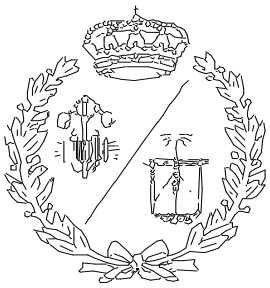
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

Modelado y control dinámico de un Aerogenerador

(Modeling and dynamic control of a Wind Turbine)

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Autor: Juan Nistal Lastra

Enero-2015

TÍTULO	**Modelado y control dinámico de un Aerogenerador**		
AUTOR	**Juan Nistal Lastra**		
DIRECTOR / PONENTE	**Jose Ramón Llata García**		
TITULACIÓN	*Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales*	**FECHA**	16-ENERO-2015

PLABRAS CLAVE

-Modelado
-control
-dinámico
-aerogenerador

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proyecto que vamos a llevar a cabo va a ser tratar de simular un aerogenerador por completo de una forma numérica. Se va a partir de unas ecuaciones básicas de diferentes ámbitos o factores que pueden afectar a un aerogenerador (aerodinámica, mecánica, eléctrica y las correspondientes perturbaciones) hasta llegar a simular el modelo por completo.

Con ello se calculará un controlador y utilizando las herramientas de cálculo por ordenador simularemos diferentes situaciones que puedan darse para ver como de exacto sería nuestro modelo

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En primer lugar partiremos de unas ecuaciones básicas de la aerodinámica para obtener un modelo aerodinámico de un aerogenerador. A partir de una serie de cálculos y suposiciones matemáticas obtendremos uno de los tres modelos que utilizaremos para describir nuestro aerogenerador.

Posteriormente pasaremos a definir el modelo mecánico. Se tomaran como base las ecuaciones de la mecánica básica. De aquí obtendremos el segundo gran modelo de nuestro aerogenerador el cual uniremos posteriormente al aerodinámico.

Por último realizaremos un modelo eléctrico básico que simulara el paso de energía mecánica a la energía eléctrica que nos proporcionara el aerogenerador.

Una vez que dispongamos de estos tres modelos, los uniremos para formar un modelo total y completo de un aerogenerador. Habrá que tener en cuenta las perturbaciones externas, sobre todo la variación del viento, que es lo que nos dará un modelo mucho más realista.

Con este modelo pasaremos al programa de cálculo MATLAB, específicamente a una de sus herramientas llamada QFT. Con ella podremos ver cómo se comporta nuestro modelo con una gran exactitud ya que en este programa se consideran variaciones en los valores de las variables así como de algunas constantes que no se hayan calculado con total exactitud.

Una vez acabado con el QFT lo que haremos será hacer un diagrama de bloques realimentado en simulink, al que se le podrán introducir diferentes variantes para ver cómo de exacto se comporta el modelo.

CONCLUSIONES / PRESUPUESTO

Al final, una vez que tenemos el modelo y lo probamos en simulink frente a diferentes entradas y diferentes valores de las variables de nuestro aerogenerador, podemos comprobar cómo se comporta correctamente.

Se puede observar como en cada uno de los casos existen pequeñas variaciones en el comportamiento, como era de esperar, pero a pesar de ello el comportamiento es muy similar en todos los casos. Así se puede concluir que el modelo y controlador realizado a nuestro aerogenerador se comportan de una manera muy realista.

BIBLIOGRAFÍA

- Wind Energy Systems: Control Engineering Design

Edited by Mario García-Sanz /Constantine H. Houpis

- Power Systems Analysis

Second Edition (Arthur R. Bergen / Vijay Vittal)

- Wind Power in Power Systems

Edited by Thomas Ackermann

- Wind Energy Explained (Theory,Design and Application)

Edited by J.F.Manwell / J.G.McGowan / A.L.Rogers

- QFT Manual (The QFT Frecuency Domain: Control Design Toolbox)

For Use with $MATLAB^{(R)}$

ÍNDICE

1.-MEMORIA 2

1.1.- Planteamiento del Problema 2

1.2.- Alcance y descripción del Entorno 2

1.3.- Objetivos principales 3

1.4.- Introducción a la energía Eólica 4

1.5.- Introducción a los Aerogeneradores 5

1.5.1.- Clasificaciones 5

1.5.2.- Partes 6

1.5.3.- Funcionamiento 7

1.5.4.- Control de un Aerogenerador 8

1.6.- Justificación de la opción elegida 9

2.- CÁLCULOS 10

2.1.- Calculo Básico 10

2.1.1.- Modelo Aerodinámico 12

2.1.2.- Modelo Mecánico 18

1.-Transmision Directa 20

2.-Transmision con reducción 23

2.1.3.-Matriz de transferencia 25

2.1.4.- Modelo Eléctrico 27

2.2.- Diagramas de bode 31

3.- CONTROL 34

3.1.- Características del sistema a controlar 34

3.2.- Técnicas de Control 34

3.3.- Definición de QFT 34

3.4.- Diseño del controlador 35

3.5.- Pruebas, comprobaciones y resultados 39

4.- ANEXO I - DEDUCCIONES DE FUNCIONES 43

5.- ANEXO II – CÓDIGO MATLAB 45

6.- ANEXO III – BIBLIOGRAFÍA 50

1.-MEMORIA

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proyecto de fin de grado que se va a presentar a continuación se basa principalmente en el modelado y control dinámico de un aerogenerador. En él se comenzará analizando los principales factores que pueden afectar a un generador de eje horizontal. A partir de esos factores habrá que diseñar unos modelos (tanto para el caso aerodinámico, mecánico y eléctrico) que van a ser los que representen de un modo más realista, como se comporta un aerogenerador ante ciertos factores, tanto externos como internos.

Una vez realizados dichos modelos, se pasará a simularlos en MATLAB. Se tendrá en cuenta que pueden existir ciertas variaciones en las componentes que afectan a nuestro aerogenerador.

1.2.- ALCANCE Y DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO

El proyecto, como hemos dicho en el breve resumen hecho en la parte superior, va a constar en el modelado y control de un aerogenerador de eje horizontal. Otra de las características que va a tener el aerogenerador con el que se va a trabajar va a ser, que es un aerogenerador D.D. (Direct-Drive) el cual lo que tiene es un único eje de transmisión de la potencia.

El entorno en el que se trabajará a la hora de diseñar el aerogenerador es, principalmente, el Matlab. Con este programa se podrá modelar y representar el modelo calculado a mano (a partir de todas las ecuaciones que necesitemos) y se observará los diagramas de bode del comportamiento de nuestro modelo.

Posteriormente nos centraremos en una herramienta de Matlab llamada QFT. Con ella podremos controlar nuestro aerogenerador de la manera que deseemos.

1.3.- OBJETIVOS PRINCIPALES

El objetivo de este proyecto consiste en conseguir diseñar, a partir de una serie de las fórmulas más básicas de la aerodinámica y de la mecánica, unos modelos completos de un aerogenerador. Estos modelos serán los suficientemente completos para considerar cualquier factor interno o externo que pueda afectar al aerogenerador que estamos analizando.

Una vez que se haya conseguido los modelos de nuestro aerogenerador, habrá que pasar a simularlos en algún programa matemático (MATLAB) en el que se pueda ver una aproximación del comportamiento de nuestro aerogenerador, y poder analizarlo en su plenitud.

Es necesario también, en algún momento, considerar los casos extremos en las perturbaciones. Esto nos llevará a un estudio mucho más exhaustivo, y a un análisis mucho más completo de los límites del trabajo.

Por otra parte se destacarán los principales objetivos de control. Entre estos otros objetivos tenemos:

- Fiabilidad y disponibilidad: fiabilidad de los aerogeneradores bajo condiciones extremas externas y cambios internos, operación a largo tiempo y una alta disponibilidad. Esto suele ser mucho más relevante para los aerogeneradores offshore debido a la accesibilidad limitada y los altos costes en el mantenimiento.

-Maximizar la captación de la energía: es necesario maximizar esta captación de energía optimizando la conversión de la eficiencia referida a las condiciones de la velocidad del viento y limitando la producción de energía para minimizar la fatiga mecánica que pueda ser producida y las cargas extremas.

-Carga mecánica y atenuación de fatiga: como ocurre con las turbinas, esta aumenta con el tamaño. Las cargas estructurales juegan un papel vital en el diseño de los controladores también. Como principales propuestas de control de sistemas es bueno mantener ambas, la máxima carga mecánica en la estructura de la turbina y la fatiga mecánica con los límites del diseño.

-Prever amortiguación: incrementar el tamaño de los aerogeneradores requiere palas más grandes y estructuras más ligeras y flexibles. Esto es importante tenerlo en cuenta para poder prever la amortiguación en su totalidad.

-Calidad de la energía y estabilidad en la red: el sistema de control del aerogenerador debe asegurar la calidad de la potencia suministrada: (1) reacción ante bajadas repentinas de tensión, (2) evitar parpadeos de energía, (3) corregir el factor de potencia, (4) regular correctamente la tensión y (5) prevención de contenidos de bajos armónicos.

1.4.- INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es una energía renovable y limpia y prácticamente interminable. Esta energía se basa en el viento (aire en movimiento). El viento se puede definir como una corriente de aire resultante de las diferencias de presión en la atmósfera provocadas, en la mayoría de los casos, por variaciones de temperatura, debidas a las diferencias de la radiación solar en los distintos puntos de la Tierra.

Existen ciertos factores que afectan al viento. Según se den o no dichos factores, obtendremos diferentes propiedades del viento. Algunos de estos factores son:

-Situación geográfica

-Características climáticas

-Estructura topográfica

-Irregularidades del terreno

-Altura sobre el nivel del suelo

Todos y cada uno de estos factores provocan que, dependiendo de cuales de estas características tengamos, obtendremos un viento completamente diferente: ya sea más frio o caliente, más fuerte, más racheado, con cambios bruscos o no de dirección…

Sólo un 2 % de la energía solar que llega a la Tierra se convierte en energía eólica y por diversos motivos, sólo una pequeña parte de esta energía es aprovechable. A pesar de ello, se ha calculado que el potencial energético de esta fuente de energía es unas 20 veces el actual consumo mundial de energía, lo que hace de la energía eólica una de las fuentes de energía renovables de primera magnitud.

La energía del viento es de tipo cinético (debida a su movimiento); lo que hace que la potencia obtenida del mismo dependa de forma acusada de su velocidad, así como del área de la superficie captadora. Desde hace siglos el ser humano ha aprovechado la energía eólica para diferentes usos: molinos, transporte marítimo mediante barcos de vela,

serrerías,... pero es en la actualidad cuando su uso es casi exclusivo para la obtención de electricidad.

Las máquinas eólicas encargadas de este fin se llaman aerogeneradores, aeroturbinas o turbinas eólicas. En definitiva, los aerogeneradores transforman la energía mecánica del viento en energía eléctrica.

1.5.- INTRODUCCIÓN A LOS AEROGENERADORES

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

1.5.1.- Clasificaciones

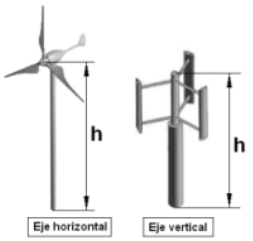
La primera y más clásica clasificación, se basa en la posición de su eje principal. Existen dos tipos, los de eje horizontal y los de eje vertical.

Los aerogeneradores de **eje horizontal**, se les llama de esta forma ya que poseen los ejes principales situados paralelamente al suelo. Necesita un control de orientación al viento, por ejemplo un motor eléctrico para aerogeneradores de más de 50 kW. Los elementos de conexión, multiplicador y generador, se encuentran a la altura del rotor en la góndola situado en lo alto de la torre. La disposición de las palas, puede ser a barlovento o a sotavento. Con este tipo de aerogeneradores obtenemos una mayor producción energética, pero por desgracia, el manipulado, restauración y arreglos que pueda necesitar nuestro generador eólico, provoca que se encarezca su precio.

-Dentro de esta clasificación de eje horizontal podemos encontrar otra clasificación, la cual depende del número de palas que tenga nuestro aerogenerador. Podemos encontrar 3 tipos de aerogenerador en este caso: de dos palas, de tres palas o aerogeneradores multi-palas. Los más utilizados y en el que se basa el proyecto es el aerogenerador de tres palas.

Por otra parte, los aerogeneradores de **eje vertical**, tiene los ejes principales perpendiculares al suelo. Una ventaja de este uso es que captan el viento en cualquier

dirección, por lo tanto no necesita un control de orientación, otra ventaja es que el enlace con los multiplicadores y generadores se realiza en el suelo y por lo tanto tienen un coste menor y una mayor sencillez a la hora de su montaje. La causa de no utilizar más estos tipos de aerogeneradores es que poseen una eficiencia notablemente menor que los aerogeneradores de eje horizontal.



(Imagen obtenida de http://www.minieolicadelanzarote.com)

Otra de las clasificaciones que podemos encontrar es dependiendo de dónde se encuentren instalados los aerogeneradores, en mar o en tierra. Nosotros estamos analizando el caso de un aerogenerador onshore (en tierra) pero también existen aerogeneradores offshore (en el mar).

1.5.2.- Partes

En este apartado vamos a pasar a definir y explicar las partes más importantes de las que está compuesto un aerogenerador de eje horizontal onshore. Estos son: las palas, el buje, el equipo multiplicador de potencia, los ejes de alta y baja velocidad, el generador, el controlador de la torre.

Las palas del rotor: capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje. Para hacernos una idea de las dimensiones de una pala, actualmente rondan alrededor de los 30m.

Buje: es el elemento que realiza la unión de todas las palas del aerogenerador. Se monta sobre el eje de baja velocidad, desde el que se transmite el par motriz a la transmisión de potencia del aerogenerador.

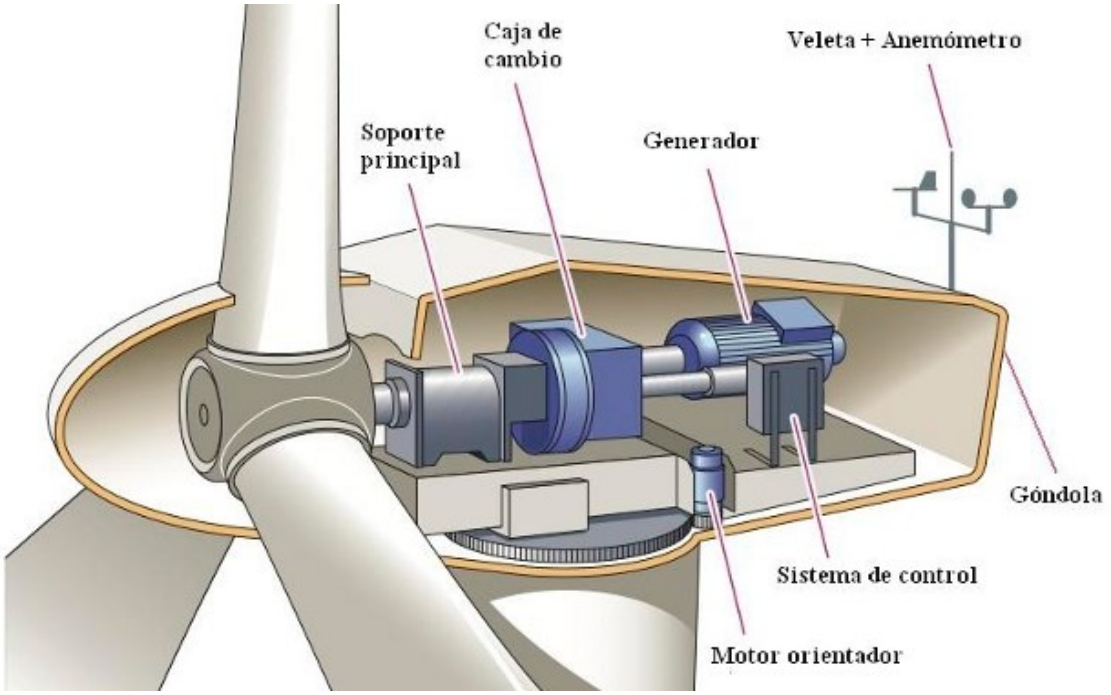
Equipo multiplicador de potencia: permite que el eje de alta velocidad, gire 50 veces más rápidamente que el eje de baja velocidad.

Ejes de alta y baja velocidad: el eje de baja velocidad del aerogenerador conecta el buje del rotor al multiplicador. El eje de alta velocidad está equipado con un freno de disco

mecánico de emergencia. Este freno se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante el proceso de mantenimiento de la turbina.

Generador: también conocido como generador asíncrono o de inducción. Está formado por una máquina encargada de transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Se compone de un rotor, que es la parte móvil y encargada de generar un campo magnético variable al girar las palas, y un estator que se trata de la parte fija sobre la que se genera la corriente eléctrica inducida.

Controlador: el controlador electrónico tiene un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier anomalía, automáticamente se para el aerogenerador y llama al ordenador del encargado (operario), de la turbina a través de un enlace telefónico o módem.



(Imagen obtenida en http://energiasrenovadas.com)

1.5.3.- Funcionamiento

La obtención de la potencia de un aerogenerador, se consigue convirtiendo la fuerza del viento en un par que actúa sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido de las palas y de la velocidad del viento. La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa. Por lo tanto la energía cinética del viento depende de la densidad del aire. A presión

atmosférica normal y a 15ºC la densidad del aire es 1,255 Kg/m3 aunque éste valor disminuye ligeramente con el aumento de la humedad.

En referencia al área de barrido de las palas, ésta determina cuanta energía del viento es capaz de capturar el aerogenerador. A mayor diámetro de palas, la superficie es mayor y por lo tanto la energía que absorbe el rotor es mayor. La velocidad del viento es un parámetro muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad. A mayor velocidad de viento, la energía que capte el aerogenerador es mayor. La energía cinética del viento es capturada por el aerogenerador gracias a las palas de rotor. Cuando el viento incide contra las palas, ésta giran en torno el eje del rotor y por lo tanto hacen girar el eje de baja velocidad al que está acoplado el buje. Éste gracias al multiplicador hace girar el eje de alta velocidad al que está acoplado el generador, que es el productor de energía eléctrica.

1.5.4.- Control de un Aerogenerador

En lo que respecta al control de un aerogenerador existen una serie de variables que podemos modificar para obtener las mejores prestaciones o el mejor rendimiento de nuestro aerogenerador. Algunas de estas variables son:

1-Regulación por frenos aerodinámicos que se activan por la acción de la fuerza centrífuga y que actúan cuando el giro del rotor no es el adecuado por sobrepasar un cierto valor.

La **orientación** por medio de **palas orientables** es la más utilizada. Su funcionamiento consiste en actuar sobre el ángulo de calaje β de cada pala, ya que la fuerza aerodinámica que actúa sobre ella es función del ángulo θ, y que a la vez es función del ángulo de ataque ω y del calaje β, (θ =β+ ω). De esta forma se consigue variar la fuerza aerodinámica que actúa sobre la pala sin más que hacer variar el ángulo de calaje, que se controla por procedimientos mecánicos relacionados con la velocidad de ataque del viento.

2-Control electrónico de la potencia, mediante este control se puede variar la velocidad del rotor, controladas por un microprocesador y accionadas por interruptores estáticos, de esta forma se consigue el deslizamiento del generador y con ello la velocidad del rotor.

Por otra parte, también es necesario añadir ciertos sistemas para el control de nuestro aerogenerador. Entre ellos podemos encontrar la orientación en los aerogeneradores de eje horizontal. Esto va a ser, debido a que es absolutamente necesario

e importante que el viento incida perpendicularmente al disco de barrido por el rotor, con el fin de obtener la máxima potencia a base de hacer incidir la mayor cantidad posible de masa de aire en movimiento y así obtener la mayor cantidad posible de energía cinética.

Es necesario por ello, un servomotor o motor paso a paso controlado electrónicamente. Lo que hacemos es medir constantemente la diferencia entre la dirección en la que apunta nuestro aerogenerador y la dirección en la que viene el viento. Calculamos el error que existen entre ellas, y modificamos así nuestro aerogenerador

1.6.- JUSTIFICACIÓN DE LA OPCIÓN ESCOGIDA

Tras haber estado analizando todas las opciones de aerogeneradores que se podrían contemplar durante la realización de este proyecto, se ha llegado a la decisión de elegir un aerogenerador de eje directo (Direct-Drive) debido a que la diferencia básica con el que tiene una reducción es simplemente eso, un reductor de engranajes. Además, al no tener esta reducción en el eje de transmisión se simplifican enormemente los cálculos matriciales.

2.- CÁLCULOS

2.1.-CÁLCULOS BÁSICOS

Antes de comenzar a realizar y simular cada uno de los posibles modelos de nuestro aerogenerador (Aerodinámico, Mecánico, Eléctrico), hay que conocer de dónde parte cada una de las ecuaciones que vamos a necesitar a la hora de simular dichos modelos. Por tanto es necesaria una pequeña descripción de los pasos realizados en cada momento.

Para comenzar con la descripción del modelo Aerodinámico, vamos a partir de la energía cinética que posee el propio aire:

$$E_k = \frac{1}{2} * m * v^2$$

v = velocidad del viento

m = masa del aire en movimiento

Aplicando también las fórmulas correspondientes al flujo de volumen(o la variación del volumen que atraviesa las palas en un determinado periodo de tiempo) y el flujo de masa (o la cantidad de masa que atraviesa las palas en un periodo de tiempo):

$$\dot{v} = \dot{m} * A \longrightarrow \text{siendo A el Area de paso}$$

$$\dot{m} = \rho * v * A \longrightarrow \text{siendo } \rho \text{ la densidad}$$

También será necesario tener presente la fórmula de la Potencia (la cual depende de valores que hemos comentado con anterioridad).

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

Por otro lado, sabiendo que la velocidad del viento antes y después de las palas varía, y que a su vez varía el Área de paso del aire. Será necesario que existan dos fórmulas de la potencia. Pero debido a que también tiene que existir la conservación de la potencia, podremos unir ambas de la siguiente forma. Este paso se puede ver en el anexo de demostraciones.

$$P = \frac{1}{2} * \rho * (A_1 * v_1^3 - A_2 * v_2^3)$$

$$P = \frac{1}{2} * \dot{m} * (v_1^2 - v_2^2)$$

Siendo los valores con un '1' los referidos al momento anterior de pasar a través de las palas y '2' justo después de haber pasado por ellas.

Otro punto importante es la conservación del momento lineal (F_T) el cual depende del flujo de masa que atraviesa las palas y de la velocidad del viento antes y después.

$$F_T = \dot{m} * (v_1 - v_2)$$

Una vez que tenemos tanto la fórmula de la potencia como la del momento lineal, se procede a unirlas ambas para obtener la fórmula siguiente.

$$P_{r2} = \dot{m} * (v_1 - v_2) * v_1$$

Igualando expresiones y comparando

$$P = \frac{1}{2} * \dot{m} * (v_1^2 - v_2^2) = \dot{m} * (v_1 - v_2) * v_1$$

$$P = \frac{1}{4} * \rho * A_r * (v_1^2 - v_2^2) * (v_1 + v_2)$$

siendo A_r el valor medio de área de paso.

Obtenida la P, se pasa al cálculo del 'ratio' que existe entre la potencia extraída y la original de un flujo de aire libre, a través de una misma área de paso. Siendo la potencia original:

$$P_o = \frac{1}{2} * \rho * A_r * v_1^3$$

Conocidas las fórmulas, tanto la correspondiente a la Potencia Original y la Potencia Extraída, se pasa al cálculo el 'Ratio' o Cp.

$$C_p = \frac{P}{P_o} = 4 * a * (1 - a)^2$$

Pudiéndose demostrar dicha igualdad al final del ANEXO I.

Una vez que tenemos la fórmula correspondiente al Cp, calculamos su correspondiente valor máximo. Lo que hacemos es calcular:

$$\frac{dC_p}{da} = 0 \Rightarrow a = \frac{1}{3} \Rightarrow Cpmax = 0.593$$

Una vez que tenemos el valor del C_{pmax} volvemos al cálculo de la potencia extraída por el aerogenerador.

$$C_p = \frac{P}{P_o}$$

$$\left(\quad P = \frac{1}{2} * \rho * A_r * v_1^3 * [\, 4 * a * (1-a)^2] \quad \right)$$

Por otro lado, siendo la fuerza del viento que actua en el Rotor:

$$P = F_T * v_r \;=>\; F_T = \frac{1}{2} * \rho * A_r * v_1^3 * [\, 4 * a * (1-a)^2] * \frac{1}{v_r}$$

y sabiendo que CT es el coeficiente de empuje, podemos obtener:

$$C_T = coef.Empuje = 4 * a * (1-a) = \frac{C_P}{(1-a)}$$

2.1.1.- Modelo Aerodinámico

Una vez que ya se conocen los cálculos básicos y los valores de ellos aplicando las fórmulas necesarias, vamos a proceder a comenzar con el análisis del modelo aerodinámico. Para ello se considerará en primer lugar la rotación que se produce en el aire al tener que atravesar este las palas de nuestro aerogenerador.

Por otro lado, se asume que el aerogenerador está trabajando con las siguientes hipótesis ideales:

-Homogeneidad e incompresibilidad

-Estado estacionario del flujo de los fluidos.

-Sin resistencia al rozamiento

-Número infinito de palas

-Empuje uniforme sobre el rotor

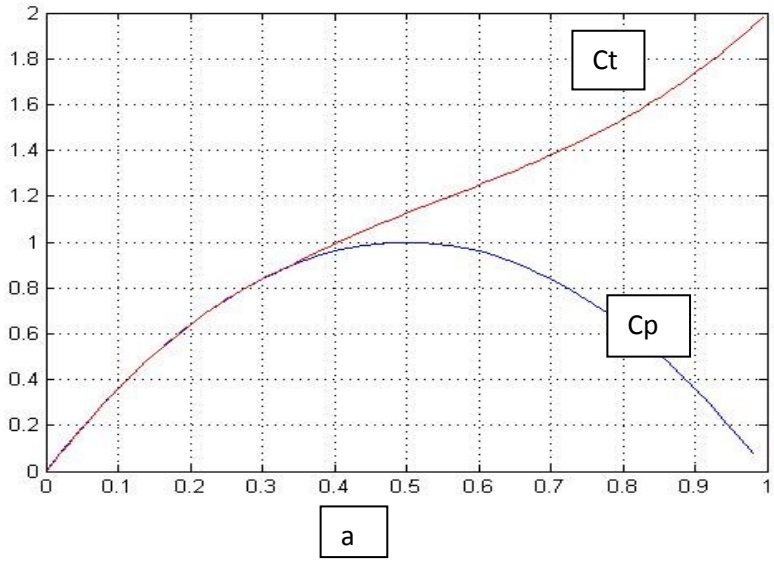
-Una estela sin rotación

-La presión estática aguas arriba y aguas abajo es igual a la presión estática del ambiente.

Después habrá que partir del "C_T" o "Coeficiente de empuje", pero en este caso, en función de un factor determinado denominado factor de Prandtl (f_1). Las fórmulas principales que tendremos uniendo esos valores serán las que siguen:

$$C_T = 4 * a * (1-a) * f_1 \qquad a < 0.33$$

$$C_T = 4 * a * \left[\, 1 - \frac{1}{4} * (5 - 3 * a) * a \right] * f_1 \qquad a > 0.33$$



Pero para poder saber el valor correcto que toma nuestro valor de C_T , lo que vamos a hacer es definir también el valor que tiene el factor de Prandtl del que antes hemos hablado.

$$f_1 = \left(\frac{2}{\pi}\right) * cos^{-1} * (\ \ e^{-N*\frac{(r_p - r)}{2*r*\sin(\emptyset)}}\ \ )$$

Partiremos de:

$$V_r = (1-a) * V_1 \quad | \quad V_2 = (1 - 2*a) * V_1 \ \ <= axial$$

Se tendrá que calcular un nuevo parámetro similar llamado a', que dependerá del radio al que se encuentre.

$a'(1+a') * \left(\ \frac{\Omega_r * r}{v_1}\ \right)^2 = a * (1-a)$ => Pudiendo despejar a' en esa ecuación

Quedando la velocidad rotacional (V_r) del aire a través de rotor:

$$\left(\ a' * \Omega_r * r\right)$$

y la velocidad rotacional del aire aguas abajo:

$$\left(\ 2 * a' * \Omega_r * r\ \right)$$

y obteniendo por último la velocidad relativa del viento

$$V_{rel} = \sqrt{[v_1 * (1-a)]^2 + [\Omega_r * r * (1+a')]^2}$$

Por otra parte también se describirá otra parte muy importante del aerogenerador como pueden ser las palas y la propia terminología del Rotor. Esto es necesario debido al

Efecto Bernoulli, producido por la diferencia en la velocidad del aire a ambos lados de las palas. Este efecto provoca:

- L: Fuerza aplicada en la perpendicular del viento y dirigida hacia la zona donde el viento se mueve o desplaza a una velocidad más alta.
- D: Fuerza aplicada en la dirección paralela al viento y, además, en el mismo sentido que este.
- M: Momento resultante a una distancia "c / 4" del lugar por el cual incide el viento. (Siendo "c" la longitud total de la pala).

Coeficientes de las palas.

$$C_L = \frac{L}{0.5*\rho*{V_{rel}}^2*C} = \frac{Lift\ Force}{Dyn.Force}$$

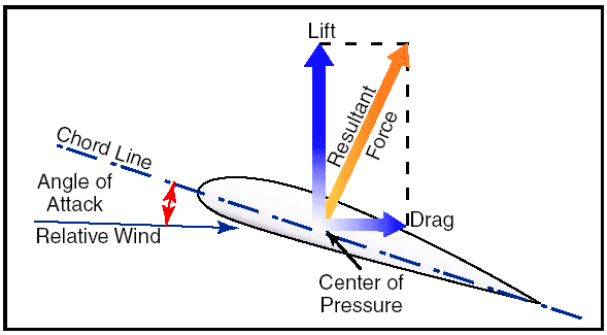
$$C_D = \frac{D}{0.5*\rho*{V_{rel}}^2*C} = \frac{Drag\ Force}{Dyn.Force}$$

$$C_M = \frac{M}{0.5 * \rho * {V_{rel}}^2 * C} = \frac{Pitch\ Force}{Dyn.Force}$$

ρ => densidad

Vrel => velocidad relativa en r

C => longitud chord line



(Fotografía sacada de http://flight-simulator-2004.blogspot.com.es)

Existen también otros efectos y valores importantes aparte del de Bernoulli descrito con anterioridad. Algunos de ellos que también podrían interesar son:

-Efecto de Arrastre.

-Número de Palas.

Estos valores serán necesarios para el cálculo de un nuevo valor del Cpmax, el cual, al ser más próximo a la realidad el modelo, tendrá un valor menor.

Por otra parte existen símbolos y terminología adicional:

-Máximo radio del rotor (r_b)

-Ángulo de ataque y ángulo del Pitch (pala) (α)

-Ángulo entre el plano de rotación y el viento relativo (β)

-Velocidad relativa del viento (Vrel)

-Densidad del aire (ρ)

-Coeficientes de potencia y empuje del rotor (C_p y C_T)

-Factor de inducción axial y de flujo rotacional (a)

-Velocidad angular del rotor (Ωr)

-Velocidad axial de la góndola causada por la torre ($\dot{yt}$)

-Fuerza de empuje aplicada por el viento en el rotor (F_T)

-Par aerodinámico aplicado por el viento sobre el rotor (T_r)

-Par eléctrico aplicado en el eje (T_g)

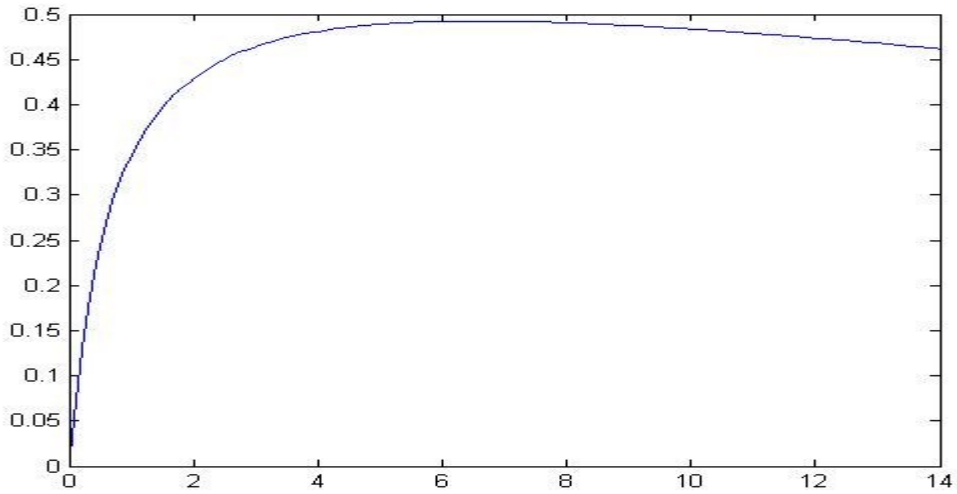
Coeficiente CP

$$C_p = 0.593 * \lambda * \left[\lambda + \frac{1.32 + ((\lambda - 8)/20\ ))^2}{N^{\frac{2}{3}}} \right]^{-1} - \frac{0.57 * \lambda}{\left(\frac{C_L}{C_D}\right) * (1 + \frac{1}{2} * N)}$$

- N: Número de palas.
- CL: Coeficiente de sustentación
- CD: Coeficiente de arrastre.

(Obtendremos diferentes gráficas según la relación de (CL / CD).

Cpmax



λ

En lo correspondiente a los Aerogeneradores las Actuales vamos a partir de:

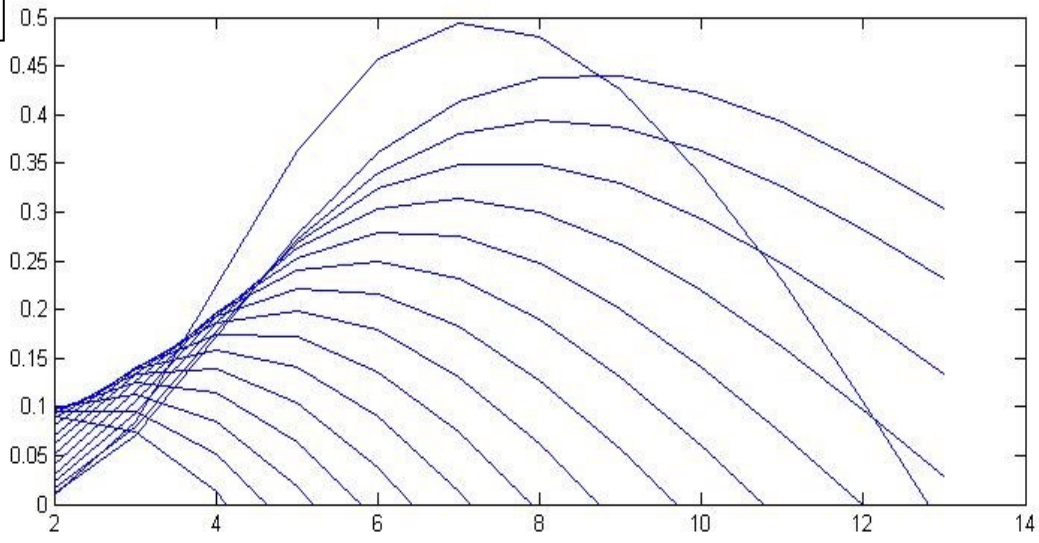
$$\lambda = \frac{\Omega_r * r_b}{v_1}$$

$$C_p(\lambda, \beta) = c1 * \left(\frac{c2}{\lambda_i} - c3 * \beta - c4 \right) * \exp\ \left(\frac{c5}{\lambda_i} \right)$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + c6 * \beta} - \frac{c7}{\beta^3 + 1} \right)^{-1}$$

C1 = 0.39	C5 = 16.5
C2 = 116	C6 = 0.089
C3 = 0.4	C7 = 0.035
C4 = 5	

Cp



λ

En esta aproximación se consideran que la variación del desplazamiento axial de los polos y del barquillo ("$\dot{\gamma} r_p$" e "$\dot{y}$") no afectan significativamente a la velocidad del viento en el rotor.

Por otra parte, si volvemos a la Potencia Mecánica extraída por el Aerogenerador (Wind Turbine).

$$P = \frac{1}{2} * \rho * \pi * r_b^2 * C_p(\lambda, \beta) * v_1^3 = T_T * \Omega_r$$

$$F_T = \frac{1}{2} * \rho * \pi * r_b^2 * C_T(\lambda, \beta) * v_1^2 = N \int_{r_{root}}^{r_b} [\, L * \cos(\phi) + D * \sin(\phi)] * dr$$

$$T_r = \frac{1}{2 * \Omega_r} * \rho * \pi * r_b^2 * C_p(\lambda, \beta) * v_1^3 = N \int_{r_{root}}^{r_b} [\, L * \sin(\phi) - D * \cos(\phi)] * dr$$

2.1.1.- Modelo Mecánico

Una vez que tenemos los cálculos necesarios correspondientes a la parte aerodinámica, se pasará a realizar lo mismo para el modelo mecánico.

Comenzaremos en primer lugar con lo que respecta a la simbología y la terminología:

Masa de la torre (mt)

Masa del cubo (mh)

Masa de cada pala (mb)

Masa de la góndola (mn)

Algunas de las fórmulas básicas que podemos encontrar al realizar el modelo mecánico son las siguientes:

$$m_1 = m_h + m_n + c_t * m_{t'} * (1 - c_b) * N * m_b = masa\ del\ movimiento\ yt$$

$$m_2 = c_b * N * m_b = masa\ del\ movimiento\ \gamma r_b + yt$$

Cd=0.2357 0.0437 <= Cb <= 0.2357

También la energía cinética (E_k) es una parte muy importante a tener en cuenta a la hora de realizar el modelo mecánico teniendo en cuenta que "L" es la altura de la torre y "D" y "d" son los diámetros interior y exterior.

$$E_k = \int_0^L \dot{x}_L^2 * dm = \frac{1}{2} * \int_0^L \frac{y^4 * (3 * L - y)^2}{4 * L^6} * \dot{x}_L^2 * \left(a - \frac{a}{L * v_o} * y\right) * dy$$

$$E_k = \frac{1}{2} * C_i * (a * L) * \dot{x}_L^2 = \frac{1}{2} * m_{cq} * \dot{x}_L^2$$

Dicha ecuación cinemática que podemos ver en la parte superior está sujeta a las siguientes condiciones.

$$si\ \ L_{vo} = \infty_\rho => v = \left(a - \frac{a}{L * v_o} * y\right) = a = cte$$

$$si\ \ L_{vo} = L_{\rho} => v = \left(a - \frac{a}{L * v_o} * y\right) = \left(a - \frac{a}{L} * y\right)$$

Siendo “Lvo” el valor de “y” cuando “v=0”.

Una vez que ya tenemos la ecuación cinemático, pasamos a definir la ecuación dinámica. De este mono partiremos de la ecuación dinámica de los aerogeneradores.

$$M_{\ddot{q}} + C_{\dot{q}} + K_q = Q(\dot{q}, q, u, t)$$

DONDE:

q	son las coordenadas	Ek	Energía cinética
$\dot{q}, \ddot{q}$	*son las derivadas*	Ep	Energía potencial
M	es la matriz de Inercia	Dn	función de disipación
C	es la matriz de Dispersión	Q	fuerzas conservativas
K	es la matriz de Rigidez	L	función de LaGrange
U	son las entradas		L = Ek - Ep
t	es el tiempo		
Θ	son las fuerzas aplicadas		

Una vez que tenemos la parte dinámica y la parte cinemática se aprocede a analizar los dos tipos básicos de aerogeneradores que nos podemos encontrar. Estos son el de Transmisión Directa o “Direct-Drive” (DD), y el de Transmisión con reductor o “Double Fed Inductor Generator” (DFIG). Es la parte más importante del cálculo mecánico y se explicará a continuación:

A.- TRANSMISIÓN DIRECTA (Direct-Drive).

En lo que respecta al primero (**<u>Transmisión Directa</u>**), podemos encontrar una serie de factores al realizar el análisis que explicamos a continuación:

Tr -> momento aerodinámico del rotor

Ir -> momento de inercia del rotor

Ko -> coeficiente rigidez

Bs -> coeficiente viscoso

Θr -> ángulo del rotor

Ωr = $\dot{\theta}r$ -> velocidad del rotor

Θg -> ángulo del generador

Ψ -> error de la desviación (ángulo)

β -> ángulo ataque de palas

f,U,Ø -> frecuencia, tensión y factor de potencia en el punto de conexión.

<u>1.1.- Coordenadas generalizadas.</u>

$$\mathrm{q} = [q_i] = \begin{pmatrix} y_t \\ \gamma \\ \theta_r \\ \theta_g \end{pmatrix}$$

<u>1.2.- Funciones y ecuaciones de energía y disipación.</u>

Energía cinética -> $E_k = \frac{m_1}{2} * \dot{y_t}^2 + \frac{m_2}{2} * (r_o * \dot{\gamma} + \dot{y}_t)^2 + \frac{I_r}{2} * \dot{\theta}_r^{\ 2} + \frac{I_g}{2} * \dot{\theta}_g^{\ 2}$

Energía potencial elástica -> $E_p = \frac{k_t}{2} * y_t^{\ 2} + \frac{NK_b}{2} * (r_b * \gamma)^2 + \frac{K_s}{2} * (\theta_r - \theta_g)^2$

Función de disipación -> $D_n = \frac{B_t}{2} * \dot{y_t}^2 + \frac{NB_b}{2} * (r_b * \dot{\gamma})^2 + \frac{B_g}{2} * (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_g)^2$

1.3.- Términos de la Ecuación de LaGrange

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dL}{d\dot{q}}\right) = \begin{pmatrix} \frac{dEk}{d\dot{y}_t} \\ \frac{dEk}{d\dot{\gamma}} \\ \frac{dEk}{d\dot{\theta}_r} \\ \frac{dEk}{d\dot{\theta}_g} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m1+m2 & m2*rb & 0 & 0 \\ m2*rb & m2*rb^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ir & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ig \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{y}_t \\ \ddot{\gamma} \\ \ddot{\theta}r \\ \ddot{\theta}g \end{pmatrix}$$

$$\boxed{M\ddot{q}}$$

$$\frac{dEp}{dqi} = \begin{pmatrix} \frac{dEp}{dy_t} \\ \frac{dEp}{d\gamma} \\ \frac{dEp}{d\theta_r} \\ \frac{dEp}{d\theta_g} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Kt & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Nkb*rb^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ks & -KS \\ 0 & 0 & -Ks & Ks \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} y_t \\ \gamma \\ \theta r \\ \theta g \end{pmatrix}$$

$$\boxed{Kq}$$

$$\frac{dDn}{d\dot{q}} = \begin{pmatrix} \frac{dDn}{d\dot{y}_t} \\ \frac{dDn}{d\dot{\gamma}} \\ \frac{dDn}{d\dot{\theta}_r} \\ \frac{dDn}{d\dot{\theta}_g} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Kt & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Nkb*rb^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Bs & -Bs \\ 0 & 0 & -Bs & Bs \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} y_t \\ \gamma \\ \theta r \\ \theta g \end{pmatrix}$$

$$\boxed{C\dot{q}}$$

$$Q = \begin{pmatrix} F_T \\ rp*F_T \\ T_r \\ -T_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ rp & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} F_T \\ T_r \\ T_g \end{pmatrix} = R*u$$

1.4.-Arreglo de la ecuación de movimiento

$$\ddot{q} = +M^{-1} * [\, -C * \dot{q} - K * q + R * u]$$

1.5.-Espacio de estados

-> Variables de estado

$$x = [\, y_t \;\; \gamma \;\; \theta r \;\; \theta g \;\; \dot{y}_t \;\; \dot{\gamma} \;\; \dot{\theta} r \;\; \dot{\theta} g \,]$$

-> Entradas

$$\dot{u} = \begin{bmatrix} F_T & T_r & T_g \end{bmatrix}^T$$

-> Salidas

$$y = [\; \dot{y}_t \;\; \dot{\gamma} \;\; \dot{\theta} r \;\; \dot{\theta} g \;\;]^T$$

En el espacio de estados:

$$\dot{x} = \begin{array}{|c|c|} \hline 0 \;\; 4x4 & I \;\; 4x4 \\ \hline -M^{-1}K \;\; 4x4 & -M^{-1}C \;\; 4x4 \\ \hline \end{array} * x + \begin{array}{|c|} \hline 0 \;\; 4x3 \\ \hline -M^{-1}R \;\; 4x3 \\ \hline \end{array} * u$$

$$y = \begin{array}{|c|c|} \hline 0 \;\; 4x4 & I \;\; 4x4 \\ \hline \end{array} * x$$

Siendo M^{-1}:

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m1} & \frac{-1}{m1 * rb} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{m2 * rb} & \frac{m1 + m2}{m1 * m2 * rb^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{rb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Ig} \end{pmatrix}$$

B.- TRANSMISION CON REDUCCIÓN (Double Fed Induction Generator).

Siguiendo unos pasos similares…

1.1.- Coordenadas generalizadas.

$$\mathrm{q} = [q_i] = \begin{matrix} y_t \\ \gamma \\ \theta_r \\ \theta_g \\ \theta_l \end{matrix}$$

1.2.- Funciones y ecuaciones de energía y disipación.

E. cinética-> $E_k = \frac{m_1}{2} * \dot{y_t}^2 + \frac{m_2}{2} * (r_o * \dot{\gamma} + \dot{y_t})^2 + \frac{I_r}{2} * \dot{\theta_r}^2 + \frac{I_g}{2} * \dot{\theta_g}^2 + \frac{I_\omega}{2} * \dot{\theta_l}^2$

E. potencial-> $E_p = \frac{k_t}{2} * y_t^2 + \frac{NK_b}{2} * (r_b * \gamma)^2 + \frac{K_l}{2} * (\theta_r - \theta_l)^2 + \frac{K_h}{2} * (Rt * \theta_r - \theta_g)^2$

F. Disipación-> $D_n = \frac{B_t}{2} * \dot{y_t}^2 + \frac{NB_b}{2} * (r_b * \dot{\gamma})^2 + \frac{B_l}{2} * (\dot{\theta_r} - \dot{\theta_l})^2 + \frac{B_h}{2} * (Rt * \dot{\theta_r} - \dot{\theta_g})^2$

1.3.- Términos de la Ecuación de LaGrange

$$\begin{pmatrix} m1+m2 & m2*rb & 0 & 0 & 0 \\ m2*rb & m2*rb^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ir & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ig & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_\omega \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{y}_t \\ \ddot{\gamma} \\ \ddot{\theta}r \\ \ddot{\theta}g \\ \ddot{\theta}r \end{pmatrix} = \boxed{\mathrm{M}\ddot{q}}$$

$$\begin{pmatrix} Kt & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Nkb*rb^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Kl & 0 & -Kl \\ 0 & 0 & 0 & Kh & -Kh*Rt \\ 0 & 0 & -Kl & -Kh*Rt & Kl+Kh*Rt^2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} y_t \\ \gamma \\ \theta r \\ \theta g \\ \theta l \end{pmatrix} = \boxed{Kq}$$

$$\begin{pmatrix} Bt & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & NBb*rb^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Bl & 0 & -Bl \\ 0 & 0 & 0 & Bh & -Bh \\ 0 & 0 & -Bl & -Bh*Rt & Bl+Bh*Rt^2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \dot{y}_t \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\theta}r \\ \dot{\theta}g \\ \dot{\theta}l \end{pmatrix} = \boxed{C\dot{q}}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ rp & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} F_T \\ T_r \\ T_g \end{pmatrix} = R * u$$

1.5.-Espacio de estados

-> Variables de estado

x = $[\, y_t \;\; \gamma \;\; \theta r \;\; \theta g \;\; \theta l \;\; \dot{y}_t \;\; \dot{\gamma} \;\; \dot{\theta} r \;\; \dot{\theta} g \;\; \dot{\theta} l \,]^T$

-> Entradas

$$u = \begin{bmatrix} F_T & T_r & T_g \end{bmatrix}^T$$

-> Salidas

y = $[\, \dot{y}_t \;\; \dot{\gamma} \;\; \dot{\theta} r \;\; \dot{\theta} g \;\; \dot{\theta} l]^T$

En el espacio de estados:

$$\dot{x} = \begin{array}{|c|c|} \hline 0 \;\; 5x5 & I \;\; 5x5 \\ \hline -M^{-1}K \;\; 5x5 & -M^{-1}C \;\; 5x5 \\ \hline \end{array} * x + \begin{array}{|c|} \hline 0 \;\; 5x3 \\ \hline -M^{-1}R \;\; 5x3 \\ \hline \end{array} * u$$

$$y = \begin{array}{|c|c|} \hline 0 \;\; 5x5 & I \;\; 5x5 \\ \hline \end{array} * x$$

Siendo M^{-1}:

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m1} & \frac{-1}{m1 * rb} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{m2 * rb} & \frac{m1 + m2}{m1 * m2 * rb^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{rb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Ig} \end{pmatrix}$$

2.1.3.- Matriz de Transferencia.

Teniendo el espacio de estados (A, B, C) calculamos la función de transferencia

$$G_{(s)} * U_{(s)} = [C * (sI - A)^{-1} - B] * u_{(s)}$$

Esta forma de resolución es válida para ambos casos (DD y DFIG). Por ello lo que vamos a hacer es realizar el análisis como si fuese nuestro caso de estudio, es decir, centrándonos en un aerogenerador de transmisión directa o DD.

Esto nos lleva a poder escribir las ecuaciones aerodinámicas de la siguiente forma.

$$\begin{pmatrix} F_{T(s)} \\ T_{r(s)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{F\Omega} & K_{Fv} & K_{F^{\beta}} \\ K_{T\Omega} & K_{Tv} & K_{T^{\beta}} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \Omega_{r(s)} \\ v_{1(s)} \\ \beta_{(s)} \end{pmatrix}$$

Para calcular la ganancia (K), utilizamos las curvas del parámetro C_T y C_p.

$$K_{F\Omega} = \frac{dF_T(t)}{d\Omega_r(t)}\bigg|_0 = \frac{1}{2} * \rho * \pi * rb^{\,2} * \frac{dC_T(t)}{d\Omega_r(t)}\bigg|_0 {v_{10}}^2$$

$$K_{Fv} = \frac{dF_T(t)}{d\mathrm{v}_1(t)}\bigg|_0 = \frac{1}{2} * \rho * \pi * rb^{\,2} * \left[\frac{dC_T}{d\mathrm{v}_1}\bigg| * {v_{10}}^2 + 2 * v_{10} * C_{ro} \right]$$

$$K_{F\beta} = \frac{dF_T(t)}{d\beta(t)}\bigg|_0 = \frac{1}{2} * \rho * \pi * rb^{\,2} * \frac{dC_T}{d\beta}\bigg|_0 {v_{10}}^2$$

$$K_{T\Omega} = \frac{dT_r(t)}{d\Omega_r(t)}\bigg|_0 = \frac{1}{2} * \rho * \pi * rb^{\,2} * \left(\frac{dC_T(t)}{d\Omega_r(t)}\bigg|_0 * \frac{1}{\Omega_{ro}} - C_{po} * \frac{1}{{\Omega_{ro}}^2} \right) * {v_{10}}^3$$

$$K_{Tv} = \frac{dT_r(t)}{d\mathrm{v}_1(t)}\bigg|_0 = \frac{1}{2} * \rho * \pi * rb^{\,2} * \frac{1}{\Omega_{ro}} * \left(\frac{dC_T}{d\mathrm{v}_1}\bigg|_0 * {v_{10}}^3 + 3 * {v_{10}}^2 * C_{po} \right)$$

$$K_{T\beta} = \frac{dT_r(t)}{d\beta(t)}\bigg|_0 = \frac{1}{2} * \rho * \pi * rb^{\,2} * \frac{1}{\Omega_{ro}} * \frac{dC_p}{d\beta}\bigg|_0 {v_{10}}^3$$

Una vez que tenemos esto, ahora lo que hacemos es combinar las marices con las de la parte mecánica y se obtiene la matriz de transferencia de un aerogenerador completa.

Por tanto, mezclando ambas ecuaciones obtenemos la función de transferencia de nuestro aerogenerador.

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_{t(s)} \\ \dot{\gamma}_{(s)} \\ \Omega_{r(s)} \\ \Omega_{g(s)} \\ \Omega_{l(s)} \end{pmatrix} = P_{(s)} * \begin{pmatrix} \beta_{d(s)} \\ T_{gd(s)} \end{pmatrix} + D_{(s)} * v_{1(s)}$$

Tenemos que tener en cuenta que las matrices P y D que podemos ver en la formula, como podemos ver a continuación, están formadas de todos los parámetros tanto mecánicos como aerodinámicos que podamos encontrar en nuestro aerogenerador.

Una vez que tenemos la función de transferencia total y genérica de nuestro propio aerogenerador pasamos a calcular el valor que más nos interesa, como es, la velocidad del rotor.

$$\Omega_r = \frac{1}{1 - \mu_{32(s)} * K_{T\Omega}} * \left\{ \mu_{32} * \left[K_{T\beta} * A_{\beta(s)} * \beta_{d(s)} + K_{Tv(s)} \right] + \mu_{33(s)} * A_{T(s)} * T_{gd(s)} \right\}$$

$$\Omega_r = F_1(s) * v_1(s) + F_2(s) * \beta_d(s) + F_3(s) * T_{gd}(s)$$

Siendo:

$$F_1(s) = \frac{K_{Tv} * n_{\mu 32}(s)}{dt_f(s)}$$

$$F_2(s) = \frac{K_{T\beta} * n_{\mu 32}(s) * A_{\beta}(s)}{dt_f(s)}$$

$$F_3(s) = \frac{A_T(s) * n_{\mu 33}(s)}{dt_f(s)}$$

Por último tenemos las ganancias en continua.

$$F_1(s) = \frac{\Omega_1(s)}{v_1(s)} = 0.16$$

$$F_2(s) = \frac{\Omega_1(s)}{\beta_d(s)} = 2.5$$

$$F_3(s) = \frac{\Omega_1(s)}{T_{gd}(s)} = 0.1$$

2.1.4.- Modelo eléctrico

El modelo eléctrico está compuesto por dos ecuaciones diferenciales básicas.

La primera de ellas es la relación entre la tensión en los terminales de la bobina y la corriente en ella

$$U = -R * I - \frac{dL(\theta)}{dt} * I - L(\theta) * \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

La segunda es la relación del par en el eje y la variación magnética.

$$T_g = \frac{1}{2} * I^T * \frac{dL(\theta)}{dt} * I \quad (2)$$

En ambas ecuaciones se ve reflejada la dinámica de cualquier máquina eléctrica.

Pero las inductancias (mutuas y propias) dependen del ángulo girando el eje(Θ), y este sufre una variación constante.

Para poder analizar correctamente estas ecuaciones lo proyectaremos en un estator (no rotacional o "abc") o en un rotor (rotacional o " dqo").

Aplicando la transformación de Park's:

$$\begin{pmatrix} A_d \\ A_q \\ A_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} A_a \\ A_b \\ A_c \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_a \\ A_b \\ A_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} A_d \\ A_q \\ A_o \end{pmatrix}$$

Donde:

A	puede ser corriente, tensión o flujo
abc	son fases de corriente alterna (AC) estator
dqo	son direcct-quadrature-zero (DC) rotor

SCIG (Squirrel Cage Induction Generator)

Debido a su simplicidad y a la superficie sustentadora de la pala apropiada, la maquina opera como en aerogenerador de velocidad constante

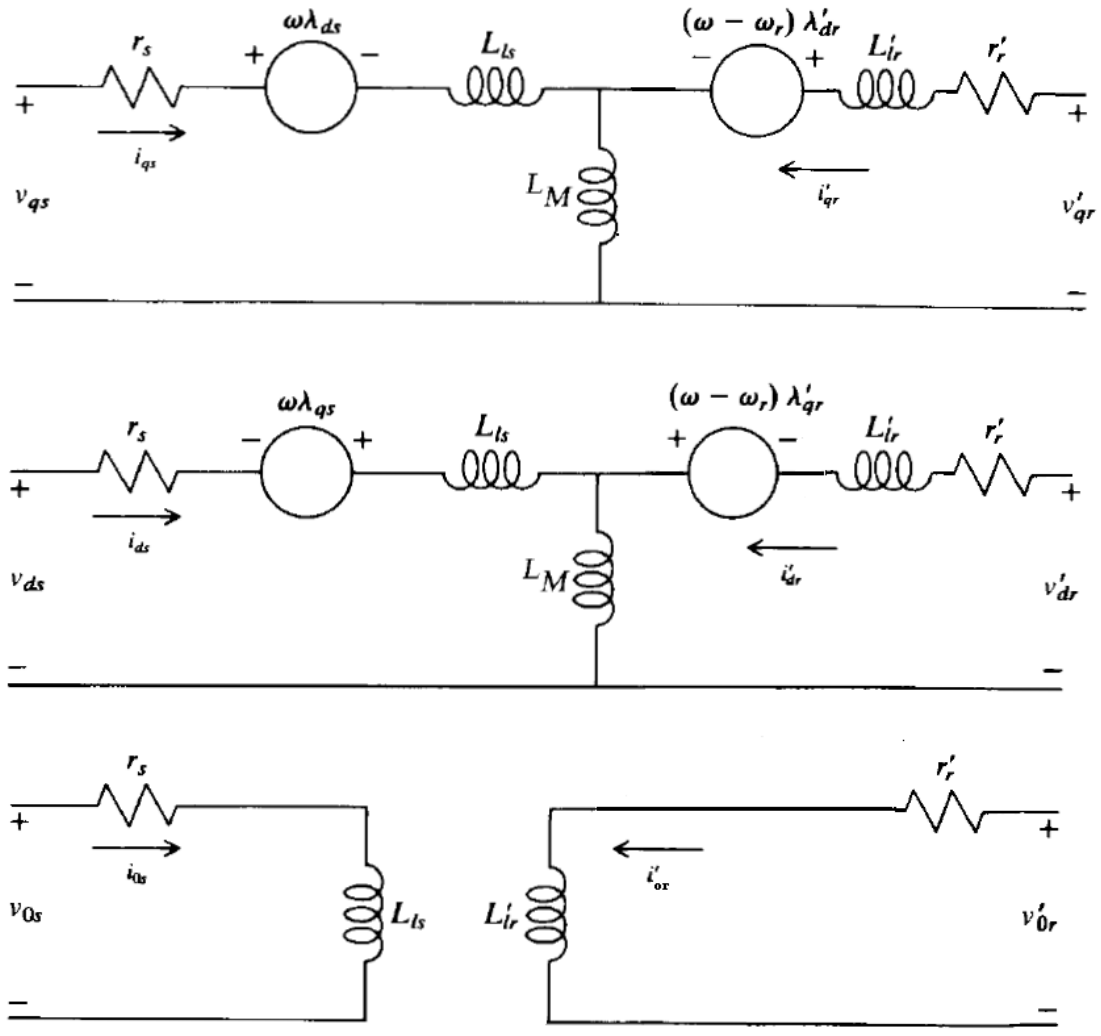
$$U_{ds} = -R_s * i_{ds} - \omega_s * \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt}$$

$$U_{qs} = -R_s * i_{qs} - \omega_s * \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt}$$

$$U_{dr} = -R_r * i_{dr} - \sigma * \omega_s * \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt}$$

$$U_{qr} = -R_r * i_{qr} - \sigma * \omega_s * \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt}$$

SCIG → circuitos equivalentes en dqo



Siendo:	Por otra parte:
s -> stator r -> rotor d -> direct axis q -> quadrature axis Rs -> Resistencia estator Rr -> Resistencia rotor ωs -> 2πf velocidad síncrona p -> número de polos f -> frecuencia Ωg -> velocidad del rotor σ -> deslizamiento	Uds/Uqs/Udr/Uqr -Valor de las tensiones del rotor y del estator ids/iqs/idr/iqr -Valores de intensidades del rotor y el estator φds/φqs/φdr/φqr -Valores de los flujos del rotor y el estator

Basándonos en los circuitos anteriores los flujos de unión quedarían:

$$\varphi_{ds} = -(Ls + Lm) * i_{ds} - Lm * i_{dr}$$
$$\varphi_{ds} = -(Ls + Lm) * i_{qs} - Lm * i_{qr}$$
$$\varphi_{dr} = -(Ls + Lm) * i_{dr} - Lm * i_{ds}$$
$$\varphi_{qr} = -(Ls + Lm) * i_{qr} - Lm * i_{qs}$$

Siendo el Par eléctrico:

$$T_g = (\varphi_{qr} * i_{dr} - \varphi_{dr} * i_{qr})$$

Quedando las potencias activa y reactiva:

$$P = U_{ds} * i_{ds} + U_{qs} * i_{qs}$$
$$Q = U_{qs} * i_{ds} - U_{ds} * i_{qs}$$

Ahora tenemos que describir el tipo de aerogenerador que vamos a utilizar. Ya que si cogemos el DD o el DFIG las ecuaciones que tendríamos serian distintas.

$$U_{os} = -R_s * i_{os} + \frac{d\varphi_{os}}{dt}$$

$$U_{ds} = -R_s * i_{ds} - \Omega_g * \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt}$$

$$U_{qs} = -R_s * i_{qs} - \Omega_g * \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt}$$

$$U_{fd} = -R_{fd} * i_{fd} + \frac{d\varphi_{fd}}{dt}$$

Siendo fd → field quantities

Ecuaciones de unión de Flujos

$$\varphi_{os} = -L_o * i_{os}$$

$$\varphi_{ds} = -L_d * i_{ds} + K * M_f * i_{ds} \Rightarrow \varphi_{ds} = -L_d * i_{ds} + \varphi_{pm}(mag.rotor)$$

$$\varphi_{qs} = -L_q * i_{qs}$$

$$\varphi_{fd} = -L_{fd} * i_{fd}$$

Lo=Ls - 2*Ms

Ld=Ls + 2*Ms + (3/2)*Lm

Lq=Ls + 2*Ms - (3/2)*Lm

Tenemos también la ecuación del par eléctrico.

$$T_g = \left(\frac{P}{2}\right) * (\varphi_s * i_{qs} - \varphi_{qs} * i_{ds})$$

Sabiendo que Tg es una de las variables de control.

-Potencia activa

$$P = U_{os} * i_{os} + U_{ds} * i_{ds} + U_{qs} * i_{dq}$$

-Potencia reactiva entre generador y convertidor.

$$Q_{qc} = U_{qs} * i_{ds} - U_{ds} * i_{qs}$$

-Potencia reactiva entre convertidor y circuito.

$$Q_{cgr} = U_{qc} * i_{dc} - U_{dc} * i_{qc} \qquad c \rightarrow convertidor$$

2.2.- Diagramas de bode

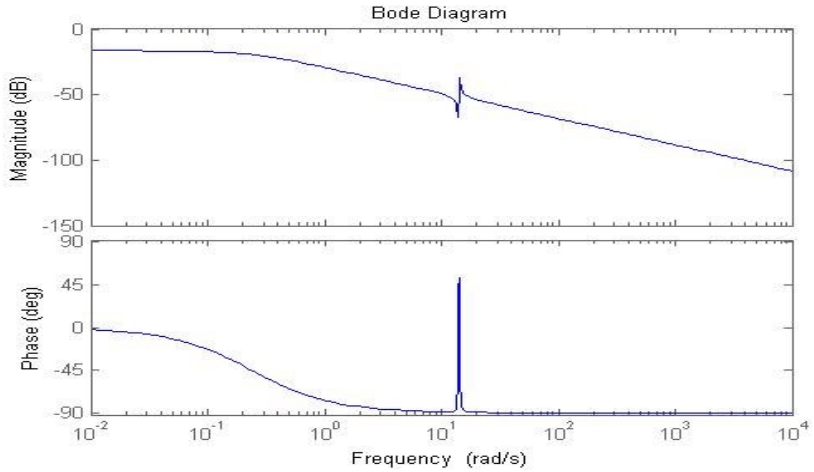
En este apartado se refleja la función de transferencia que habíamos conseguido antes, que representa a el modelo aerodinámico y eléctrico en un diagrama de bloques, para poder visualizar posteriormente, con ayuda de Matlab, el diagrama de bode o comportamiento de dicho modelo.

Partiremos de las ecuaciones básicas que explicamos con anterioridad.

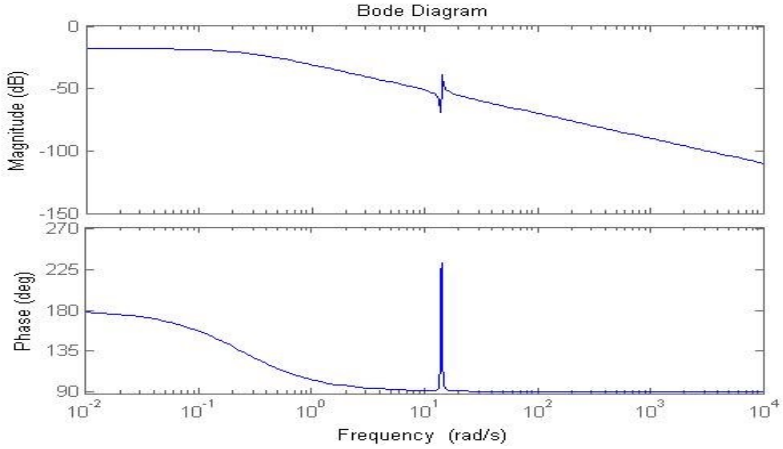
$$\Omega_r = F_1(s) * v_1(s) + F_2(s) * \beta_d(s) + F_3(s) * T_{gd}(s)$$

Siendo:

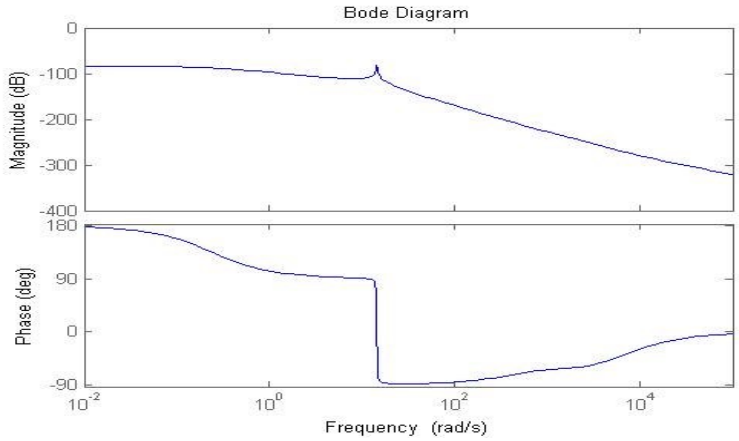
$$F_1(s) = \frac{K_{Tv} * n_{\mu 32}(s)}{dt_f(s)}$$



$$F_2(s) = \frac{K_{T\beta} * n_{\mu 32}(s) * A_\beta(s)}{dt_f(s)}$$

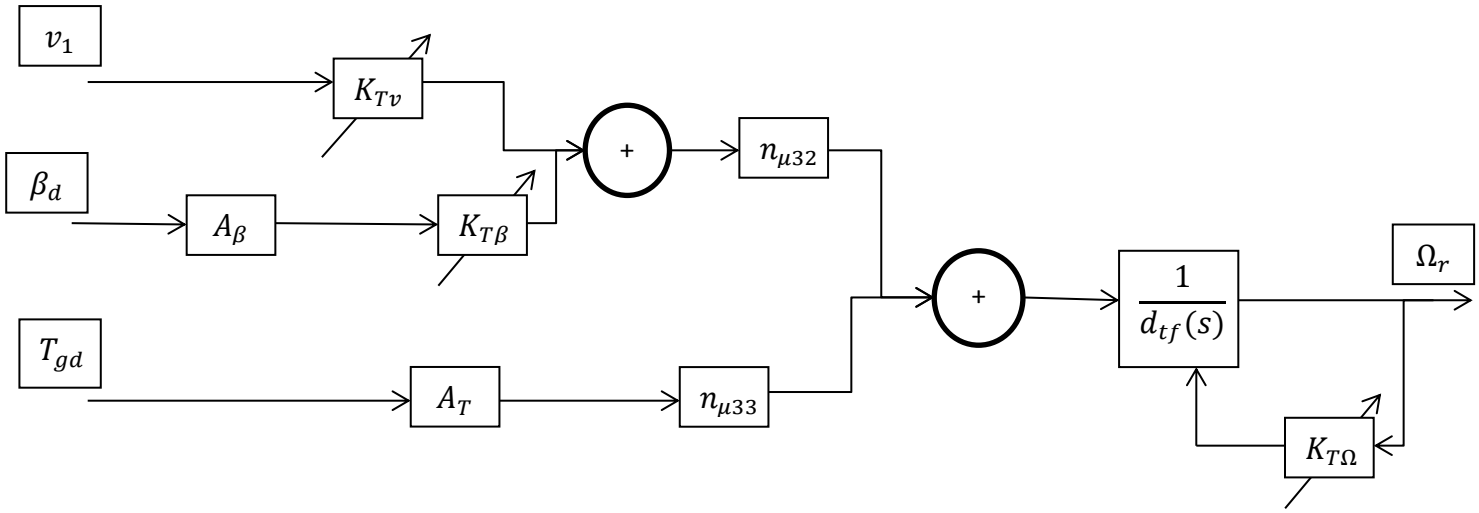


$$F_3(s) = \frac{A_T(s) * n_{\mu 33}(s)}{dt_f(s)}$$

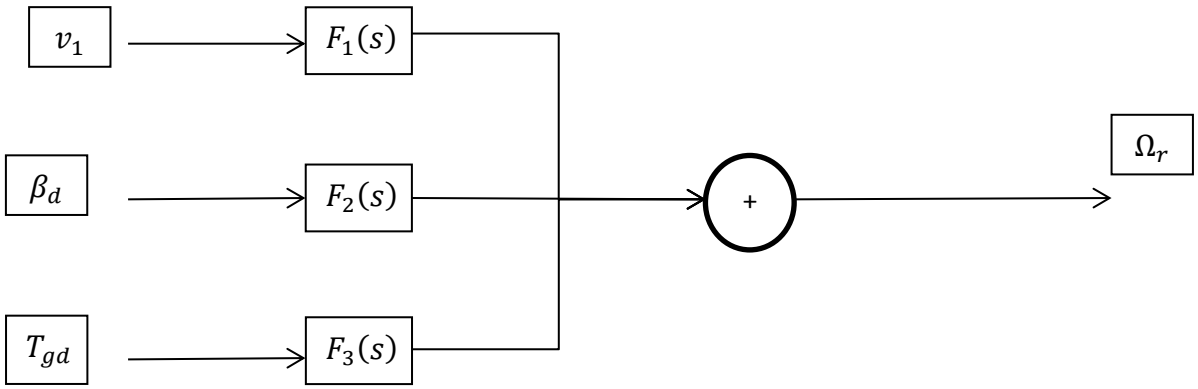


Y por tanto queda:

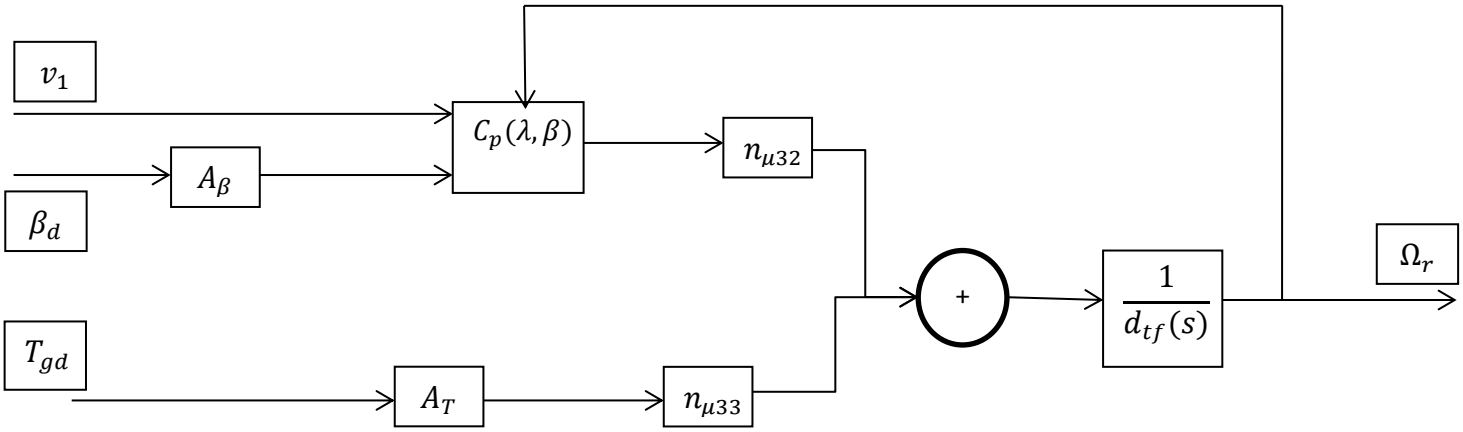
$$\Omega_r = \frac{1}{dt_f} * \left[n_{\mu 32} * \left(K_{Tv} * v_1 + K_{T\beta} * \beta_d * A_\beta \right) + n_{\mu 33} \left[A_T * T_{gd} \right] \right]$$



También lo podemos representar de la siguiente forma (o modelo reducido).



Por último existe una última forma de dibujar el diagrama de bloques que describe nuestro aerogenerador. Lo que hacemos es considerar que, como ya hemos dicho con anterioridad, las “K” son variables con el tiempo. Esto nos lleva a describir el diagrama de bloques de esta última manera.



3.- CONTROL

3.1.-CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A CONTROLAR.

En este proyecto, como ya dijimos se va a tener que controlar el ángulo de inclinación de la pala o "Pitch". Para ello tendremos como entrada la velocidad de giro de nuestro aerogenerador y teniendo como salida el giro de nuestra maquina eléctrica de la que obtenemos tanto una potencia activa como reactiva en la red.

A la vez tenemos como perturbaciones al viento. El propio viento actúa como perturbación debido a que se encuentra en continuo cambio. Podemos tener mayor o menor intensidad de viento en breves periodos de tiempo y por tanto hay que considerarlo perturbación.

3.2.-TÉCNICAS DE CONTROL

En lo que respecta a las técnicas de control que existen. Podemos encontrar gran variedad en técnicas de control de las cuales podemos nombrar algunas como un PID, un tipo de controlador fuzzy (o borroso), control mediante redes neuronales, control de QFT,…. Existen muchas más técnicas de control que podrían ser utilizadas, pero la que hemos decidido utilizar en este caso es la técnica del QFT.

Realmente, en lugar del QFT original, utilizaremos la herramienta de Matlab QFTCT; que es la toolbox (o herramienta) de control utilizada especialmente para este tipo de casos. Para saber cómo funciona esta herramienta será necesario leer y entender, tanto la herramienta QFT, como la QFTCT propiamente dicha.

3.3.- DEFINICIÓN DE QFT

Para el control de nuestro ángulo de inclinación de las palas se utilizará la herramienta diseñada para el propio Matlab llamada QFTCT (Teoría de Regeneración Cuantitativa: Herramienta de control). En esta herramienta se podrán observar las diferentes graficas que se necesitan.

Dichas gráficas, como podremos observar, tienen una forma peculiar. En ellas se pueden ver una superposición de gráficas casi idénticas que representan, como había descrito con anterioridad, el propio modelo considerando las variaciones de algunos de sus datos para distintos valores de frecuencias. Este sistema o herramienta es muy útil porque

también considera los errores que se hayan podido cometer en los cálculos anteriores, pudiendo así, darnos una descripción grafica mucho más precisa de lo que podríamos obtener utilizando solo Matlab básico y la ecuación del modelo.

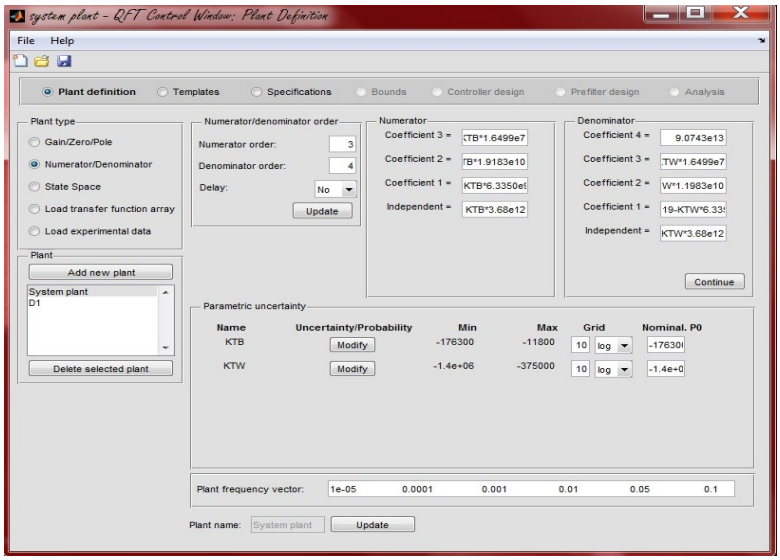
La metodología QFT es cuantitativa en este sentido, pues permite diseñar un controlador para la cantidad exacta de incertidumbre estimada para la planta, para un conjunto de perturbaciones determinado, y para unas especificaciones requeridas. Además, una de las propiedades más atractivas de QFT es el hecho de que permite diseñar los compensadores con gran flexibilidad, teniendo un alto grado de control en el ajuste del ancho de banda de los mismos, comparado con otras técnicas que asumen estructuras especiales para la incertidumbre presente en la planta, especificaciones y perturbaciones.

3.4.-DISEÑO DEL CONTROLADOR

Una vez que tenemos los diagramas de bloques que hemos representado con anterioridad, lo primero que vamos a hacer es introducir los datos en las ecuaciones del modelo. Una vez tenemos los datos debidamente introducidos procederemos a introducir los valores de la ecuación de transferencia en el QFTCT.

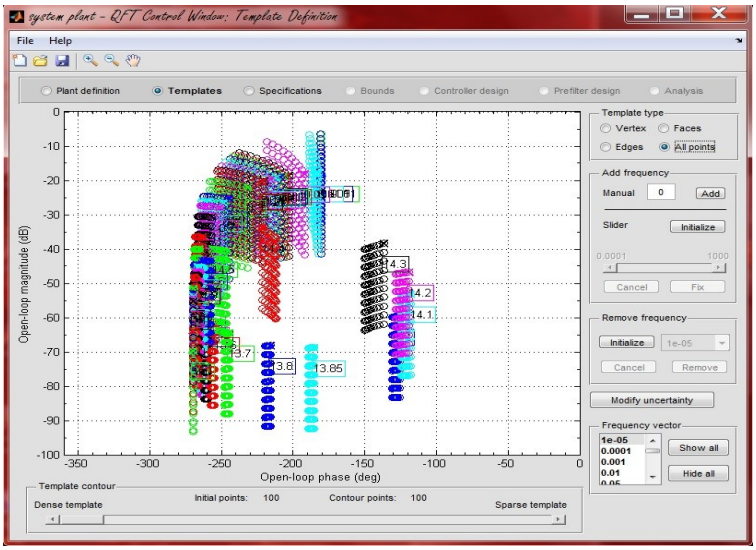
En primer lugar lo que realizaremos será definir nuestra función en la herramienta QFTCT (es una variante de QFT diseñada específicamente para temas de aerogeneradores).

Una vez arranca la pantalla de la herramienta definimos la distribución de la planta o “Plant Distrubution”. Utilizando los valores obtenidos de la función de transferencia y los que teníamos como constantes del aerogenerador.



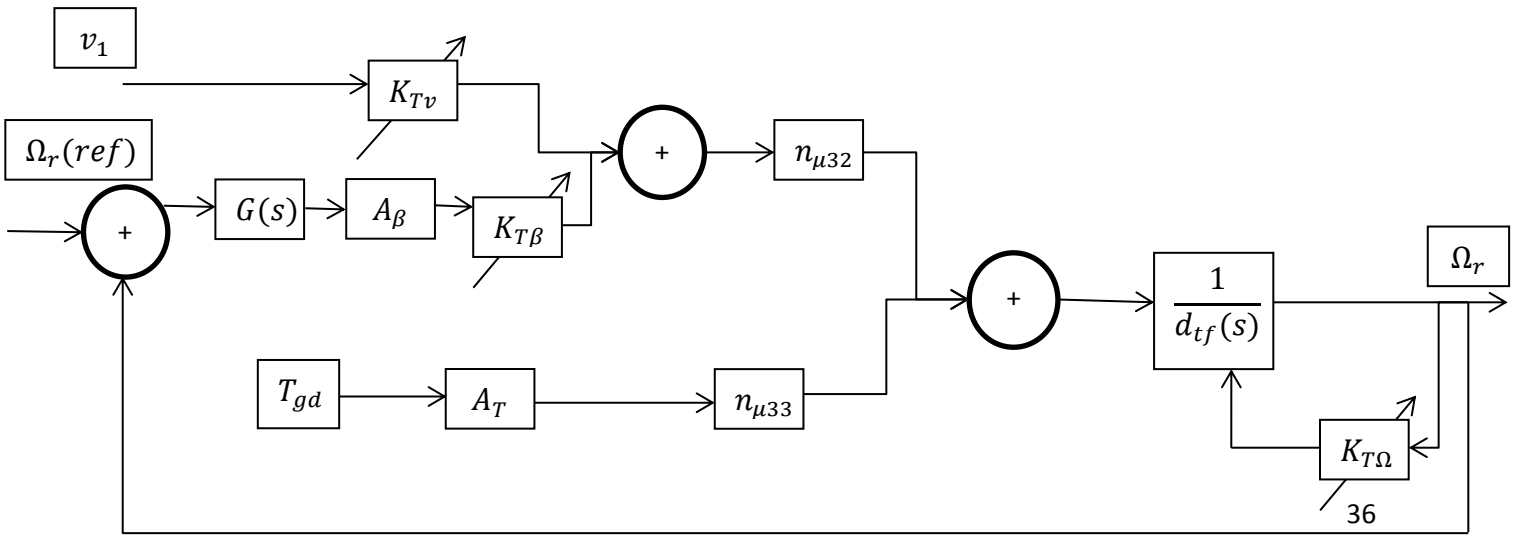
Uno de los factores más importantes en el diseño de control debe usar una descripción exacta para la dinámica de planta. Como QFT implica la aritmética de dominio de frecuencia, su procedimiento de diseño requiere que se defina la dinámica de planta sólo en términos de la respuesta frecuencial.

La plantilla de término (templates) está usada para denotar la colección de las respuestas frecuenciales de una planta incierta en una frecuencia dada. El empleo de plantillas le libera de la necesidad de tener cualquier representación de modelo de planta particular. En QFT, usted puede usar medidas de respuesta frecuencial obtenidas de experimentos para describir la dinámica.

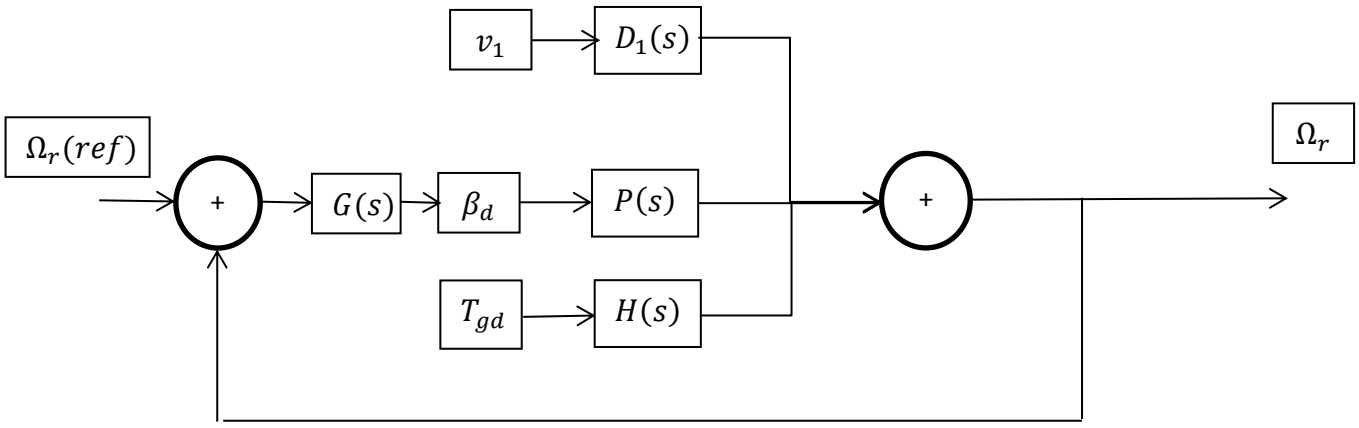


En esta gráfica podemos ver la plantilla de término correspondiente a la P(s) de nuestro modelo para una serie de frecuencias que habíamos incluido en el vector de frecuencias.

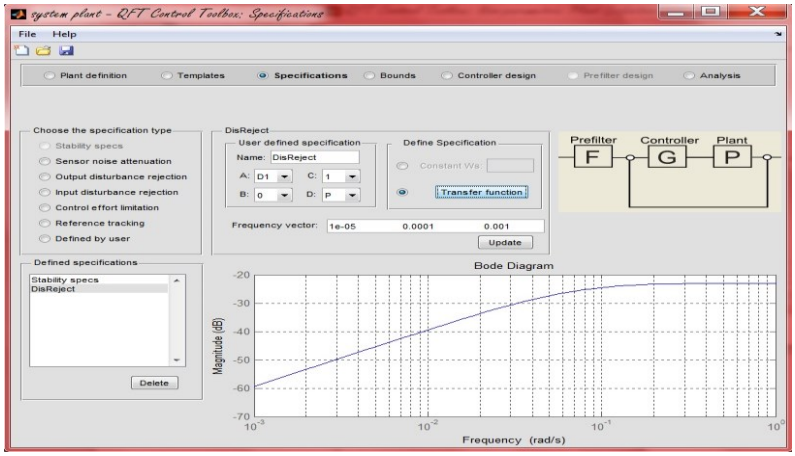
Por ultimo veremos el diagrama de bode que existe en la relación entre la $\Omega_r(ref)$ y la Ω_r. Para verlo primero necesitaremos ver el diagrama de bloques que lo describe.



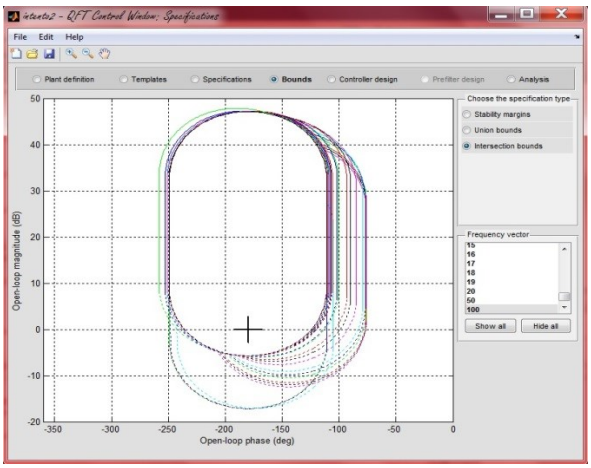
O también lo podemos poner de la siguiente manera.



Obteniendo la siguiente gráfica.



Posteriormente vamos a la ventana de los límites. La ventana de límites muestra los límites de QFT de cada especificación definida en la ventana de Especificación, así como la unión de todos los límites y la intersección de todos los límites.

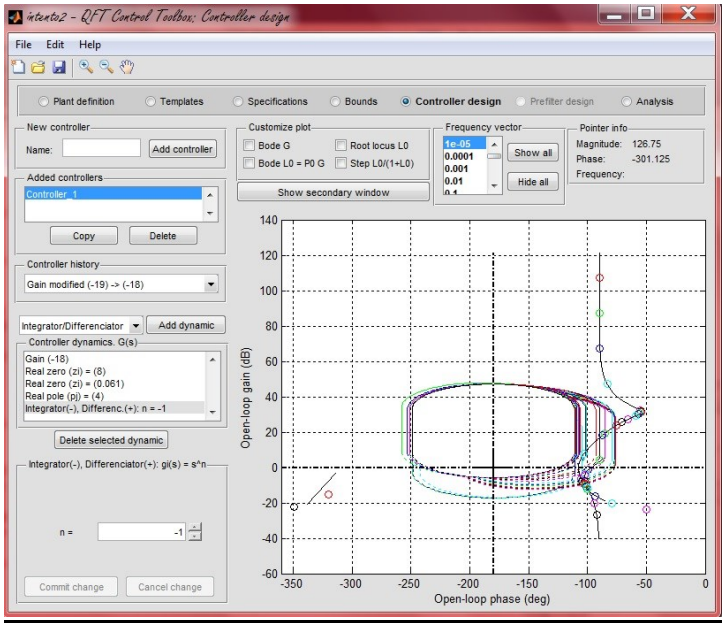


Una vez que tenemos los límites pasamos a visualizar la gráfica de los propios límites con el controlador.

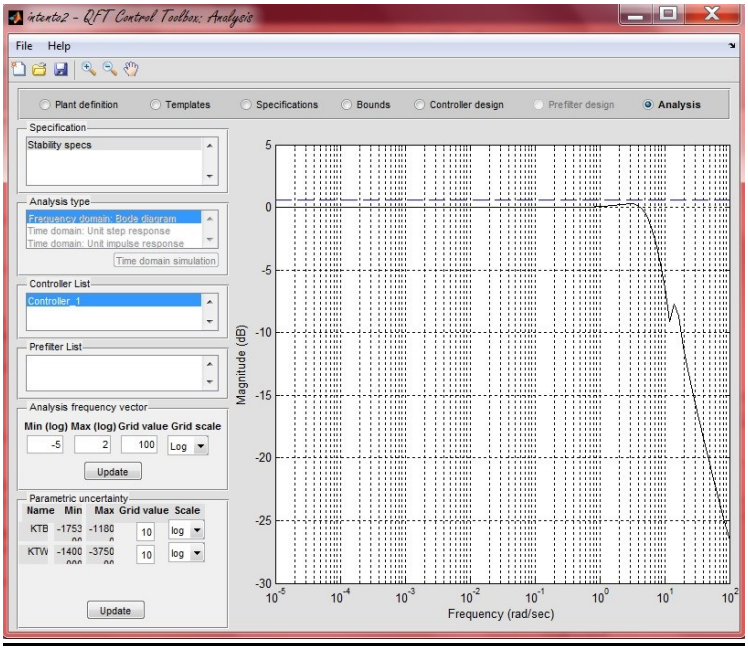
$$L_o(s) = P_o(s) * G(s)$$

Siendo:

$$G(s) = \frac{-18\left(\left(\frac{s}{8}\right)+1\right)*\left(\left(\frac{s}{0.061}\right)+1\right)}{s\left(\left(\frac{s}{4}\right)+1\right)}$$

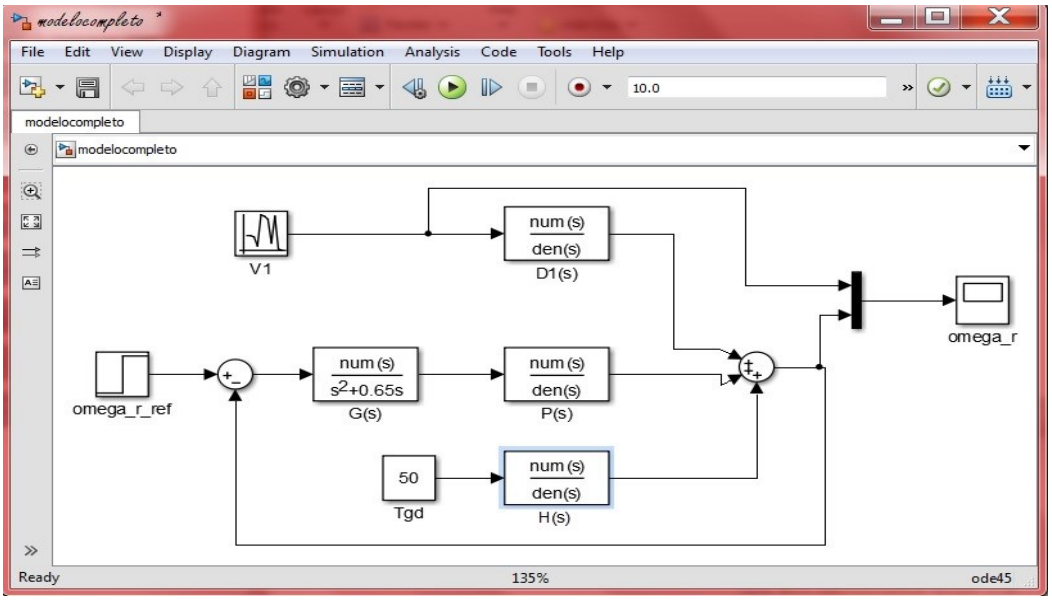


Por ultimo realizamos la validación de la estabilidad en el dominio de la frecuencia obteniendo el siguiente resultado.



3.5.- PRUEBAS, COMPROBACIONES Y RESULTADOS.

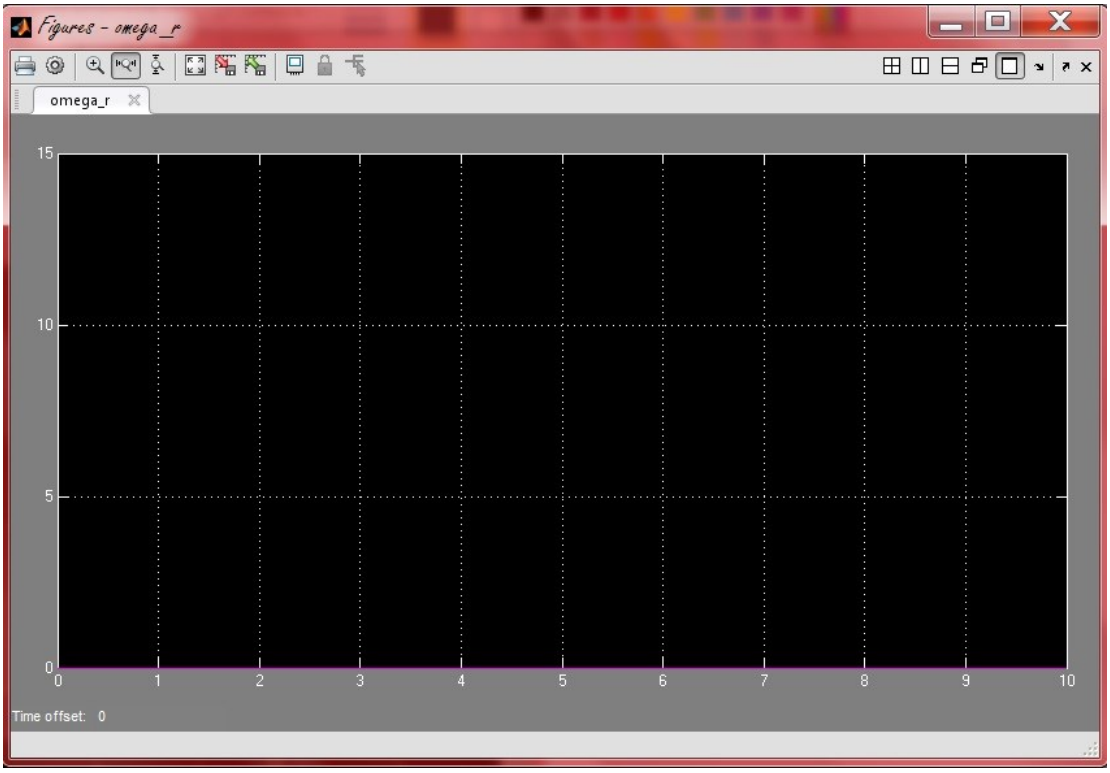
En lo que respecta a la comprobación de las formulas obtenidas en los apartados anteriores, lo que hemos realizado ha sido un diagrama de bloques en simulink (herramienta de Matlab). Con esta herramienta que nos proporciona el programa hemos llegado a dibujar el esquema que corresponde al modelo completo con sus perturbaciones correspondientes quedando:



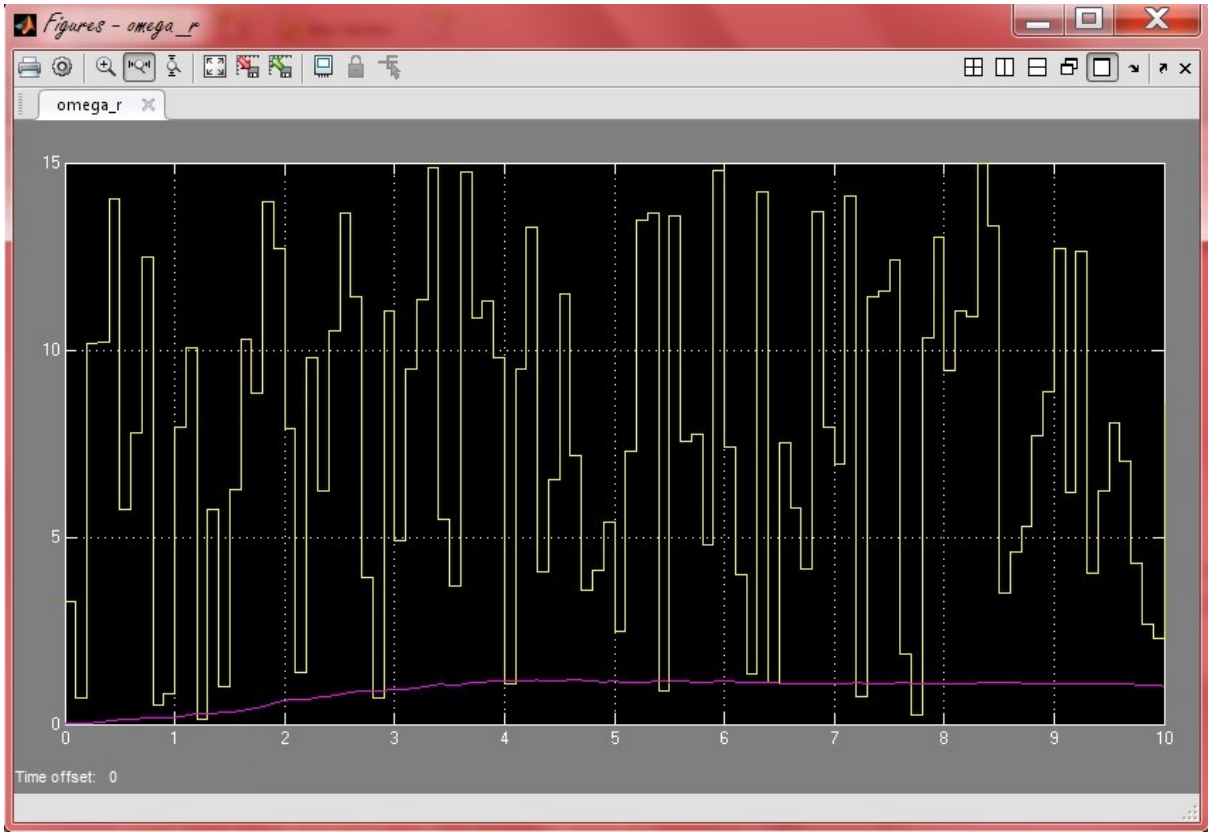
Con este diagrama de bloques hemos realizado varias pruebas para ver cómo se comportaría la velocidad del rotor, independientemente de la intensidad del viento que tengamos en cada momento. Con ello hemos podido ver como esta velocidad del rotor se estabiliza gracias al controlador que habíamos calculado he introducido.

En las gráficas siguientes describiremos los parámetros utilizados en cada caso, ya sean las variables "K" que puede tomar nuestro sistema, como el viento que se introduce en cada caso como perturbación (corresponde con la gráfica amarilla). Con ello obtendremos la gráfica morada que es el valor obtenido de velocidad del rotor.

En primer lugar comenzaremos con un viento nulo. En este caso, a pesar de querer obtener una rotación determinada en el rotor, el valor que deberíamos obtener será de 0. Está primera simulación se realiza con unos valores de `Ktb_min =-17.53e4, Kto_min =-14e5 y Ktv_min=2.12e5.`



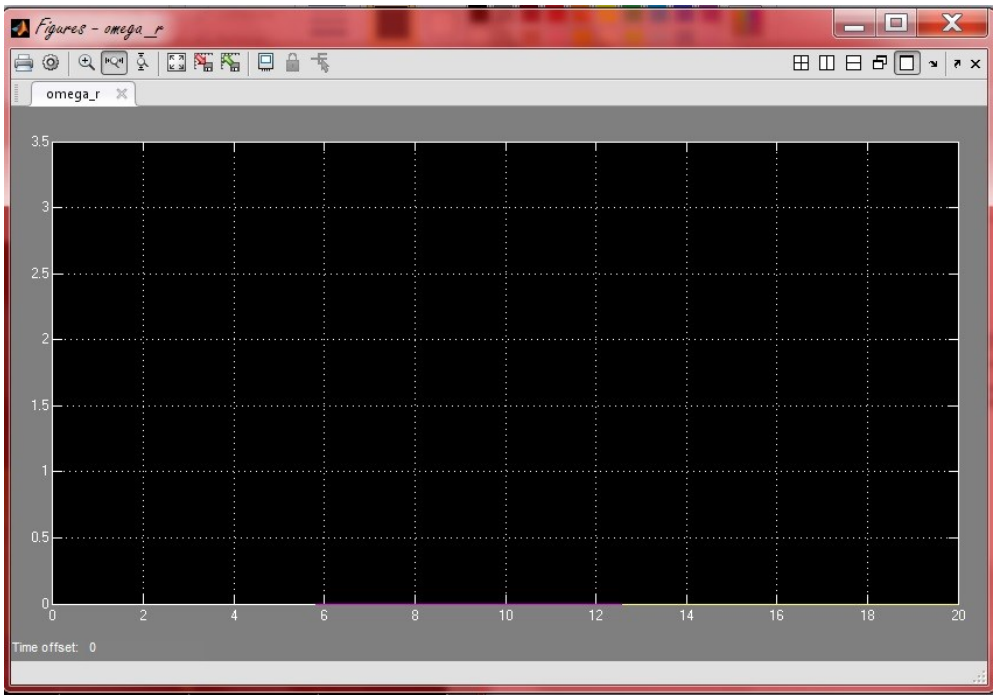
Como habíamos dicho, el valor del rotor es nulo. A continuación tenemos la misma simulación, pero con un valor de viento variable y las mismas “K” que antes.



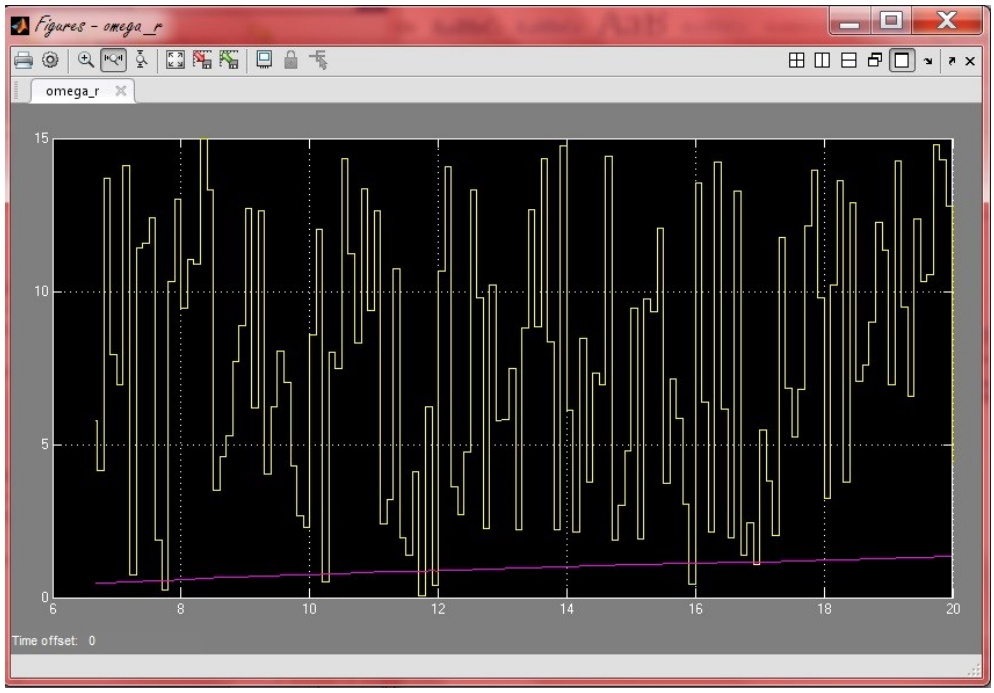
Podemos ver como la gráfica morada tiende al escalón a pesar de las perturbaciones.

Ahora vamos a comprobar los mismos casos de antes pero para unos valores de “K” diferentes: `Ktb_max=-1.18e4, Kto_max=-3.75e3 y Ktv_max=2.61e4.`

Para el caso de viento=0.



Y para el caso de que si exista viento.

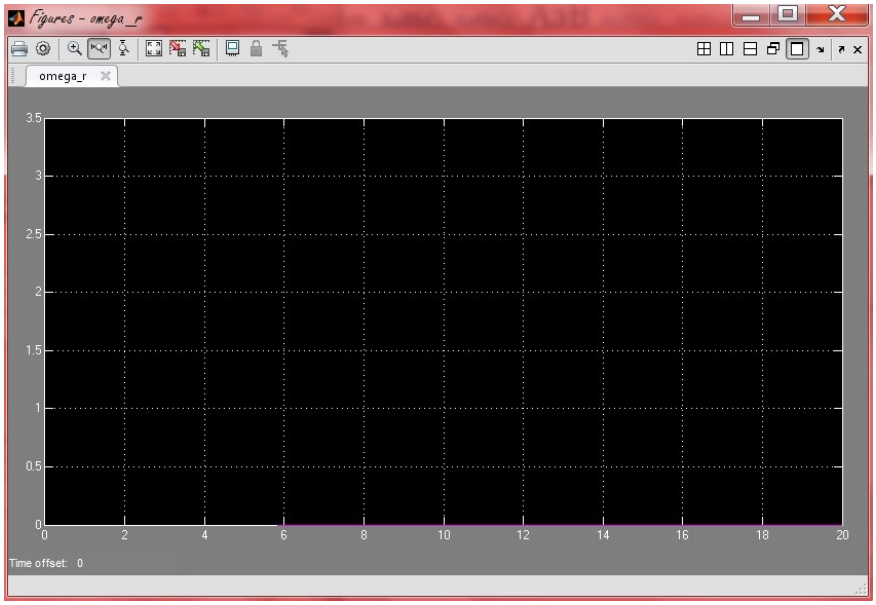


Podemos ver que a pesar de variar los valores o parametros que pueden cambiar en nuestro sistema, al final llegamos a unos resultados similares que en el caso anterior.

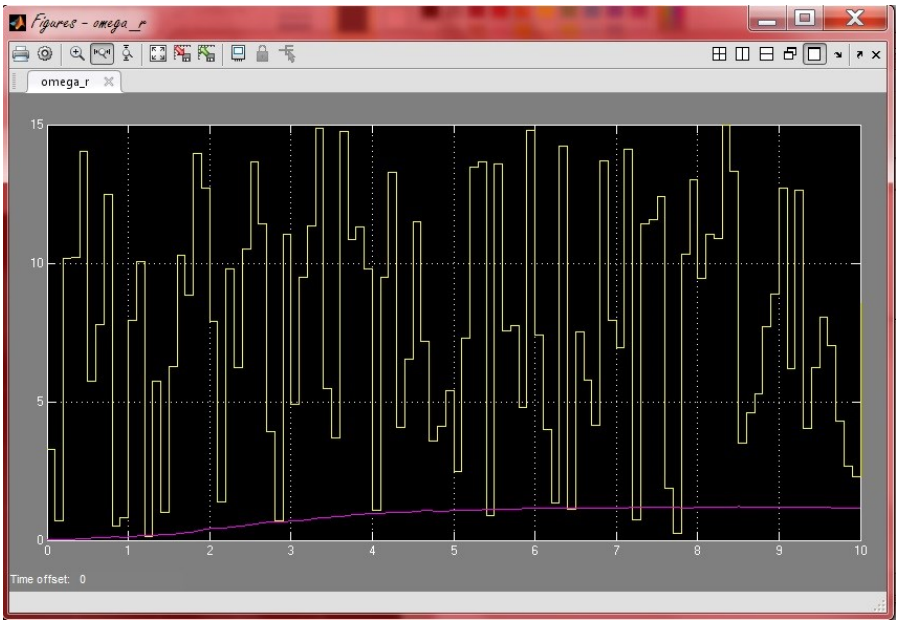
Por ultimo vamos a coger unos valores de “K” intermedios que no sean ni el máximo ni el mínimo: Ktb = -93550, Kto = -701875 y Ktv = 119050.

Para los mismo casos de v=0 y de v=variable.

V=0



V=variable



Como podemos observar al comparar las imágenes con diferentes valores en las “K”, las gráficas obtenidas en los diferentes casos son diferentes, pero en todas ellas se consigue que el controlador realice su trabajo.

4.- ANEXO I - DEDUCCIONES DE FUNCIONES

Esta parte de la memoria de nuestro proyecto se va a basar en explicar un par de demostraciones que no están desarrolladas, realizadas para solucionar o llegar a las soluciones necesarias para la realización de nuestro proyecto.

No existe la necesidad de mucha demostración matemática, pero voy a explicar a continuación las que creo son más significativas.

La primera de ellas es una sencilla pero que creo que puede ser necesaria:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \longrightarrow \quad Pr = \frac{1}{2} * \dot{m} * (v_1^2 - v_2^2)$$

$$Pr = \frac{1}{2} * \rho * A * v_1^3 - \frac{1}{2} * \rho * A * v_2^3$$

Sabiendo que:

$$\dot{m} = \rho * v * A$$

Obtenemos:

$$Pr = \frac{1}{2} * \dot{m} * (v_1^2 - v_2^2)$$

La segunda explicación es algo más compleja. Se trata de una explicación a la hora del cálculo del Cp.

$$C_p = \frac{P}{P_o} = 4 * a * (1-a)^2 \quad \text{siendo} \quad a = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{v2}{v1}\right)$$

$$4 * a * (1-a)^2 = 4 * \frac{1}{2}\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) * \left[1 - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)\right]^2 =$$

$$= \frac{1}{2}\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) * \left[4 - 4 * \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) + \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)^2\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) * \left[1 + 2 * \frac{v_2}{v_1} + \frac{v_2^2}{v_1^2}\right] =$$

$$= \left(\frac{1}{2}\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) * \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)^2\right)$$

Por otra parte:

$$C_p = \frac{P}{P_o} = \frac{1}{2} * \frac{({v_1}^2 - {v_2}^2) * (v_1 + v_1)}{{v_1}^3} =$$

$$= \frac{1}{2}\left(1 - \frac{{v_2}^2}{{v_1}^2}\right) * \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) =$$

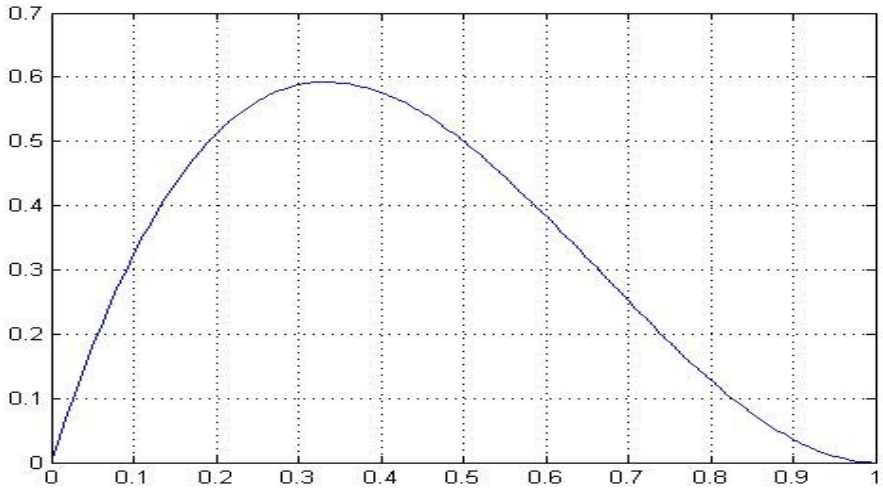
$$= \frac{1}{2} * \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) * \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) * \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) = \left[\frac{1}{2}\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) * \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)^2\right]$$

5.- ANEXO II – CÓDIGO MATLAB

A lo largo del proyecto hemos utilizado en numerosas ocasiones el programa Matlab como hemos dicho con anterioridad. Considero importante reflejar algunas de las líneas de código más relevantes.

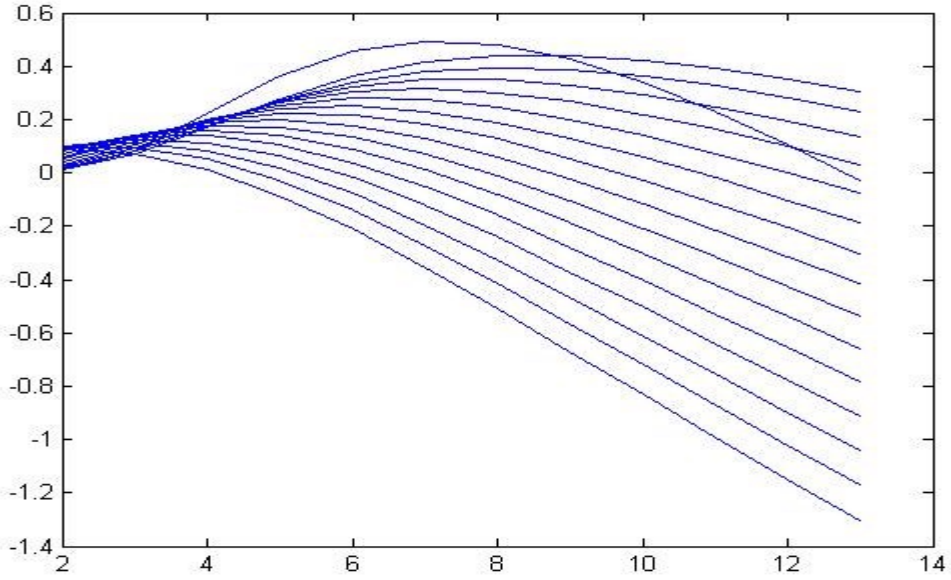
1.-Gráfica Cp:

```
%%%% AERODINAMICA GRAFICA CP
Cp=[];
a=0:.01:1;
Cp=4.*a.*(1-a).^2;
plot(a,Cp)
grid on
```



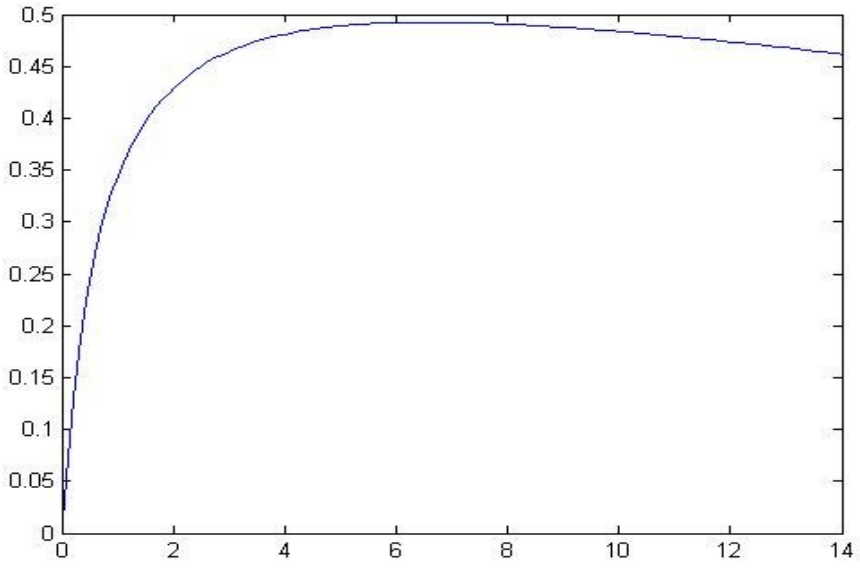
2.- Gráfica Cp (λ,β)

```
%%%% AERODINAMICA   CP_lambda_beta

c1=0.39;
c2=116;
c3=0.4;
c4=5;
c5=16.5;
c6=0.089;
c7=0.035;

l=2:1:13;

for b=0:2:30
    li=(1./(l+c6*b)-c7/(b^3+1)).^-1;
Cp_lb=c1.*((c2./li)-c3*b-c4).*exp(-c5./li);
plot(l,Cp_lb)
hold on
      end
```



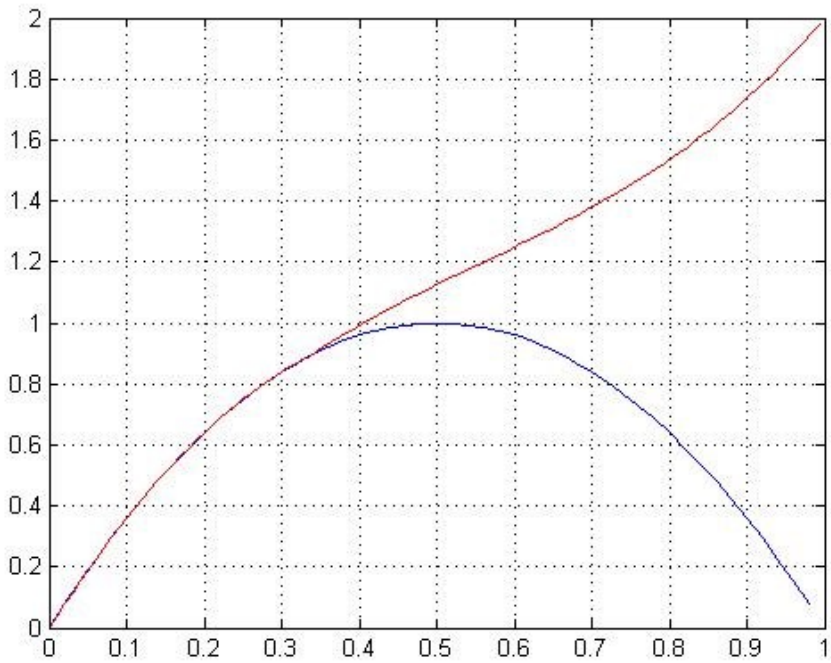
3.- Gráfica Cp (max):

```
%%%%%%% AERODINAMICA CPmax----lambda

N=input('Numero de palas')
l=0:.1:14;
Cld=76; %%%% CL / CD

Cpmax=(0.593.*l)./(l+(1.32+((l-8)./20).^2)./(N^(2/3)))-
(0.57.*(l.^2))./(Cld*(1+(1/(2*N))));

Cpmax=(0.593*l./(l+((1.32+((l-8)/20).^2)/N^(2/3))))-
(0.57*l.^2)./(Cld*(l+1/(2*N)));
%%%% LIBRO
plot(l,Cpmax)
```



4.- Gráfica Ct:

```
%%%%% CT General
Cp=[];
a=0:.02:1;
Cp=4.*a.*(1-a).^2;
Ct=[];

Ct=Cp./(1-a);

plot(a,Ct)

grid on
hold on

F1=1;

%%%% AERODINAMICA CT   a<0.33
Ct=[];
Cp=[];
a=0:.01:(1/3);
Cp=4.*a.*(1-a).^2;
Ct=Cp./(1-a)*F1;

plot(a,Ct,'r')


%%%% AERODINAMICA CT   a>0.33
Ct=[];
Cp=[];
a=(1/3):.01:1;

Ct=4.*a.*(1-(1/4).*(5-3.*a).*a)*F1;
plot(a,Ct,'r')
```



5.- Modelo 1 :

```
%%%%%% MODELO DEL AEROGENERADOR   (DD WT)
clc,clear all
%%%% Omega R   respecto   v1    beta D     Tgd

%%%% VALORES
MW=2.0;
ro=1.225; %air (kg/m3)
N=3;
omegaR_NOM=1.8850; % (rad/s)
Tgd_max=14000; % (Nm) shaft high speed
Rt=83.33; % gearbox ratio
Ir=5.5e6; %(Kg*m2) shaft low speed
Ktb_min=-17.53e4; % (Nm/deg)
Kto_min=-14e5; %(Nm/(rad/s))
Ktv_min=2.12e5; %(Nm/(m/s))
Ab=tf(1,1); % seg
rb=40.0; % blade radius (m)
Kl=160e6; %shaft los speed (Nm)
Bl=25000; %shaft high speed (Nms)
Kh=2.3e4; %shaft hisgh speed (Nm)
Bh=36;  %shaft hisgh speed (Nms)
Ig=60; %shaft hisgh speed (Kg*m2)
Iw=0.0;%shaft hisgh speed (Kg*m2)
Ktb_max=-1.18e4; % (Nm/deg)
Kto_max=-3.75e3; %(Nm/(rad/s))
Ktv_max=2.61e4;%(Nm/(m/s))
At=tf(1,1); %seg

Ktb=Ktb_min
Kto=Kto_min
Ktv=Ktv_min

set(cstprefs.tbxprefs,'FrequencyUnits','rad/s')
format long

nmu32=tf([Ig*Iw  Bh*Iw+Ig*Bl+Ig*Bh*Rt^2  Bh*Bl+Ig*Kl+Ig*Kh*Rt^2+Kh*Iw
Kh*Bl+Bh*Kl    Kh*Kl],1),

nmu33=tf([-Bh*Rt*Bl    -Rt*(Kh*Bl+Bh*Kl)   -Kh*Rt*Kl],1),

dtf=tf([Ir*Iw*Ig  (Ir*Ig*Bl+Bh*Ir*Iw+Ir*Ig*Bh*Rt^2+Bl*Iw*Ig)-(Ig*Iw)*Kto
(Kl*Iw*Ig+Bh*Ir*Bl+Bl*Ig*Bh*Rt^2+Kh*Ir*Iw...
    +Ir*Ig*Kl+Bl*Bh*Iw+Ir*Ig*Kh*Rt^2)-(Bh*Iw+Ig*Bl+Ig*Bh*Rt^2)*Kto
(Bl*Kh*Iw+Kl*Ig*Bh*Rt^2+Kh*Ir*Bl+Bh*Ir*Kl+Kl*Bh*Iw+Ig*Bl*Kh*Rt^2)-
(Bh*Bl+Ig*Kl+Ig*Kh*Rt^2+Kh*Iw)*Kto...
    (Ig*Kl*Kh*Rt^2+Kh*Ir*Kl+Kl*Kh*Iw)-(Kh*Bl+Bh*Kl)*Kto    -Kh*Kl*Kto],1),
%%% Faltan de poner la Kto

F1=minreal((Ktv*nmu32)/dtf);
F2=minreal((Ktb*nmu32*Ab)/dtf);
F3=minreal((nmu33*At)/dtf);
D1=F1,
P=F2,
H=F3,
Gs=tf([-18.6 -34.41    -3.255  ],[1  0.65  0]);
Tgd=5;
```

```
      RESULTADOS:

Ktb =
     -175300

Kto =
    -1400000

Ktv =
      212000

nmu32 =

  1.65e07 s^3 + 1.918e10 s^2 + 6.335e09 s + 3.68e12

Continuous-time transfer function.


nmu33 =

  -7.5e07 s^2 - 5.279e11 s - 3.067e14

Continuous-time transfer function.


dtf =

  9.074e13 s^4 + 1.055e17 s^3 + 6.434e16 s^2

                                + 2.178e19 s + 5.152e18


Continuous-time transfer function.


D1 =

     0.03855 s^3 + 44.82 s^2 + 14.8 s + 8597
  ------------------------------------------------
  s^4 + 1163 s^3 + 709 s^2 + 2.4e05 s + 5.678e04

Continuous-time transfer function.


P =

    -0.03187 s^3 - 37.06 s^2 - 12.24 s - 7109
  ------------------------------------------------
  s^4 + 1163 s^3 + 709 s^2 + 2.4e05 s + 5.678e04

Continuous-time transfer function.


H =

       -8.265e-07 s^2 - 0.005817 s - 3.379
  ------------------------------------------------
  s^4 + 1163 s^3 + 709 s^2 + 2.4e05 s + 5.678e04

Continuous-time transfer function.
```

6.- ANEXO III – BIBLIOGRAFÍA

En esta parte de la memoria se ven reflejados los libros o manuales estudiados para llevar a cabo en su totalidad este proyecto:

- Wind Energy Systems: Control Engineering Design

Edited by Mario García-Sanz /Constantine H. Houpis

- Power Systems Analysis

Second Edition (Arthur R. Bergen / Vijay Vittal)

- Wind Power in Power Systems

Edited by Thomas Ackermann

- Wind Energy Explained (Theory,Design and Application)

Edited by J.F.Manwell / J.G.McGowan / A.L.Rogers

- QFT Manual (The QFT Frecuency Domain: Control Design Toolbox)

For Use with $MATLAB^{(R)}$