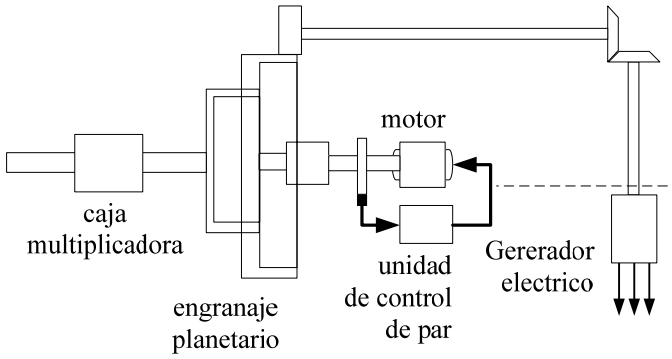


Figura 25. Esquema de un Sistema Mecánico de Transmisión Variable

Referencias Documentales

[1] J.L. Rodriguez, J.C. Burgos, S. Arnalte. Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica. Editorial Rueda. S.L. Madrid España, 2003.