

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DE UN
AEROGENERADOR CON DOBLE ALIMENTACIÓN AL
GENERADOR DE INDUCCIÓN**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

GIOVAN RUBEN MOSCOSO BULEJE

**PROMOCIÓN
2007- I**

**LIMA – PERÚ
2012**

**SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DE UN
AEROGENERADOR CON DOBLE ALIMENTACIÓN AL
GENERADOR DE INDUCCIÓN**

DEDICATORIA

En primer lugar agradezco principalmente a dios todo poderoso, ya que sin su ayuda nada de lo logrado en mi vida hubiera sido posible; gracias por todo Dios mío. Agradezco a mi familia, ya que gracias a su apoyo y confianza en mi, pude desarrollar el bien mas importante para salir adelante en este mundo, mis estudios.

Estoy totalmente agradecido con el Ing. Rodolfo Moreno por su asesoría, y la confianza depositada en mí. Y de manera conjunta agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería, y a todo el grupo humano que lo conforma, por haber contribuido en mi formación profesional.

Agradezco a mi segunda familia, mis amigos, que a su manera me hicieron sentir que era capaz y que con sus palabras me motivaron día a día

SUMARIO

El presente documento tiene por objetivo describir la simulación en estado estacionario de un aerogenerador con doble alimentación al generador de inducción, para lo cual se desarrolla, como primer punto, la teoría de los subsistemas principales que lo conforman: turbina, generador de inducción de rotor bobinado, y el inversor.

Como segundo punto se plantea evaluar la operación de un generador eólico, para el cual se toma como referencia el generador VESTAS V80-2.0 MW, cuya data se extrae del paper “Analysis of a Commercial Wind Farm in Taiwan Part I: Measurement Results and Simulations” de la IEEE; el cual trabaja conectado a una red en 690 V, 60 Hz; de tal manera que se controlará la generación de potencia mediante dos inversores conectados por sus terminales DC (back-to-back) y colocados en el lado del rotor. Para el desarrollo del proceso de cálculo se elabora una hoja en Excel, por ser más comercial y de manejo mas simple, lo que a su vez permitirá no solo obtener los resultados sino también graficar analizar su comportamiento.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	2
PERFIL DEL INFORME DE SUFICIENCIA	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Objetivo	2
1.3 Objetivos Específicos	2
1.4 Sistema Internacional de Unidades.....	3
1.5 Alcances.....	3
CAPÍTULO II	4
MARCO TEÓRICO - AEROGENERADORES	4
2.1 Clasificación de Aerogeneradores.....	4
2.2 Fundamentos Aerodinámicos de las Máquinas Eólicas.....	8
2.2.1 Fuerzas Sobre un Perfil.....	8
2.2.2 Polar de un Perfil	10
2.2.3 Perfiles en Rotación.....	11
2.2.4 Modelo Teórico de Betz	19
2.2.5 Eficiencia Aerodinámica	21
CAPÍTULO III	22
MARCO TEÓRICO - MÁQUINA ASÍNCRONA	22
3.1 Transformación D-Q.....	22
3.1.1 Introducción.....	22
3.1.2 Nociones Básicas	22
3.1.3 Notación Compleja	26
3.1.4 Sistemas Trifásicos Equilibrados.....	27
3.1.5 Elementos Pasivos en Sistemas Estacionarios y Coordenadas d-q	29
3.1.6 Teoría de los Vectores Espaciales.....	32
3.2 Ecuaciones de la Máquina Asíncrona.....	33
3.2.1 Ecuaciones Eléctricas en Coordenadas a-b-c	33

3.2.2	Ecuaciones Eléctricas en Coordenadas d-q	36
3.2.3	Modelo Simplificado	38
3.2.4	Ecuaciones Electromecánicas	39
3.2.5	Estudio de la Máquina Asíncrona en Régimen Permanente.....	42
CAPÍTULO IV		44
MARCO TEÓRICO - INVERSORES		44
4.1	Control de la tensión de salida del inversor.....	44
4.1.1	Índice de Modulación	44
4.2	Operación del inversor conectado en la red eléctrica	46
4.2.1	Operación del inversor inyectado o absorbiendo potencia activa	46
CAPÍTULO V		49
MODELO DEL GENERADOR EÓLICO EN ESTADO ESTACIONARIO		49
5.1	Objetivo	49
5.2	Procedimiento y Cálculo	49
5.3	Análisis de resultados	66
CONCLUSIONES		68
RECOMENDACIONES		69
ANEXOS		70
7.1	Anexo A: Diagrama de Flujo de Proceso de Cálculo	71
7.2	Anexo B: Código Fuente de Programa en Matlab.....	73
7.3	Anexo C: Catálogo del Aerogenerador.....	75
7.4	Anexo D: Especificaciones Técnicas del Aerogenerador.....	82
7.5	Anexo E: Planos del Aerogenerador.....	114
BIBLIOGRAFÍA		121

PRÓLOGO

Actualmente la demanda eléctrica en el país se viene incrementando a un ritmo acelerado; debido al crecimiento económico que presenta actualmente el país, traduciéndose esta demanda como crecimiento industrial.

Al mismo tiempo el mundo está sufriendo una crisis ambiental muy seria, en gran parte debido a la liberación de gases de efecto invernadero. Por esta razón actualmente se presentan políticas que incentivan el empleo de tecnología de generación de energía a través de recursos renovables tales como el agua, el viento, el sol, geotérmico, mareomotriz y biomasa. En el Perú, el 02-05-2008 se promulgó el decreto ley N° 1002 “Decreto legislativo de Promoción de la Inversión para la Generación de Electricidad con el uso de Energías Renovables” el cual indica que la prioridad de despacho de energía la tendrán los generadores que empleen estos recursos para generar energía. En el caso de los generadores Hidráulicos, serán considerados RER aquellos que generan potencia no mayor a los 20 MW.

En base a lo mencionado en los párrafos anteriores, es necesario entender las tecnologías que se emplean para la generación de energía empleando recursos renovables. El presente informe, se enfoca específicamente en explicar el funcionamiento del generador síncrono doblemente alimentado, el cual se emplea para la generación de energía a través del viento, para lo cual se realizará la simulación de un generador VESTAS 80 – 2 MW en régimen permanente, analizando los resultados para diferentes condiciones de viento.

CAPÍTULO I

PERFIL DEL INFORME DE SUFICIENCIA

1.1 Introducción

El presente informe tiene por objetivo explicar el funcionamiento en estado estacionario de un aerogenerador con doble alimentación al generador de inducción, para lo cual se procede a desarrollar capítulos que expliquen en principio la teoría de los componentes principales de dicha maquina.

Esta teoría es concatenada y desarrollada en un proceso de cálculo que permitirá entender el comportamiento de estas maquinas para diferentes velocidades de viento, teniendo control sobre el factor de potencia y aprovechando al máximo la energía generada por el viento.

Posteriormente todos estos procesos de cálculo se plasman en una hoja en Excel, la cual es empleada en el proceso de cálculo de un ejemplo aplicado a un generador modelo VESTAS V80-2MW, aplicando diferentes velocidades de viento.

1.2 Objetivo

Elaborar el proceso de cálculo que permita desarrollar un programa que permita entender, de manera didáctica, el funcionamiento de un generador asíncrono doblemente alimentado.

1.3 Objetivos Específicos

1. Determinar el funcionamiento, en estado estacionario, de un aerogenerador con doble alimentación al generador de inducción, de una manera práctica, empleando una hoja de cálculo elaborado en un software de fácil acceso y uso como es el Excel.
2. Determinar la curva C.p. del fabricante tomando como referencia el modelo matemático de las curvas de operación del aerogenerador VESTAS V80-2MW indicado en

el paper “Analysis of a Commercial Wind Farm in Taiwan Part I: Measurement Results and Simulations“ de la IEEE.

3. Verificar que mediante la doble alimentación, se puede generar energía trabajando a velocidades menores que la velocidad de sincronismo; lo cual permite ampliar el rango de velocidades de viento para la generación de energía.

1.4 Sistema Internacional de Unidades

En este documento se hace uso de varias unidades de medición, principalmente de carácter eléctrico y magnético. Para lograr una mejor comprensión se ha hecho uso de la nomenclatura establecida en el Sistema Internacional de Unidades (SI). Se ha hecho especial énfasis en el correcto uso de los símbolos de las unidades.

1.5 Alcances

En base la información recopilada, en este documento se hace una explicación completa del proceso de cálculo que aplican estas maquinas para poder lograr aprovechar al máximo la energía entregada por el viento para lo cual debe ser capaz de controlar 2 parámetros para lograr este objetivo: manipular en ángulo de paso, y controlar la velocidad de rotación del eje del rotor.

Aparte de presentar la metodología de cálculo, se complementa con el desarrollo de una hoja de cálculo para agilizar la realización de los mismos, de acuerdo a las exigencias y tendencias modernas.

Es importante aclarar que el proceso de cálculo aquí planteado realiza muchas consideraciones para lograr el objetivo didáctico; mas, para el diseño, debe considerarse y tenerse en cuenta muchos parámetros adicionales; tales con el nivel de ruido, el nivel de resistencias de las palas de la turbina, etc.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO - AEROGENERADORES

2.1 Clasificación de Aerogeneradores

La clasificación de los aerogeneradores, se puede realizar desde varios puntos de vista, una primera aproximación al problema se puede hacer desde el punto de vista de la potencia eléctrica que pueden generar, según lo cual se clasifican en:

- **Pequeños Aerogeneradores.** Son considerados en este grupo los aerogeneradores cuya potencia está por debajo de los 30 kW. Los principales fabricantes de estos equipos están en EEUU (Bergey, Atlantic Orient, etc) y tienen una cuota del mercado mundial de aproximadamente el 30%5.
- **Aerogeneradores de Tamaño Medio.** Es el sector más desarrollado y extendido, en donde se engloban la mayor parte de las instalaciones conectadas a red. Su potencia está entre 30 y 600 kW. En este tipo de máquinas son los fabricantes europeos los que dominan el mercado (NEG MICON, VESTAS, ENERCON, GAMESA, MADE, etc)
- **Máquinas Multimegavatio.** Son máquinas con una potencia por encima del megavatio, representan lo último en tecnología. Los principales fabricantes de aerogeneradores disponen en el mercado de máquinas de este tipo (ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1.- Listado de Máquinas multimegavattios [S/N]

Fabricante	Modelo	Potencia MW	H*/D** m	Tecnología *** V/C/A/G	Observaciones
Nordex	N80	2.5	80/80	VV/CP/V/DA	
Nordex	N60	1.3	69/60	2V/PA/F/MA	
Bonus	1.3MW	1.3	68/62	2V/PA/V/MA	CombiStall
Tacke/Enron	TW 2.0	2	77/70.5	VV/CP/V/DA	
Vestas	V80	2	100/80	VV/CP/V/DA	Opti Tip / OptiSpeed
Vestas	V66	1.65	78/66	2V/CP/V/DA	Opti Tip / OptiSlip
Enron	1.5MW	1.5	85/77	VV/CP/V/DA	
Enercon	E66	1.5	98/66	VV/CP/V/SM	
Made/Endesa	AE-61	1.3	58.5/61	2V/PA/F/MA	
Nordic	1000	1.0	60/54	1V/PA/F/MA	2 palas/Desliz. Variable
Mitsubishi	MWT-1000	1.0	60/56	2V/CP/V/MA	

*H=Altura, se ha escogido la máxima del fabricante
 **D= Diámetro del rotor de la turbina
 ***En el apartado de tecnología se dan 4 características:

V: Velocidad, que puede ser de velocidad fija (IV), dos velocidades (2) o velocidad variable (VV)
 C: Control de potencia, que puede ser por pérdida aerodinámica (PA) o por control de paso de pala (CP)
 A: El paso de pala, que puede ser fijo (F) o variable (V)
 G: Es el tipo de generador, que puede ser asíncrono (MA), doblemente alimentado (DA) o generador síncrono multipolo de transmisión directa (SM)

Desde el punto de vista del diseño, los aerogeneradores se pueden clasificar según los criterios:

- Eje Horizontal o Eje Vertical. El eje sobre el que van las palas puede estar horizontal (HAWT6) o vertical (VAWT7), las máquinas del primer tipo son las más extendidas, mientras que las del segundo tipo quedan reducidas a prototipos (Darrieus, etc) o a máquinas pequeñas (ver Fig. 2.1). Las ventajas de las VAWT son que la torre no tiene que soportar el peso del generador y caja multiplicadora, y que no es necesario un sistema de orientación. A medida que se aumenta su tamaño los esfuerzos adicionales que deben soportar las VAWT son sólo debidos al peso de las palas y, por lo tanto unidireccionales, lo que facilita el diseño. No ocurre así en las HAWT, donde el peso de las palas crea distintos momentos de torsión que hacen más complejo el diseño de la estructura. Estas ventajas iniciales de la VAWT quedan contrarrestadas por la enorme complejidad que supone tener que desmontar la turbina para reparar los cojinetes de las mismas, sometidos a un gran desgaste debido a que todo el peso de la turbina está sobre ellos. Además la geometría de las palas en los VAWT es más compleja cuando se quiere introducir un control de potencia a elevadas velocidades de viento. La mayor parte de las VAWT están basadas en la máquina de Darrieus (1927) de la que existen variantes como el “Giromill” o el “Cycloturbine”. Un modelo distinto de los anteriores es el Savonius, consistente en un cilindro dividido en dos mitades distribuidas de forma helicoidal o en S.

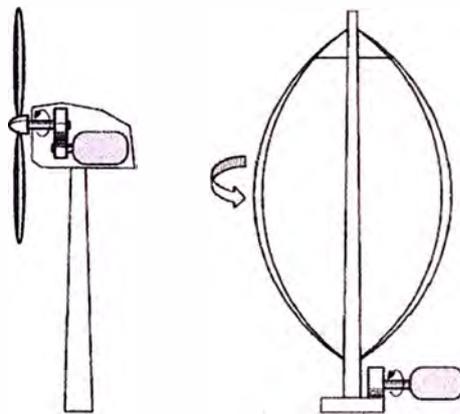


Fig 2.2.- Máquinas de eje horizontal (HAWT) frente a maquinas de eje vertical (VAWT-Darrieus)

- A Sotavento o a Barlovento. El conjunto formado por la góndola y la turbina puede estar a favor del viento (sotavento), que es su posición natural, o en contra (barlovento) siendo esta última opción la de empleo más generalizado (ver Fig. 2.3). La máquina a sotavento tiene como ventaja la de no necesitar un mecanismo de orientación, ya que tanto el rotor como la góndola tienen un diseño que permite seguir la dirección del viento, aunque, por otra parte, su comportamiento se ve afectado por las turbulencias que crea la torre. A este tipo de máquinas pertenece el prototipo MOD-0A.

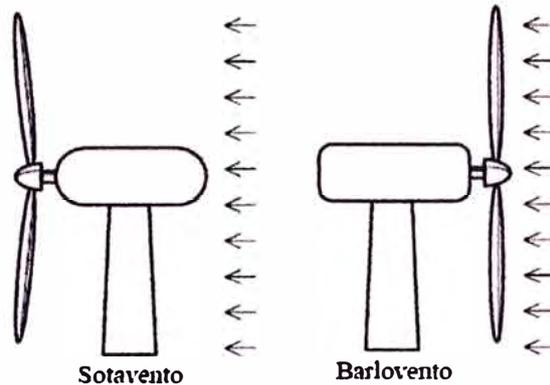


Fig 2.3.- Maquinas a Sotavento y a Barlovento

- N° de Palas. En las máquinas de media y gran potencia es casi un estándar la utilización de turbinas tripala, a pesar que los primeros prototipos de las máquinas multimegavatio eran bipala e incluso monopala (ver Fig. 2.4). Algunos de los pocos fabricantes dispuestos a fabricar máquinas bipala son las compañías The Wind Turbine Company y Nordic Wind Power. Los rotores con una o dos palas giran a mayor velocidad que los tripala y tienen a su favor un ahorro en el coste de la turbina, así como en la instalación. En su contra tiene una mayor complejidad en el diseño, ya que su rotor ha de ser basculante para evitar las oscilaciones producidas por el paso de las palas por delante de la torre. En los pequeños aerogeneradores, aunque el número de modelos tripalas supera ampliamente al resto, es habitual encontrar diseños con 2, 4, 5 y 6 palas e incluso más como ocurre con el molino de viento americano (Fig. 2.5).



Fig 2.4.- Turbinas de 1,2 y 3 palas

En las máquinas de media y gran potencia el predominio de las HAWT de rotor tripala a barlovento es prácticamente absoluto. Las principales diferencias entre ellas están, principalmente, en las opciones escogidas para el control de la potencia extraída del viento. Según esto las máquinas se caracterizan por:

- Control por Variación del Paso de Pala o por Pérdida Aerodinámica. Una de las posibilidades para modificar la potencia que se puede obtener en el eje de la turbina es la de actuar directamente sobre las palas, ya sea haciendo entrar a esta en pérdida aerodinámica, o bien, variando el paso de las palas de la turbina. Ambas soluciones no son excluyentes, por ejemplo, en el sistema CombiStall de Bonus.
- Velocidad Fija frente a Velocidad Variable. En función de que la variación de la velocidad de la turbina sea prácticamente constante o con variaciones inferiores al 10% se considerará de velocidad constante, y si se permiten variaciones superiores se dirá que es de velocidad variable. Las máquinas que pueden trabajar a dos velocidades prácticamente constantes se consideran como una solución intermedia.

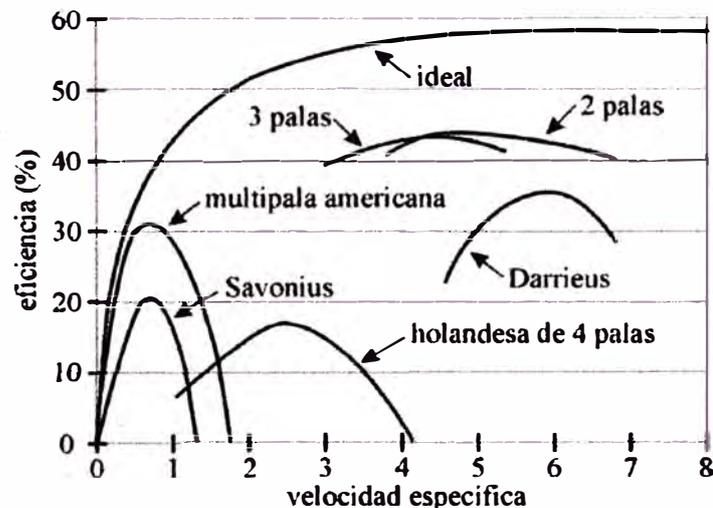


Fig 2.5.- Eficiencia de algunos tipos de Turbina

La revisión tecnológica presentada en este capítulo se centrará en las distintas configuraciones que se obtienen con las características mencionadas, cubriendo con ellas la amplia mayoría de los modelos para generadores de media potencia y máquinas multimegavatio. En este sentido, las configuraciones más habituales en el mercado para estas máquinas pueden verse en la Tabla 2.2. El control de potencia por pérdida aerodinámica, o por regulación del paso de pala están presentes en prácticamente todas las configuraciones de aerogeneradores.

Tabla 2.2.- Principales configuraciones de aerogeneradores existentes en el mercado [S/N]

Velocidad	Paso de Pala	Control Potencia	Generador	Conexión a Red	Fabricante
Constante	Fijo	Pérd. aerodinámica	Asíncrono	Directa	Made, Micon
Constante	Variable	Paso de Pala	Asíncrono	Directa	Vestas
2 vel.	Fijo	Pérd. aerodinámica	Asíncrono con dos devanados	Directa	Bonus, Made, Nordex, Micon
2 vel.	Variable	Paso de Pala	Asíncrono con dos devanados	Directa	Mitsubishi
2 vel.	Variable	Pérd. aerodinámica	Asíncrono con dos devanados	Directa	Dutch Pacific, Bonus
Variación 10%	Variable	Paso de Pala	Asíncrono con resistencias en rotor	Directa	Vestas, Lagerway
Variación 10%	Fijo	Pérd. aerodinámica	Asíncrono con resistencias en rotor	Directa	Nordic (bipala)
Variación 10%+2 vel.	Variable	Paso de Pala	Asíncrono con resist. en rotor y asíncrono aux.	Directa	Vestas
Variación ±30%	Variable	Paso de Pala	Asíncrono doblemente alimentado	Directa e Inversor	Dewind, Vestas, Enron, Nordex, Gamesa
Variación 50%	Fijo	Pérd. aerodinámica	Síncrono multipolos	Inversor	Northern Power Systems
Variación 50%	Variable	Paso de Pala	Síncrono multipolos	Inversor	Enercon
Variación 50%	Variable	Paso de Pala	Asíncrono	Inversor	Lagerway

2.2 Fundamentos Aerodinámicos de las Máquinas Eólicas

2.2.1 Fuerzas Sobre un Perfil

Un objeto situado en el seno de una corriente de aire presenta una resistencia al avance, deformando los filetes fluidos; esto depende de la forma del objeto y de su posición con relación a la dirección del viento (ver Fig 2.6).

Al estudiar los efectos de la resistencia del aire sobre una placa plana, se observa que la resultante R de las fuerzas aplicadas a la placa es un vector cuyo punto de aplicación es su centro aerodinámico (centro de empuje), siendo su dirección perpendicular a la placa, su sentido el del viento, y su intensidad proporcional a la superficie S expuesta y al cuadrado de la velocidad del viento v , en la forma:

$$R = C_w \rho \frac{SV^2}{2} = kSV^2 \quad (2.1)$$

En la que k es un coeficiente que depende del ángulo α de incidencia y de la turbulencia del movimiento; C_w es un coeficiente de resistencia (penetración), ρ es la densidad del aire y S la sección frontal del perfil.

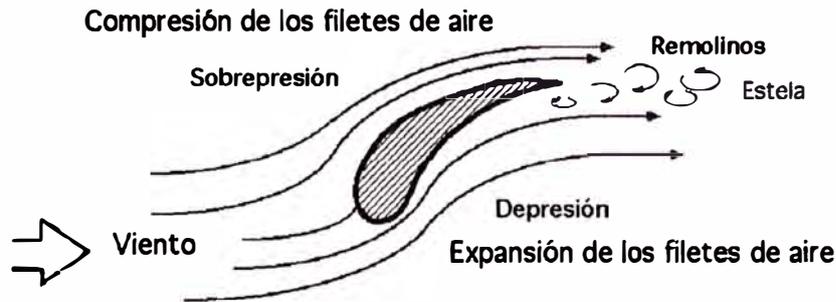


Fig 2.6.- Perfil situado en el seno de una corriente fluida

Si el ángulo α que forma el plano de la placa con la dirección del viento es grande, existe una sobrepresión en la parte delantera de la placa y una depresión en su parte posterior, (ver Fig 2.7); si el ángulo de incidencia α es pequeño, la sobrepresión aparece en la parte inferior de la placa y la depresión por encima, por lo que aparece una fuerza que tiende a elevarla, (ver Fig 2.8), conocida como fuerza de sustentación o de elevación.

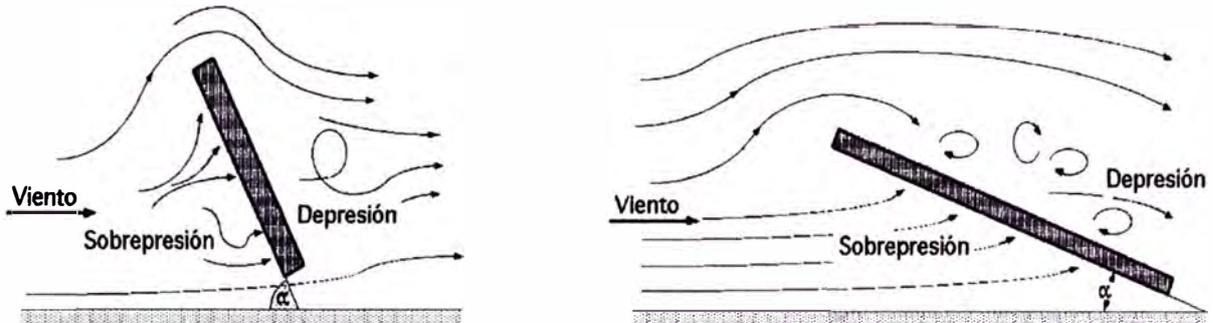


Fig 2.7 y 2.8.- Perfiles ubicados en el seno de una corriente de aire formando ángulos de incidencia grande y pequeño respectivamente

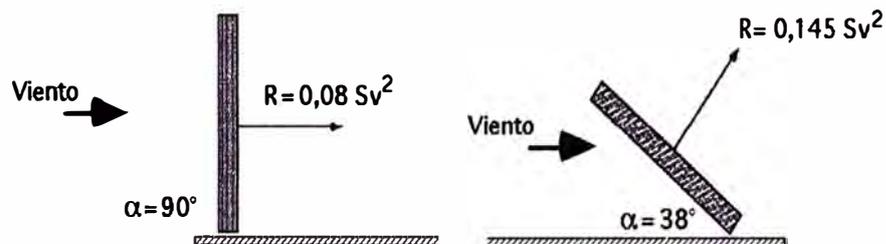


Fig 2.9.- Ejemplos de fuerzas producidas debido a ángulos de incidencia grande y pequeño

En la Fig 2.9 se representa un perfil placa plana con dos tipos de inclinación; se indican los valores de R observándose que, cuanto más pequeño sea el ángulo de inclinación α la resultante R será mayor. Para un perfil diseñado en forma aerodinámica se definen dos zonas que son (ver fig. 2.10):

- El extradós, que es la parte del perfil en donde los filetes de aire están en depresión.
- El intradós, que es la parte del perfil en donde los filetes de aire están en sobrepresión.

Si la placa no está perfilada convenientemente, las turbulencias originadas sobre el extradós disminuyen la energía cinética del aire. Si se permite que la placa se desplace bajo el efecto de la fuerza ejercida por el viento, producirá un cierto trabajo recuperable en forma de energía mecánica; cuanto menor sea la turbulencia, mayor será este trabajo.

La resultante R puede ser descompuesta en 2 valores; una componente en la dirección del viento a la cual llamaremos fuerza de arrastre (F_{arr}), y otra componente perpendicular a la fuerza de arrastre, a la que llamaremos fuerza ascensional (F_{asc}):

$$F_{arr} = R \sin \alpha = k_x S V^2 \quad (2.2)$$

$$F_{asc} = R \cos \alpha = k_y S V^2 \quad (2.3)$$

Donde K_x es el coeficiente de arrastre y K_y es el coeficiente ascensional. La fuerza R es siempre normal a la cuerda del perfil, que es al mismo tiempo su longitud característica; el empuje ascensional aumenta a medida que α disminuye. La cuerda se considera desde el borde de ataque del perfil, al borde de salida posterior.

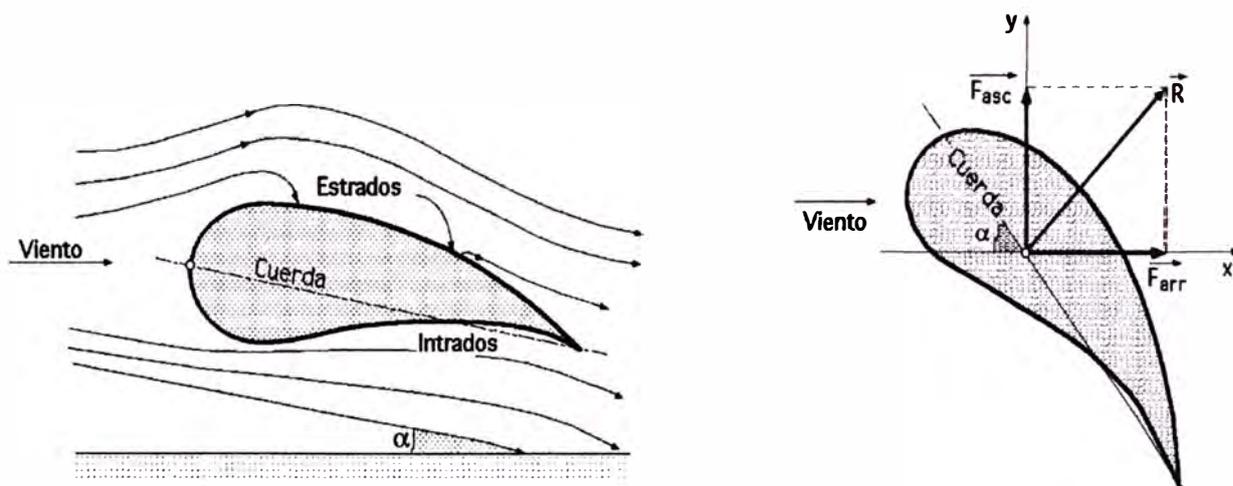


Fig 2.10.- Fuerza de arrastre y ascensional en un perfil fijo

2.2.2 Polar de un Perfil

Se define la esbeltez de un perfil (f), para un valor dado de α como la relación entre los coeficientes k_y y k_x , en la forma:

$$f = \frac{k_y}{k_x} = \frac{C_y}{C_x} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (2.4)$$

La curva, $C_y = f(C_x)$, Fig 2.11, se denomina polar del perfil y se determina haciendo mediciones de los valores de F_{arr} y F_{asc} , mediante una balanza de torsión y túnel de viento, para diversos valores del ángulo de ataque α .

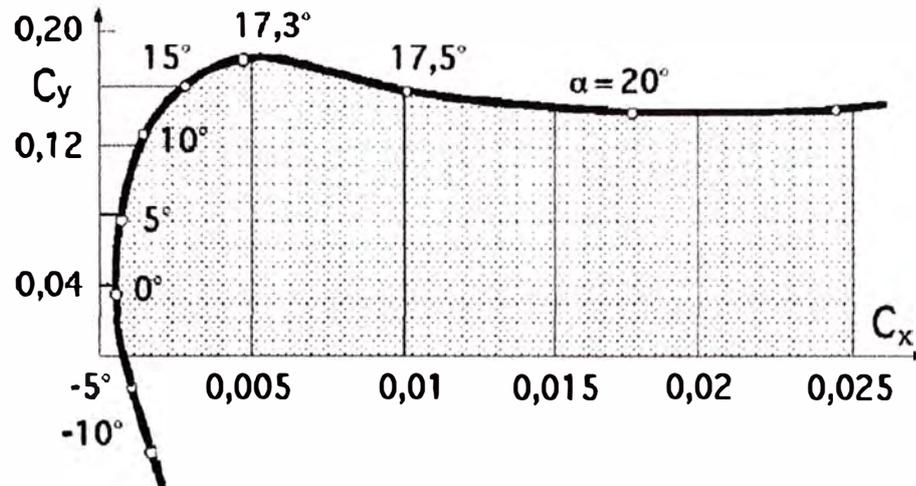


Fig 2.11.- Ejemplo de Polar de un perfil

Se puede concluir que, dependiendo de las características de fabricación de un perfil, este tendrá un determinado polar; ya que estos se modelan a partir de pruebas de laboratorio.

2.2.3 Perfiles en Rotación

La pala de una hélice de un aerogenerador eólico es una pala perfilada que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. Las fuerzas que actúan sobre un elemento de longitud de pala dx en rotación, se obtienen estudiando la acción del viento relativo que recibe la pala de velocidad C (viento aparente o estela), que se puede considerar como la suma del viento real de velocidad V , y de un viento originado por el movimiento de rotación de la pala, de velocidad U . (Ver Fig 2.12).

Si se trata de una hélice de avión (propulsiva), como el viento incidente es un viento relativo debido al desplazamiento del avión, existe una diferencia en la posición de la pala respecto a la del aerogenerador, como se indica en las Fig 2.13 y 2.14, en la que:

β es el ángulo que forma una cuerda cualquiera del perfil con el plano de rotación; (ángulo de calaje o de inclinación o ángulo de paso)

α es el ángulo que forma la cuerda del perfil con la velocidad aparente del viento C , (ángulo de incidencia o de ataque)

θ es el ángulo que forma el plano de rotación con la dirección aparente del viento que pasa por el borde de ataque; se conoce como ángulo aparente del viento.

Se tiene que:

$$\theta = \beta + \alpha, \text{ para una hélice de aerogenerador} \quad (2.5)$$

$$\theta = \beta - \alpha, \text{ para una hélice de avión} \quad (2.6)$$

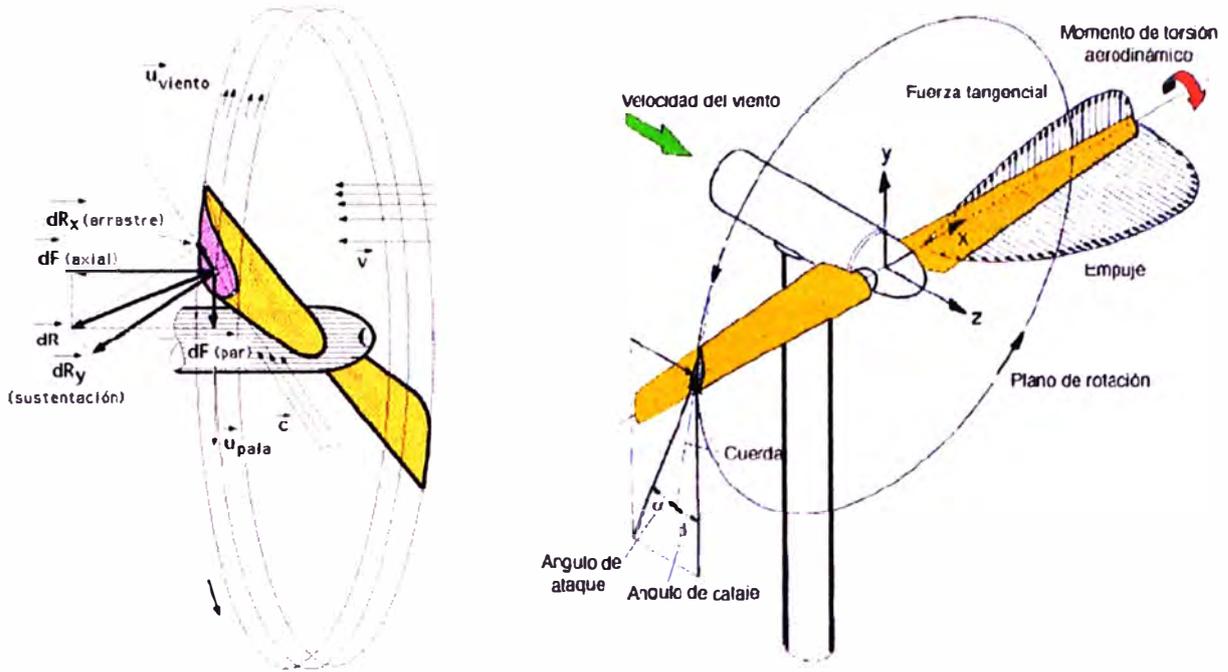


Fig 2.12.- Fuerzas que actúan sobre un elemento de pala en rotación

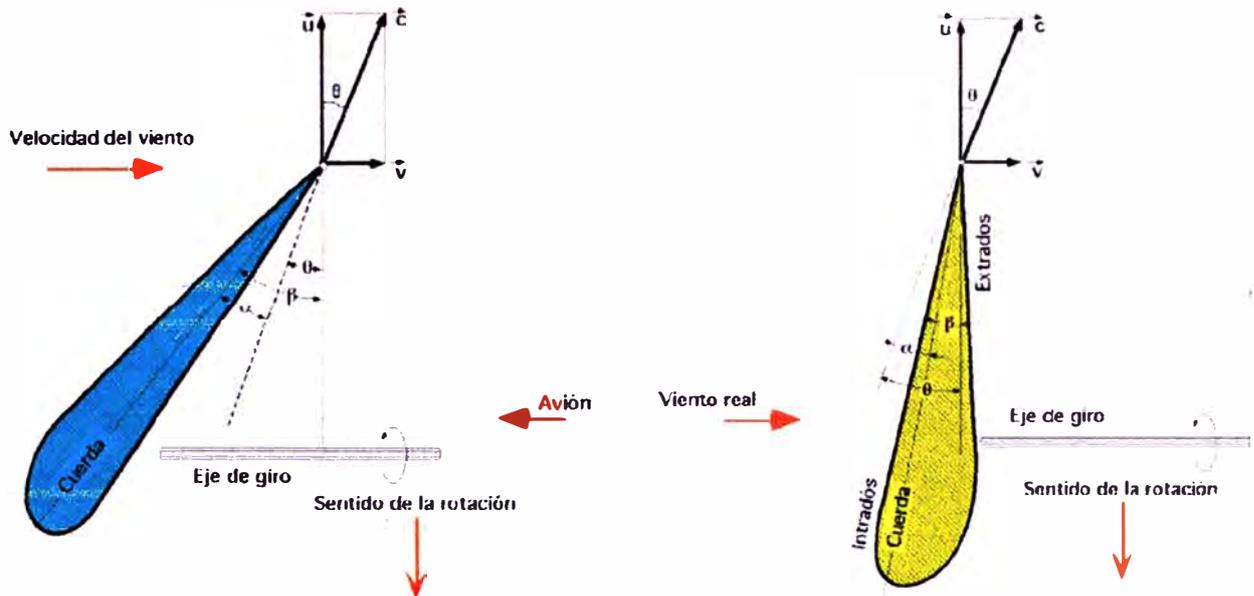


Fig 2.13. Pala de hélice de avión

Fig 2.14. Pala de hélice de aerogenerador

La pala de un aerogenerador es más sencilla y fácil de construir que la de un avión, ya que es más lisa, presentando al viento una superficie casi plana, mientras que una hélice de avión girando en las mismas condiciones que la hélice de un aerogenerador, no tendría apenas aplicación para la transformación de la energía eólica.

a) Fuerzas de Arrastre y Ascensional en Perfiles Móviles

La fuerza que actúa en el centro aerodinámico de un elemento de pala en rotación, de superficie frontal elemental dS , (proyección del perfil sobre la dirección del viento aparente), viene dada por dR , (ver Fig 2.15).

Esta fuerza se puede descomponer a su vez en otras dos, dR_x en la dirección del viento aparente (Fuerza de arrastre), que se corresponde con una degradación de la energía, y dR_y , (Fuerza ascensional o empuje) sobre el elemento de pala considerado.

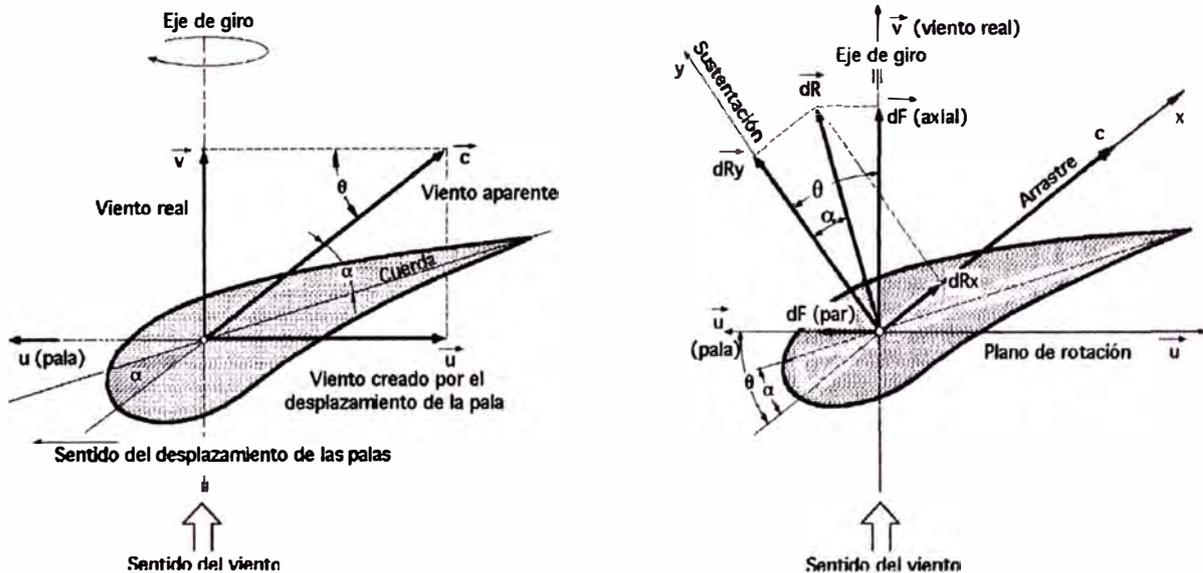


Fig 2.15.- a) Velocidades y b) fuerzas que aparecen sobre una pala de aerogenerador

Por lo tanto, para el elemento de pala diferencial en rotación dS , y de acuerdo con la Fig 2.15 se puede poner:

$$dR_x = \frac{1}{2} C_x \rho c^2 dS = dF_{arr} \quad (2.7)$$

$$dR_y = \frac{1}{2} C_y \rho c^2 dS = dF_{asc} \quad (2.8)$$

Donde C_x es el coeficiente de arrastre y C_y es el coeficiente ascensional, que dependen del tipo de perfil, del ángulo de ataque y del número de Reynolds. dS , es el área del elemento diferencial de la pala que se ofrece al viento, de valor $L dr$, siendo L la longitud característica del perfil, igual a la longitud de su cuerda. Los coeficientes C_x y C_y vienen relacionados por el coeficiente aerodinámico total C_t , de la forma:

$$C_T^2 = C_x^2 + C_y^2 \quad (2.9)$$

b) Fuerzas de Par y Axial

Si se proyectan las fuerzas de arrastre o de resistencia dR_x y de empuje ascensional o sustentación dR_y , sobre el plano de rotación, se obtiene una fuerza útil, dF_{par} , (paralela a U), que hace girar la hélice, y otra fuerza perpendicular, dF_{axial} , (fuerza de empuje del viento sobre el rotor), que se compensa por la reacción del soporte del eje del rotor de la hélice, de la forma:

$$dF_{PAR} = dR_y \text{sen}\theta - dR_x \cos\theta = \frac{1}{2} \rho C^2 ds (C_y \text{sen}\theta - C_x \cos\theta) =$$

$$= \frac{1}{2} \rho \frac{V^2}{\text{sen}^2\theta} dS (C_y \text{sen}\theta - C_x \cos\theta) = \frac{\rho V^2}{2} (1 + \cot^2\theta) dS (C_y \text{sen}\theta - C_x \cos\theta) \quad (2.10)$$

$$dF_{axial} = dR_y \cos\theta + dR_x \text{sen}\theta = \frac{1}{2} \rho C^2 dS (C_y \cos\theta + C_x \text{sen}\theta) =$$

$$\frac{1}{2} \rho \frac{V^2}{\text{sen}^2\theta} dS (C_y \cos\theta + C_x \text{sen}\theta) = \frac{\rho V^2}{2} (1 + \cot^2\theta) dS (C_y \cos\theta + C_x \text{sen}\theta) \quad (2.11)$$

Siendo θ el ángulo que forma la dirección del viento aparente (relativa), entre los vectores velocidad U y C . Los valores que intervienen en el cálculo de estos elementos diferenciales son función de las velocidades en cada zona y, por tanto, del ángulo de ataque α , ya que conocido éste, es posible obtener los valores de C_x y C_y en función de él.

$$\text{Como:} \quad \text{tg}\alpha = \frac{C_x}{C_y} = \frac{dR_x}{dR_y} \quad (2.12)$$

Resulta:

$$C_y \cos\theta - C_x \text{sen}\theta = C_y \left(\text{sen}\theta - \frac{C_x}{C_y} \cos\theta \right) = C_y (\text{sen}\theta - \text{tg}\alpha \cos\theta) = C_y \frac{\text{sen}(\theta - \alpha)}{\cos\alpha} \quad (2.13)$$

$$C_y \cos\theta + C_x \text{sen}\theta = C_y \left(\cos\theta + \frac{C_x}{C_y} \text{sen}\theta \right) = C_y (\cos\theta + \text{tg}\alpha \text{sen}\theta) = C_y \frac{\cos(\theta - \alpha)}{\cos\alpha} \quad (2.14)$$

De las expresiones 2.10, 2.11, 2.13 y 2.14; se obtiene:

$$dF_{par} = \frac{1}{2} \rho V^2 dS C_y \frac{\text{sen}(\theta - \alpha)}{\text{sen}^2\theta \cos\alpha} \quad (2.15)$$

$$dF_{axial} = \frac{1}{2} \rho V^2 dS C_y \frac{\cos(\theta - \alpha)}{\text{sen}^2\theta \cos\alpha} \quad (2.16)$$

La fuerza de sustentación aumenta con el ángulo de ataque α hasta un máximo y luego disminuye. Como U varía con el radio r , C también variará, por lo que el ángulo β deberá variar a lo largo de la pala, y de ahí que éstas se construyan alabeadas.

c) Par Motor

Los aerogeneradores eólicos cuyo par motor se obtiene a partir de la fuerza de arrastre (Farr), son los aerogeneradores Savonius, (ver Fig 2.16), y los Molinos multipala (12 a 24 palas - Fig 2.17). El par motor es de la forma:

$$dT_i = rdF_{arr} = rdR_x = \frac{r}{2} c_x \rho c^2 dS = \frac{r}{2} c_x \rho V^2 (1 + \cot^2 \theta) dS = \frac{r}{2} c_y \rho V^2 \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\sin^2 \theta \cos \alpha} ds \quad (2.17)$$

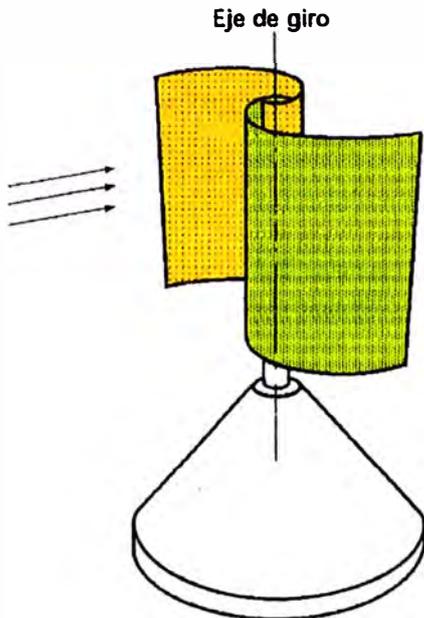


Fig 2.16 Rotor Savonius

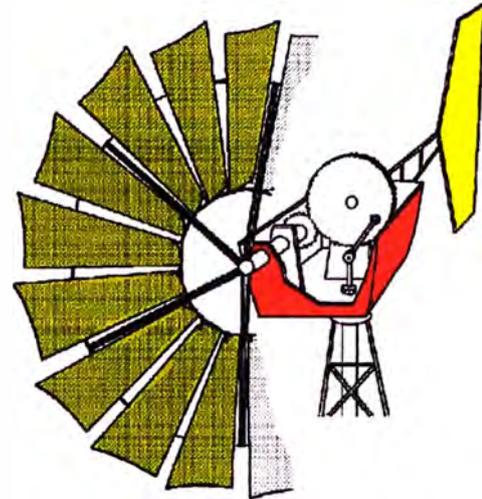


Fig 2.17 Molino Multipala

Los aerogeneradores eólicos en los que el par motor se obtiene a partir de la fuerza de par dF_{par} son los aerogeneradores Darrieux, Fig 2.18, y Hélice, Fig 2.19.

$$dT_i = rdF_{par} = \frac{r}{2} \rho V^2 dS (1 + \cot^2 \theta) (c_y \sin \theta - c_x \cos \theta) \quad (2.18)$$

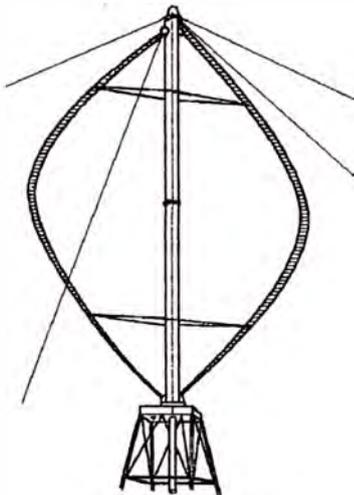


Fig 2.18 Rotor Savonius

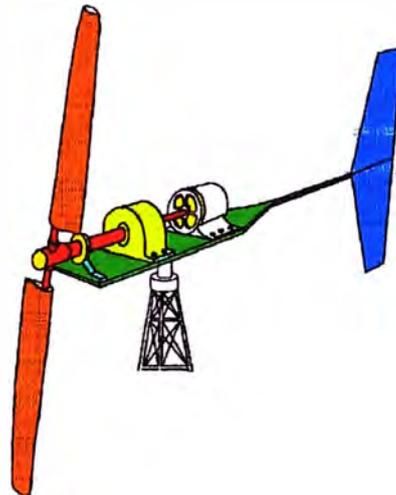


Fig 2.19 Molino Multipala

d) Rendimiento Aerodinámico de las Hélices

El diferencial de potencia útil generada por la pala es de la forma:

$$dP_{util} = dF_{par} U \quad (2.19)$$

La potencia consumida por el viento:

$$dP_{viento} = dF_{axial} V \quad (2.20)$$

Por lo que se puede definir el rendimiento aerodinámico η como la relación entre la potencia útil generada por la pala y la consumida por el viento en este efecto, en la forma:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{dF_{par} U}{dF_{axial} V} = \frac{dR_y \operatorname{sen} \theta - dR_x \cos \theta}{dR_y \cos \theta + dR_x \operatorname{sen} \theta} \frac{U}{V} = \frac{\operatorname{sen}(\theta - \alpha)}{\cos(\theta - \alpha)} \frac{U}{V} = \operatorname{tg}(\theta - \alpha) \frac{U}{V} = \\ &= \frac{\frac{dR_y}{dR_x} - \cot g \theta}{\frac{dR_y}{dR_x} \cot \theta + 1} \frac{U}{V} = \frac{1 - \mu \cot \theta}{1 + \mu \operatorname{tg} \theta} = \frac{f - \cot \theta}{f + \operatorname{tg} \theta}\end{aligned}\quad (2.21)$$

Expresión que depende de la esbeltez f y del TSR

$$f = \frac{1}{\mu} = \frac{dR_y}{dR_x} = \frac{C_y}{C_x} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (2.22)$$

$$TSR = \lambda = \frac{U \max}{V} = \cot \theta = \frac{Rw}{V} = \frac{\pi Rn}{30V} \quad (2.23)$$

Siendo TSR (λ) (Tip-Speed-Ratio), la relación entre la velocidad periférica de la pala U y la del viento V .

La relación entre la velocidad angular w para un radio r cualquiera y el ángulo θ es:

$$SR = \frac{U}{V} = \cot \theta = \frac{rw}{V} = \frac{\pi rn}{30V} \quad (2.24)$$

Siendo SR (Speed-Ratio), en la que r es la distancia del elemento de pala considerado al eje de rotación del aerogenerador; si r disminuye, el ángulo θ aumenta; si β es constante, el ángulo de incidencia α también aumenta.

De la expresión del rendimiento de una pala de aerogenerador en función de su esbeltez f y del ángulo aparente del viento θ se deduce que cuanto menor sea el valor de μ , (o cuanto mayor sea el valor de la esbeltez f), tanto mayor será el rendimiento η , obteniéndose para $\mu = 0$, ó $f = \infty$, un rendimiento máximo igual a la unidad, cuestión imposible por el Teorema de Betz que veremos más adelante.

Cuando se construye un aerogenerador hay que elegir una velocidad del viento que sea la más adecuada y a partir de ella intentar obtener el rendimiento máximo; ésta es la velocidad nominal, dependiendo su elección del paraje en donde se vaya a instalar el aparato; una vez fijada se elige el tipo de perfil de la pala y la velocidad de rotación deseada.

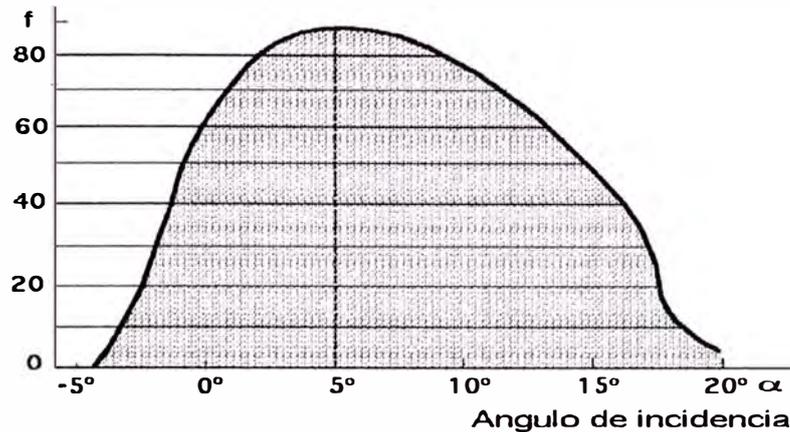


Fig 2.20.- Esbeltez de un perfil NACA

Conociendo la velocidad nominal del viento V y la velocidad periférica de rotación U , se determina el ángulo aparente del viento θ que varía a lo largo de la pala según la distancia al eje de rotación de la hélice.

También hay que tener en cuenta que para obtener η_{\max} el ángulo de incidencia del viento sobre la pala debe tener un valor fijo α a todo lo largo de la misma; para que esto sea así es necesario que el ángulo, $\beta = \theta - \alpha$ varíe al mismo tiempo que θ .

La pala que tiene un mayor rendimiento aerodinámico es la que tiene forma de barrena en la que el ángulo β es muy importante al principio y lo es menos en la extremidad de la pala.

Una pala en forma de barrena es cara y difícil de construir, por lo que generalmente se utilizan palas de perfil constante o palas rectangulares, en las que, la pérdida de rendimiento respecto a las más sofisticadas, es pequeña.

e) **Potencia Máxima**

Para hallar la potencia máxima se puede partir de la expresión de la potencia útil de la forma:

$$\begin{aligned}
 dP_{\text{util}} &= U dF_{\text{par}} = U(dR_y \text{sen}\theta - dR_x \text{cos}\theta) = \frac{U}{2} \rho C^2 dS (C_y \text{sen}\theta - C_x \text{cos}\theta) = \\
 &= \frac{U}{2} \rho V^2 dS (\cot g^2 \theta + 1)(C_y \text{sen}\theta - C_x \text{cos}\theta) = \\
 &= \frac{\rho V^3 dS}{2} \cot g \theta (\cot g^2 \theta + 1)(C_y \text{sen}\theta - C_x \text{cos}\theta)
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Considerando que el valor de, $\theta < 20^\circ$, se puede emplear lo siguiente:

$$\text{tg}\theta = \text{sen}\theta, \quad \text{cos}\theta \approx 1, \quad \cot g \theta \approx \frac{1}{\text{sen}\theta} \tag{2.26}$$

Quedando la expresión de $dP_{\text{útil}}$ en la forma:

$$\begin{aligned} dP_{\text{útil}} &= \frac{\rho V^3 dS}{2} \frac{1}{\text{sen}\theta} (\cot g^2\theta + 1)(C_y \text{sen}\theta - C_x) = \\ &= \frac{\rho V^3 dS}{2} \left\{ C_y (\cot g^2\theta + 1) - C_x \frac{\cot g^2\theta + 1}{\text{sen}\theta} \right\} = \frac{\rho V^3 dS}{2} \left(\frac{C_y}{\text{sen}^2\theta} - \frac{C_x}{\text{sen}^3\theta} \right) = \\ &= \frac{\rho V^3 dS}{2} (C_y \cot g^2\theta - C_x \cot g^3\theta) \end{aligned} \quad (2.27)$$

La condición de potencia máxima desarrollada por el viento correspondiente al elemento de superficie de pala dS , se calcula derivando la expresión de la $dP_{\text{útil}}$ respecto de θ , obteniéndose:

$$2C_y \cot g\theta - 3C_x \cot g^2\theta = 0 \quad (2.28)$$

Cuyas soluciones son:

$$\cot g\theta = 0 \quad (2.29)$$

$$2C_y = 3C_x \cot g\theta \Rightarrow \cot g\theta = \frac{2C_y}{3C_x} = \frac{2f}{3} = \frac{2}{3\mu} \quad (2.30)$$

Remplazando 2.30 en 2.27, se tiene:

$$dP_{\text{útil,max}} = \frac{\rho V^3 dS}{2} \left(C_y \frac{4C_y^2}{9C_x^2} - C_x \frac{8C_y^3}{27C_x^3} \right) = \frac{2\rho V^3 dS}{27} \frac{C_y^3}{C_x^2} \quad (2.31)$$

f) Par Motor Máximo

El par motor dT_t correspondiente al elemento de superficie de pala dS se ha calculado anteriormente; también se puede hallar como sigue:

$$dP_{\text{útil}} = dT_t w = dT_t \frac{\pi n}{30} \quad (2.32)$$

Despejando dT_t se tiene:

$$dP_{\text{útil}} = dCw = dC \frac{\pi n}{30} \quad (2.33)$$

$$dT_t = \frac{dP_{\text{útil}}}{w} = \frac{dP_{\text{útil}}}{U} r = \frac{dP_{\text{útil}}}{V \cot g\theta} r = \frac{r \rho V^2 dS}{2} (C_y \cot g\theta - C_x \cot g^2\theta) \quad (2.34)$$

Que se anula para:

$$\cot g\theta = \frac{c_y}{c_x} \quad (2.35)$$

La condición de par motor máximo se obtiene derivando la expresión 2.36 respecto de θ , obteniendo lo siguiente:

$$C_y = 2C_x \cot g\theta, \cot g\theta = \frac{C_y}{2C_x} \quad (2.36)$$

Remplazando las expresiones de 2.36 en 2.34, se obtiene:

$$dT_{i_{\max}} = \frac{r\rho V^2 dS}{2} \left(\frac{C_y^2}{2C_x} - \frac{C_x C_y^2}{4C_x^2} \right) = \frac{r\rho V^2 dS}{8} \frac{C_y^2}{C_x} \quad (2.37)$$

g) Velocidad Angular Máxima

Remplazando en la expresión 2.32, las expresiones de valores máximos obtenidos en las ecuaciones 2.31 y 2.37, se tiene:

$$w_{\max} = \left(\frac{dP}{dT_i} \right)_{\max} = \frac{\frac{2\rho V^3 dS}{27} \frac{C_y^3}{C_x^2}}{\frac{r\rho V^2 dS}{8} \frac{C_y^2}{C_x}} = \frac{16}{27} \frac{V}{r} \frac{C_y}{C_x} \quad (2.38)$$

En los aerogeneradores de eje horizontal, para obtener una velocidad angular w uniforme, es necesario que tanto la velocidad v del viento, como su dirección, permanezcan constantes respecto a la pala.

2.2.4 Modelo Teórico de Betz

Vamos a suponer que la energía eólica se puede recuperar y transformar mediante un aerogenerador de hélice.

La hélice se supone inmersa en una corriente de aire de velocidad V que, aguas abajo posee velocidad no nula V_2 , lo que permite asegurar que no es posible la transformación y recuperación de toda la energía del viento en otra forma de energía.

Se supondrá que aguas arriba de la hélice, el aire que circula por el tubo de corriente indicado en la Fig 2.21, posee una velocidad V_1 en la sección transversal ficticia A_1 , que es la velocidad del viento sin perturbar, mientras que la velocidad V_2 se corresponde con otra sección transversal ficticia A_2 aguas abajo de la zona en que se encuentra la hélice.

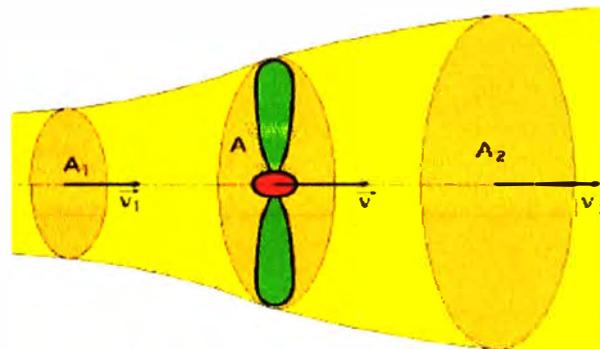


Fig 2.21.- Modelo de Betz

En el plano que contiene la hélice, la sección transversal batida por la misma sería un disco imaginario de sección A, siendo V la velocidad útil del viento en la misma.

La hélice se supone como un disco de diámetro d que capta la energía del aire en movimiento que llega a él.

Si el disco fuese capaz de captar toda la energía cinética del viento, aguas abajo del mismo el aire estaría en reposo y, por lo tanto, la velocidad sería, $V_2 = 0$.

Suponiendo que el gasto másico G de aire que circula por el tubo es constante, se puede poner,

$$G = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 = \rho A V \quad (2.39)$$

La variación de la energía cinética del viento en la unidad de tiempo es de la forma:

$$\Delta E_{\text{cinético}} = E_{C1} - E_{C2} = \frac{G}{2} (V_1^2 - V_2^2) = \frac{\rho A V}{2} (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.40)$$

La fuerza F ejercida por el viento en la unidad de tiempo, $\Delta t=1$, sobre el área ficticia A barrida por la hélice, es igual a la variación de la cantidad de movimiento del aire que la atraviesa; el trabajo generado por esta fuerza F en la unidad de tiempo, es la potencia Pútil de la forma,

$$P_{\text{útil}} = FV = \left| F = \frac{G\Delta V}{\Delta T} = \rho A V (V_1 - V_2) \right| = \rho A V^2 (V_1 - V_2) \quad (2.41)$$

Que es igual a la variación de energía cinética del aire, en el mismo tiempo, pudiéndose poner:

$$P_{\text{útil}} = \rho A V^2 (V_1 - V_2) = \frac{\rho A V}{2} (V_1^2 - V_2^2) \Rightarrow V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.42)$$

Si se hace el cambio, $V_2 = bV_1$, con, $0 < b < 1$, resulta:

$$P_{\text{útil}} = \frac{\rho A (V_1 + V_2)}{4} (V_1^2 - V_2^2) = \frac{\rho A V_1^3}{4} (1+b)(1-b^2) \quad (2.43)$$

El máximo valor de Pútil se obtiene derivándola respecto de b e igualándolo a 0; resultando:

$$(1 - b^2) + (1 + b)(-2b) = 0 ; (1 + b)(1 - 3b) = 0 \quad (2.44)$$

Cuyas soluciones son:

$$\left\{ \begin{array}{l} b = -1, \text{ que no cumple con la condición } 0 < b < 1 \\ b = \frac{1}{3} = \frac{V_2}{V_1} ; V_1 = 3V_2 \end{array} \right\} \quad (2.45)$$

Que permite hallar la potencia máxima suministrada por el rotor, de valor:

$$P_{util\ max} = \frac{\rho AV_1^3}{4} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{9}\right) = \frac{8\rho AV_1^3}{27} = 0.37 AV_1^3 \quad (2.46)$$

Que se conoce como ecuación de Betz, y en la que se ha tomado como densidad media del aire, $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, ya que en invierno ésta viene a ser del orden de 1,33 y en verano de 1,15.

De todo esto se deduce que la potencia máxima teórica es proporcional al diámetro D de la hélice y al cubo de la velocidad nominal del viento v_1 .

Como la potencia del viento aguas arriba de la hélice, viene dada por la expresión:

$$P_{disponible\ viento} = \frac{\rho AV_1^3}{2} = 0.625 AV_1^3 \quad (2.47)$$

El rendimiento maximal aerodinámico (o factor de potencia maximal), será:

$$\eta_{maximal} = \frac{P_{util\ maxima}}{P_{viento}} = \frac{16}{27} = 0.595 = 59.5\%$$

Que es el límite teórico o coeficiente de Betz, resultado que ninguna máquina eólica, por muy sofisticada que sea, puede superar.

2.2.5 Eficiencia Aerodinámica

Se define como la relación entre la potencia aprovechada por la turbina y la potencia entregada por el viento. Esta expresión depende del TSR y del ángulo de paso, y es una característica propia de cada tipo de generador.

$$C_p = \frac{P_{util}}{P_{entregada}} = \frac{0.5\rho A(Rw)^3}{0.5\rho AV^3} = f(\lambda, \beta) \quad (2.48)$$

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO - MÁQUINA ASÍNCRONA

3.1 Transformación D-Q

3.1.1 Introducción

Uno de los problemas típicos en la ingeniería es el de modelar las máquinas eléctricas. Las ecuaciones diferenciales asociadas a éstas son complejas ya que dependen, entre otras cosas, de la posición relativa del rotor con respecto al estator. Por ello, para la obtención de una solución a dichas ecuaciones se suelen emplear cambios de variable que las simplifiquen. Una de esas transformaciones es la conocida como transformada d-q, que es la que se aplicará en el presente informe de suficiencia.

3.1.2 Nociones Básicas

Mediante la transformación en coordenadas d-q, a partir de un sistema trifásico, ya sea de tensiones, intensidades o flujos, supuesto sobre un sistema de ejes a-b-c que forman 120°, se obtiene un sistema equivalente de tensión, intensidad o flujo, asociado a unos ejes que forman 90°, llamados d-q, y que giran a una determinada velocidad. Para obtener las componentes d-q se proyectan las componentes V_a , V_b y V_c sobre los ejes d-q sobre los que se desea obtener la transformación; las proyecciones resultantes son las correspondientes componentes V_d y V_q (ver Fig. 3.1). Dichas proyecciones se puede obtener mediante la expresión matricial:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_0 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \Leftrightarrow V_{qd0} = KV_{abc} \quad (3.1)$$

Donde:

- V_a , V_b y V_c representan el conjunto de señales trifásicas situadas sobre los ejes a, b y c, respectivamente.
- V_d y V_q representan los valores de las componentes a, b y c proyectadas sobre los ejes d y q respectivamente.

- V_0 es el valor medio el valor de las componentes a, b y c, llamada componente de secuencia cero.

Siendo la matriz k de transformación:

$$K = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen} \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Donde además, la variable θ representa el ángulo que forman los ejes d-q elegidos con los a-b-c. Dicho ángulo se puede poner en función de la velocidad de giro relativa ω de los ejes d-q con respecto a los ejes a-b-c

$$\theta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta_0 \quad (3.3)$$

$v_q = 2/3(OA+OB+OC)$
 $OA = v_a \cos \theta$
 $OB = v_b \cos(\theta - 2\pi/3)$
 $OC = v_c \cos(\theta - 2\pi/3)$
 $v_d = -2/3(OD+OE+OF)$
 $OD = v_a \text{sen} \theta$
 $OE = v_b \text{sen}(\theta - 2\pi/3)$
 $OF = v_c \text{sen}(\theta - 2\pi/3)$

Fig. 3.1: Ejes que intervienen en la transformación d-q.

Ha de tenerse en cuenta que el ángulo θ que aparece en la ecuación anterior representa un ángulo eléctrico, lo mismo ocurre con la velocidad ω . En una máquina eléctrica, el ángulo que representa el desplazamiento entre los ejes eléctricos de rotor y estator, es igual al número de pares de polos "p" por el ángulo mecánico existente entre rotor y estator. O, dicho de otro modo, cada vuelta del rotor corresponde a "p" ciclos de las magnitudes eléctricas tanto de estator como de rotor. Se establecen por ello las relaciones:

$$\omega = p\omega_m, \quad \theta = p\theta_m \quad (3.4)$$

Donde w_m es la velocidad mecánica y θ_m es el ángulo mecánico, de forma que:

$$w_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3.5)$$

Para la transformación inversa, de coordenadas d-q a coordenadas a-b-c, se emplean las expresiones:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow V_{abc} = K^{-1} V_{qd0} \quad (3.6)$$

Donde:

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

En ocasiones es necesario relacionar las componentes o coordenadas obtenidas sobre distintos ejes d-q (ver Fig. 3.2), para ello se emplea la ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_q^y \\ V_d^y \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y - \theta_x) & \sin(\theta_y - \theta_x) & 0 \\ -\sin(\theta_y - \theta_x) & \cos(\theta_y - \theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q^x \\ V_d^x \\ V_0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow V_{qd0}^y = K^{x \rightarrow y} V_{qd0}^x \quad (3.8)$$

Donde:

- $\theta_y - \theta_x$ representa el ángulo que el eje q_y (o d_y) forma con el eje q_x (o d_x)
- V_{qd0}^x y V_{qd0}^y son las coordenadas en los ejes d_x - q_x y d_y - q_y respectivamente.
- $K^{x \rightarrow y}$ es la matriz de paso de coordenadas d_x - q_x a d_y - q_y

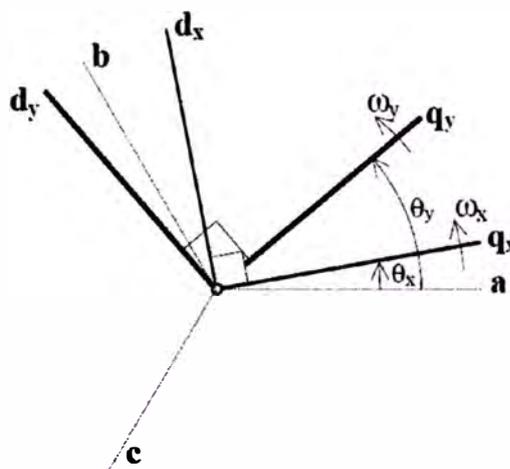


Fig. 3.2: Relación entre dos sistemas de ejes d-q.

Considerando un sistema equilibrado, se pueden tener las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} V_{sa}(t) &= \sqrt{2}V_s \left[\cos(\omega_e t + \theta_{s,0}) \right] \\ V_{sb}(t) &= \sqrt{2}V_s \left[\cos(\omega_e t + \theta_{s,0} - \frac{2}{3}\pi) \right] \\ V_{sc}(t) &= \sqrt{2}V_s \left[\cos(\omega_e t + \theta_{s,0} + \frac{2}{3}\pi) \right] \end{aligned} \quad (3.9)$$

Donde se puede comprobar que la componente de secuencia cero es nula ($V_0=0$).

Con esta consideración, las ecuaciones 3.1, 3.6 y 3.8, se pueden reducir a:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \Leftrightarrow V_{qd} = K V_{abc} \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} \Leftrightarrow V_{abc} = K^{-1} V_{qd} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} V_q^y \\ V_d^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y - \theta_x) & -\sin(\theta_y - \theta_x) \\ \cos(\theta_y - \theta_x) & \cos(\theta_y - \theta_x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q^x \\ V_d^x \end{bmatrix} \Leftrightarrow V_{qd}^y = K^{x \rightarrow y} V_{qd}^x \quad (3.12)$$

Donde se puede ver que:

$$K^{-1} = \frac{3}{2} K^T \quad (3.13)$$

Hay una serie de relaciones de la matriz de transformación k que serán de utilidad, como son:

$$\frac{d}{dt} K^{-1} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \omega \quad (3.14)$$

$$K \frac{d}{dt} K^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \omega \quad (3.15)$$

3.1.3 Notación Compleja

Las anteriores relaciones se pueden expresar de una forma más compacta si se emplea una notación compleja (o polar) y no se considera la componente homopolar, entonces:

$$\tilde{V}_{qd} = V_{qd}(t)e^{j(t)} = V_q + jV_d \quad (3.16)$$

El paso a coordenadas d-q se puede poner como:

$$\tilde{V}_{qd} = \frac{2}{3} \left\{ V_a e^{-j\theta} + V_b e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3})} + V_c e^{-j(\theta + \frac{2\pi}{3})} \right\} \quad (3.17)$$

Donde el término correspondiente a la descomposición en coordenadas d-q es, en general, una función temporal. Por ejemplo, respecto a un sistema de ejes estacionario as - bs - cs con ángulo inicial nulo se obtiene:

$$\tilde{V}_{sqd}^s = \frac{2}{3} \left\{ V_{as} + V_{bs} e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_{cs} e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right\} \quad (3.18)$$

Donde V_{as} , V_{bs} y V_{cs} son las tensiones sobre el sistema de ejes estacionarios as - bs - cs. La transformación a coordenadas a-b-c es:

$$\begin{aligned} V_a &= \text{real} \left\{ \bar{V}_{qd} e^{j\theta} \right\} \\ V_b &= \text{real} \left\{ \bar{V}_{qd} e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3})} \right\} \\ V_c &= \text{real} \left\{ \bar{V}_{qd} e^{j(\theta + \frac{2\pi}{3})} \right\} \end{aligned} \quad (3.19)$$

En la Tabla 3.1 se muestra la notación empleada en la notación compleja.

Tabla 3.1: Sistemas de referencia [S/N]

	Representa la variación temporal de las componentes q-d: ~ variable — constante
	Representa al sistema de ejes q-d sobre el que se obtienen las componentes. s: estacionario ($\omega=0$) e: síncrono ($\omega=\omega_e$) r: solidario al rotor de una máquina eléctrica ($\omega=\omega_r$)
	Indica que esta cantidad representa la descomposición compleja de la componentes q-d
	Representa al sistema de ejes a-b-c del que se obtienen las componentes q-d: s: estacionario r: solidario al rotor de una máquina eléctrica (ω_r)

Dados los sistemas de ejes de referencia (ver Fig. 3.2), dx-qx y dy-qy el paso de uno a otro quedaría de la forma:

$$\tilde{V}_{qd}^Y = \tilde{V}_{qd}^X e^{-j(\theta_Y - \theta_X)} \quad (3.20)$$

3.1.4 Sistemas Trifásicos Equilibrados

Una de las aplicaciones habituales de la transformación d-q es la de su aplicación en sistemas trifásicos equilibrados. Para indicar las consecuencias de su aplicación sobre sistemas de este tipo, se toma como ejemplo el sistema trifásico de tensiones mostrado a continuación, el cual se sitúa sobre unos ejes estacionarios as- bs-cs como los de la Fig 3.1:

$$\begin{aligned} V_{sa}(t) &= \sqrt{2}V_s \cos(\omega_e t + \theta_{1,0}) \\ V_{sb}(t) &= \sqrt{2}V_s \cos(\omega_e t + \theta_{1,0} - \frac{2}{3}\pi) \\ V_{sc}(t) &= \sqrt{2}V_s \cos(\omega_e t + \theta_{1,0} + \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Donde:

- ω_e es la denominada frecuencia, o velocidad, síncrona.
- V_s es el valor eficaz de las tensiones.
- $\theta_{1,0}$ es la fase de las tensiones.

En cuanto al sistema de referencia d-q se puede tomar su ángulo con respecto al sistema estacionario como:

$$\theta = \omega t + \theta_0 \quad (3.22)$$

Donde θ_0 es el ángulo inicial, el cual se supone =0; por lo tanto, la descomposición en coordenadas d-q del sistema de tensiones descrito en las ecuaciones 3.21, es:

$$\tilde{V}_{sqd} = \sqrt{2}V_s e^{j(\theta_1 - \theta)} = \sqrt{2}\bar{V}_s e^{j(\omega_e - \omega)t} \quad (3.23)$$

Donde V_s representa al fasor de tensión de la fase as, y θ_1 el ángulo; el cual se puede representar como:

$$\theta_1 = \omega_e t + \theta_{1,0} \quad (3.24)$$

El sistema de tensiones trifásico se puede representar por un vector que gira a velocidad ω_e con respecto a un sistema de ejes estacionarios. El módulo V_s y fase inicial $\theta_{1,0}$; dicho vector se puede representar por el fasor de tensión V_s :

$$\bar{V}_s e^{j\omega_e t} = V_s e^{j\theta_{1,0}} e^{j\omega_e t} \quad (3.25)$$

Si se escoge un sistema de referencia estacionario ds – qs ($\omega=0$) de forma que el eje q coincida con el eje a ($\theta_0 = 0$), se obtiene una representación en coordenadas d-q:

$$\tilde{v}_{sqd}^s = \sqrt{2} \bar{v}_s e^{j\omega_s t} = \bar{v}_{sqd}^e e^{j\omega_s t} \quad (3.26)$$

La cual coincide con el vector rotatorio de tensión indicado en (3.25). En cambio si la elección de los ejes d-q corresponden a unos con ángulo inicial cero y que giran a la velocidad síncrona ($\omega = \omega_e$) entonces, la descomposición de \bar{v}_{sqd}^e es un valor complejo constante, proporcional al fasor de tensión de la fase a. Es decir:

$$\tilde{v}_{sqd}^e = \bar{V}_{sqd}^e = \sqrt{2} \bar{V}_s \quad (3.27)$$

A resultados similares se llega cuando el sistema de tensiones trifásico está sobre un sistema de referencia móvil ar - br - cr (p.ej. el rotor de una máquina eléctrica) y cuya expresión es de la forma:

$$\begin{aligned} V_{ra}(t) &= \sqrt{2} V_r \cos(\omega_2 t + \theta_{2,0}) \\ V_{rb}(t) &= \sqrt{2} V_r \cos(\omega_2 t + \theta_{2,0} - \frac{2}{3} \pi) \\ V_{rc}(t) &= \sqrt{2} V_r \cos(\omega_2 t + \theta_{2,0} + \frac{2}{3} \pi) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Donde:

- ω_2 es la frecuencia de las tensiones sobre el sistema móvil.
- V_r es el valor eficaz de las tensiones.
- $\theta_{2,0}$ es la fase de las tensiones.

Sobre un eje dr - qr solidario al sistema móvil ar - br - cr y con ángulo inicial nulo se obtiene:

$$\tilde{v}_{rqd}^r = \sqrt{2} \bar{V}_r e^{j\omega_2 t} V \quad (3.29)$$

Donde V_r es el fasor de tensión de la fase ar del rotor.

Si el sistema escogido gira a la velocidad síncrona ω_e con respecto a un eje estacionario, y su ángulo inicial con respecto al rotor es cero se obtiene:

$$\tilde{v}_{rqd}^e = \tilde{v}_{rqd}^r e^{-j(\theta_r - \theta_e)} = \sqrt{2} \bar{V}_r e^{j(\theta_r + \theta_e - \theta_r)} \quad (3.30)$$

De forma que, si la frecuencia de las tensiones V_{ra} , V_{rb} y V_{rc} es igual a la diferencia entre la velocidad síncrona y la del rotor ($\omega_2 = \omega_e - \omega_r$) tal y como sucede en el funcionamiento de una máquina asíncrona, y suponiendo que ($\theta_{r0} = \theta_{e0} = 0$) se obtiene un número complejo constante proporcional al fasor de tensión:

$$\bar{V}_{rqd}^e = \sqrt{2} \bar{V}_r V \quad (3.31)$$

En el caso de que las velocidades ω_1 y ω_2 sean constantes, la expresión (3.30) se puede representar como:

$$\tilde{V}_{rqd}^e = \tilde{V}_{rqd}^r e^{-j(\omega_s - \omega_r)t} = \sqrt{2} \bar{V}_r e^{j(\omega_r + \omega_2 - \omega_s)t} \quad (3.32)$$

3.1.5 Elementos Pasivos en Sistemas Estacionarios y Coordenadas d-q

En este apartado se describirán las ecuaciones en coordenadas d-q para los elementos pasivos de tipo resistivo, capacitivo e inductivo compuesto por elementos invariantes en el tiempo, trifásicos y equilibrados, situados, además, sobre unos ejes as - bs - cs estacionarios.

a) Elementos Resistivos

Las ecuaciones de un elemento resistivo trifásico y equilibrado (ver Fig. 3.3) se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \Leftrightarrow V_{sabc} = R_s I_{sabc} \quad (3.33)$$

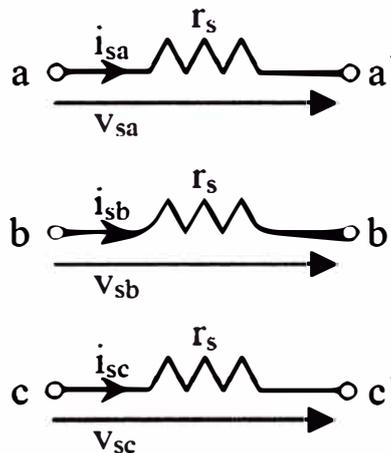


Fig. 3.3: Circuito resistivo trifásico y equilibrado.

Mediante la transformación en coordenadas d-q (ver Fig. 3.4) se llega a una expresión matricial:

$$V_{sqd} = R_{qds} I_{sqd} \quad (3.34)$$

Donde:

$$R_{qds} = k R_s k^{-1} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Por otro lado, mediante la notación compleja (ver Fig. 3.4), se llega a:

$$\tilde{V}_{sqd} = r_s \tilde{I}_{sqd} \quad (3.36)$$

Habitualmente, tanto las líneas como las cargas en los estudios dinámicos se suelen considerar equilibrados. En este caso las expresiones descritas son perfectamente válidas. Sin embargo, en el caso de sistemas desequilibrados la matriz R_{sqd} contendrá elementos

que varían sinusoidalmente a lo largo del tiempo, excepto cuando se consideren unos ejes d-q estacionarias ($\theta = \text{cte.}$).

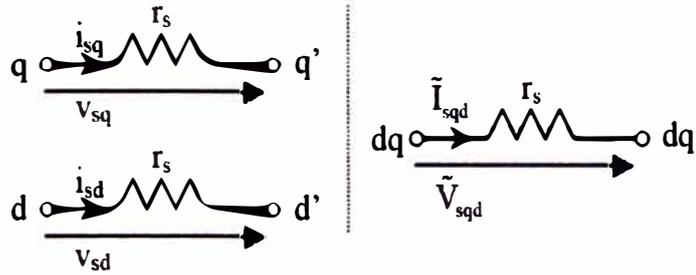


Fig. 3.4: Equivalente en coordenadas d-q de un circuito resistivo.

b) Elementos Inductivos

Las ecuaciones en coordenadas as - bs - cs de los elementos inductivos son:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{bmatrix} \Leftrightarrow V_{sabc} = \frac{d}{dt} \Lambda_{sabc} \quad (3.37)$$

Donde los valores λ_{sa} , λ_{sb} , λ_{sc} representan los flujos concatenados por las bobinas a, b y c respectivamente. Aplicando las expresiones para la obtención de las coordenadas d-q se llega a:

$$V_{sqd} = k_s \frac{d}{dt} (k_s^{-1} \Lambda_{sqd}) = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \Lambda_{sqd} + \frac{d\Lambda_{sqd}}{dt} \quad (3.38)$$

Si se tiene en cuenta la relación existente entre los flujos y las intensidades dadas por la matriz de acoplamiento, y supuesto un sistema trifásico y equilibrado (ver Fig. 3.5), se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & l_m & l_m \\ l_m & l_s & l_m \\ l_m & l_m & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \Lambda_{sabc} = L_s I_{sabc} \rightarrow V_{sabc} = L_s \frac{d}{dt} I_{sabc} \quad (3.39)$$

Donde:

- l_s es el coeficiente de auto-inducción de cada una de las bobinas
- l_m es el coeficiente de inducción mutua entre las bobinas
- L_s es la matriz de acoplamiento

En el caso en que la matriz de acoplamiento sea constante, la correspondiente descomposición en coordenadas d-q (ver Fig. 3.6) es:

$$V_{sqd} = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} L_{sqd} I_{sqd} + L_{sqd} \frac{dI_{sqd}}{dt} \quad (3.40)$$

Donde:

$$L_{sqd} = k_s L_s k_s^{-1} = \begin{bmatrix} l_s - l_m & 0 \\ 0 & l_s - l_m \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

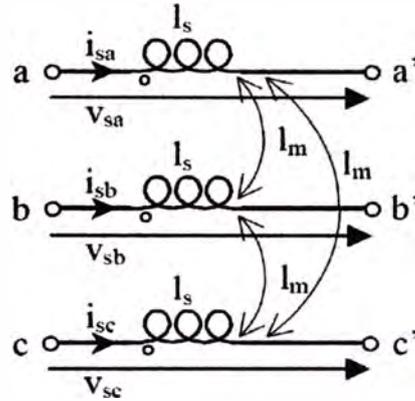


Fig. 3.5: Circuito inductivo trifásico y equilibrado.

Empleando la notación compleja se obtiene (ver Fig. 3.6) la expresión:

$$\tilde{V}_{sqd} = (l_s - l_m) \frac{d}{dt} \tilde{I}_{sqd} + j\omega(l_s - l_m) \tilde{I}_{sqd} \quad (3.42)$$

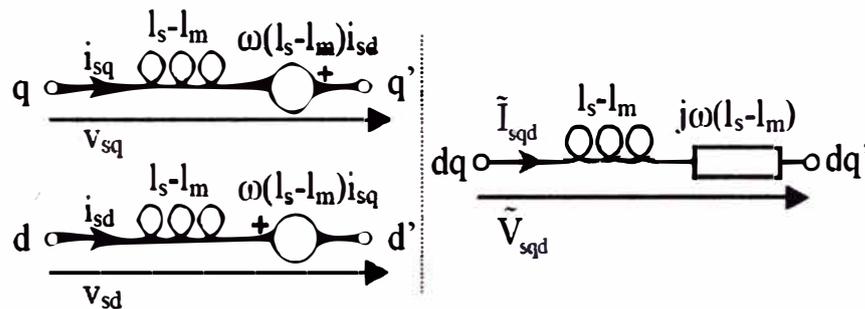


Fig. 3.6: Equivalente en coordenadas d-q de un circuito inductivo.

c) Elementos Capacitivos:

Las ecuaciones en coordenadas as - bs - cs de los elementos inductivos son:

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_{sa} \\ q_{sb} \\ q_{sc} \end{bmatrix} \Leftrightarrow i_{sabc} = \frac{d}{dt} q_{sabc} \quad (3.43)$$

Donde q_{sa} , q_{sb} y q_{sc} son las cargas de los condensadores de cada fase. Si se tiene en cuenta la relación existente entre la carga de un condensador y su tensión en un sistema trifásico y equilibrado (ver Fig. 3.7), se obtienen las relaciones:

$$\begin{bmatrix} q_{sa} \\ q_{sb} \\ q_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_s & 0 & 0 \\ 0 & c_s & 0 \\ 0 & 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \Leftrightarrow Q_{sabc} = C_s V_{sabc} \rightarrow I_{sabc} = C_s \frac{d}{dt} V_{sabc} \quad (3.44)$$

Donde c_s es la capacidad de cada uno de los condensadores.

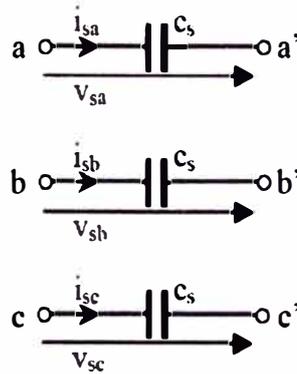


Fig. 3.7: Circuito capacitivo trifásico y equilibrado.

Operando análogamente a lo visto en apartados anteriores, se obtienen las expresiones (ver Fig. 3.8):

$$I_{sqd} = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} C_{sqd} V_{sqd} + C_{sqd} \frac{dV_{sqd}}{dt} \quad (3.45)$$

$$C_{sqd} = K_s C_s K_s^{-1} = \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & C_s \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$\tilde{I}_{sqd} = c_s \frac{d}{dt} \tilde{V}_{sqd} + j\omega c_s \tilde{V}_{sqd} \quad (3.47)$$

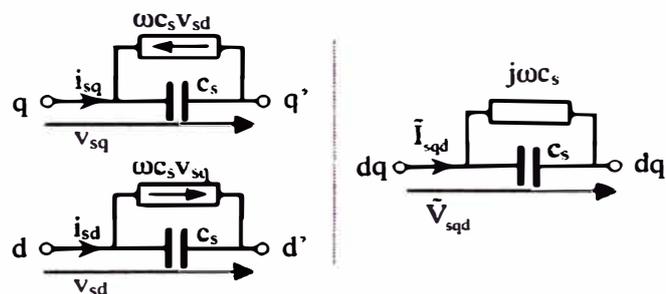


Fig. 3.8: Equivalente en coordenadas d-q de un circuito capacitivo.

3.1.6 Teoría de los Vectores Espaciales

Según la teoría de los vectores espaciales, una tensión de estator, como la presentada en la ecuación (3.21), tiene asociada un fasor espacial, el cual visto desde los ejes estacionarios (estator) se puede poner como:

$$\vec{V}_s^s(t) = V_{as} + V_{bs} e^{j\frac{2}{3}\pi} + V_{cs} e^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad (3.48)$$

Este vector, comparado con la representación mostrada en ecuaciones anteriores, es igual, salvo constantes, a la representación compleja en coordenadas d – q cuando, tanto el sistema de referencia a – b – c y el d - q son estacionarios, y, en el instante inicial, los ejes a y q son coincidentes ($\theta=0$); en otras palabras:

$$\vec{V}_s^s(t) = \frac{2}{3} \tilde{V}_{sqd}^s \quad (3.49)$$

Si el fasor espacial se representa con respecto a un sistema que gira a la velocidad síncrona, entonces su representación se multiplica por $e^{-j\omega_s t}$ quedando de la forma:

$$\vec{V}_s^e(t) = \vec{V}_s^s(t) e^{-j\omega_s t} \quad (3.50)$$

El cual es una vez más proporcional a la correspondiente transformación d - q:

$$\vec{V}_s^e(t) = \frac{2}{3} \tilde{V}_{sqd}^e \quad (3.51)$$

Igualmente si se tiene un sistema de tensiones trifásico y equilibrado sobre un sistema de referencia móvil (rotor) su representación con respecto al rotor se puede poner como:

$$\vec{V}_r^r(t) = \frac{2}{3} \tilde{V}_{rqd}^r \quad (3.52)$$

De forma similar se podría seguir comparando las expresiones obtenidas mediante fasores espaciales y transformación en coordenadas d - q y se llega a la conclusión de que teniendo en cuenta la constante de $\frac{2}{3}$ ambas representaciones son equivalentes.

3.2 Ecuaciones de la Máquina Asíncrona

3.2.1 Ecuaciones Eléctricas en Coordenadas a-b-c

En la Fig. 3.9 se puede ver los ejes a - b - c de una máquina asíncrona con un par de polos. Los denominados $a_s - b_s - c_s$ están sólidamente unidos al estator (estacionarios) y los $a_r - b_r - c_r$ se mueven con el rotor.

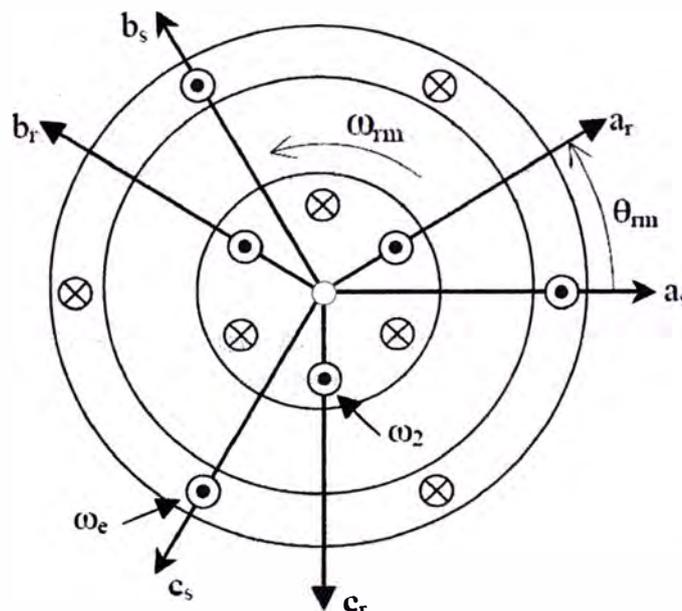


Fig. 3.9: Situación de los ejes a-b-c en una máquina asíncrona.

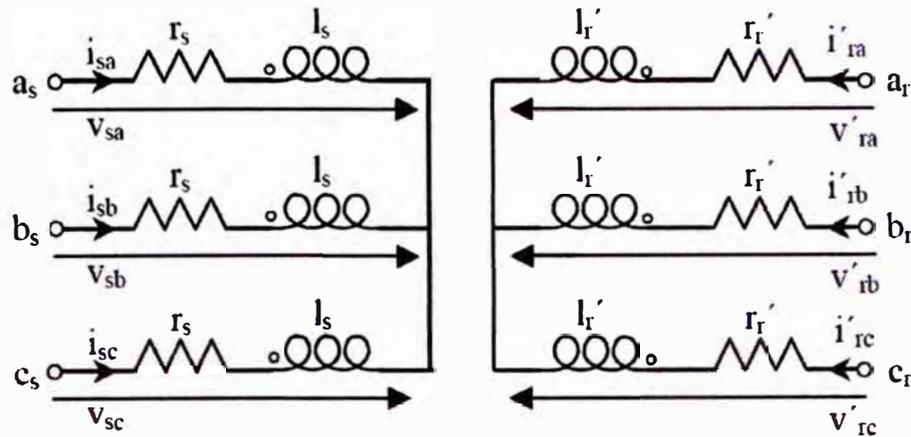


Fig. 3.10: Esquema eléctrico de una máquina asíncrona.

En la Fig. 3.10 se puede observar el esquema eléctrico de una máquina asíncrona, en donde todos los parámetros y variables del rotor se reducen al estator. Por ejemplo, las tensiones e intensidades del rotor reducidas al estator se pueden poner como:

$$V'_{ra} = \frac{N_s}{N_r} V_{ra}; V'_{rb} = \frac{N_s}{N_r} V_{rb}; V'_{rc} = \frac{N_s}{N_r} V_{rc}; \quad (3.53)$$

$$i'_{ra} = \frac{N_r}{N_s} i_{ra}; i'_{rb} = \frac{N_r}{N_s} i_{rb}; i'_{rc} = \frac{N_r}{N_s} i_{rc}; \quad (3.54)$$

donde N_r y N_s son el número de espiras de los devanados de estator y rotor respectivamente. Se considerará, de aquí en adelante, siempre que aparezca una variable de rotor se supondrá referida al estator; de esta forma se puede simplificar la notación omitiendo el superíndice “'”.

Para la obtención de las ecuaciones se supone una máquina equilibrada, con un entrehierro constante, y devanados de rotor distribuidos sinusoidalmente. Además, se desprecian los efectos de saturación e histéresis. Con estas consideraciones se obtiene:

$$V_{sabc} = R_s I_{sabc} + \frac{d}{dt} \Lambda_{sabc} \quad (3.55)$$

$$V_{rabc} = R_r I_{rabc} + \frac{d}{dt} \Lambda_{rabc} \quad (3.56)$$

Donde:

- $V_{sabc} = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T$ y $[V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$ son las tensiones trifásicas de estator y rotor, respectivamente.
- $I_{sabc} = [I_{sa} \ I_{sb} \ I_{sc}]^T$ y $[I_{ra} \ I_{rb} \ I_{rc}]^T$ son las intensidades trifásicas de estator y rotor, respectivamente.
- $\Lambda_{sabc} = [\lambda_{sa} \ \lambda_{sb} \ \lambda_{sc}]^T$ y $\Lambda_{rabc} = [\lambda_{ra} \ \lambda_{rb} \ \lambda_{rc}]^T$ son los flujos que concatenen a las bobinas estáticas y rotóricas, respectivamente.

- $R_s = \text{diag}([r_s \ r_s \ r_s])$ y $R_r = \text{diag}([r_r \ r_r \ r_r])$; representa la resistencia de los devanados rotóricos y estáticos, siendo r_s y r_r las resistencias del estator y rotor, respectivamente.

Por otra parte, suponiendo lineal la relación entre los flujos y las intensidades, está se puede poner como:

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{sabc} \\ \Lambda'_{srbc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s,abc} & L_{m,abc} \\ (L_{m,abc})^T & L_{r,abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sabc} \\ I_{rabc} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Teniendo en cuenta que se han despreciado los efectos de saturación e histéresis, las correspondientes matrices de acoplamiento en el estator (L_s), en el rotor (L_r) y de acoplamiento mutuos entre rotor y estator (L_m) son:

$$L_{s,abc} = \begin{bmatrix} l_{ls} + l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{ls} + l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{ls} + l_{ms} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$L_{r,abc} = \begin{bmatrix} l_{lr} + l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{lr} + l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{lr} + l_{ms} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$L_{m,abc} = l_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Donde:

- l_{ls} y l_{lr} son las inductancias de dispersión del estator y del rotor, respectivamente.
- l_{ms} es la inductancia de magnetización del estator y del rotor, además de la amplitud de la inductancia mutua entre el rotor y el estator.
- θ_r es el ángulo eléctrico que hay entre el rotor y el estator, el cual se corresponde con el ángulo mecánico (ver Fig. 3.9) multiplicado por el número de pares de polos, es decir: $\theta_r = p \theta_{rm}$

3.2.2 Ecuaciones Eléctricas en Coordenadas d-q

Tal y como se anticipaba en la descripción de la transformación d - q, el empleo de esta transformada puede simplificar las ecuaciones de la máquina asíncrona, tal y como se verá a continuación. El primer paso a dar es el de escoger unos ejes d - q sobre los que plantear las ecuaciones de la máquina. En este caso se eligen unos ejes d - q que giran a la velocidad síncrona (ver de-qe en Fig. 3.11). Aplicando las transformaciones vistas en el ítem 3.1; se obtienen las ecuaciones:

$$V_{sqd}^e = R_s I_{sqd}^e + k_s^e \frac{d}{dt} (k_s^e)^{-1} \Lambda_{sqd}^e + \frac{d}{dt} \Lambda_{sqd}^e \quad (3.61)$$

$$V_{rqd}^e = R_r I_{rqd}^e + k_r^e \frac{d}{dt} (k_r^e)^{-1} \Lambda_{rqd}^e + \frac{d}{dt} \Lambda_{rqd}^e \quad (3.62)$$

Donde:

- K_s^e es la matriz de transformación entre los ejes estacionarios as - bs - cs, situados en el estator, y los ejes de - qe que giran a la velocidad síncrona (ω_e).
- K_r^e es la matriz de transformación entre los ejes estacionarios as - bs - cs, situados sobre el rotor, y los ejes de - qe.

Las matrices de transformación a coordenadas de - qe son:

$$K_s^e = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_e & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

$$K_r^e = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e - \theta_r) & \cos(\theta_e - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_e - \theta_r) & -\sin(\theta_e - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

En las ecuaciones (3.63) y (3.64) aparecen los ángulos θ_e y θ_r que son, respectivamente, los que forman los ejes qe y ar con el eje as. Ángulos que se ajustan a las expresiones:

$$\begin{aligned} \theta_e &= \omega_e t + \theta_{e0} \\ \theta_r &= \int_0^t \omega_r d\tau + \theta_{r0} \end{aligned} \quad (3.65)$$

Donde:

- ω_r es la velocidad del rotor dada en coordenadas eléctricas, o sea, “p” veces la velocidad mecánica (ω_{rm}).
- ω_e es la denominada frecuencia síncrona, que se corresponde con la frecuencia de las tensiones e intensidades en el estator.
- θ_{e0} , θ_{r0} son ángulos iniciales que, por simplicidad, se pueden tomar igual a cero.

Operando sobre (3.61) y (3.62) se obtienen las expresiones:

$$\begin{bmatrix} V_{sqd}^e \\ V_{rkd}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sqd}^e \\ I_{rkd}^e \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} J & 0 \\ 0 & sJ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_{sqd}^e \\ \Lambda_{rkd}^e \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Lambda_{sqd}^e \\ \Lambda_{rkd}^e \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Donde:

$$R_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}; \quad R_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

$$J = \frac{1}{\omega_e} k_s^e \frac{d}{dt} (k_s^e)^{-1} = \frac{1}{s\omega_e} k_r^e \frac{d}{dt} (k_r^e)^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

y además “s” es el deslizamiento que se define como:

$$s = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} = \frac{\omega_e / p - \omega_{rm}}{\omega_e / p} \quad (3.69)$$

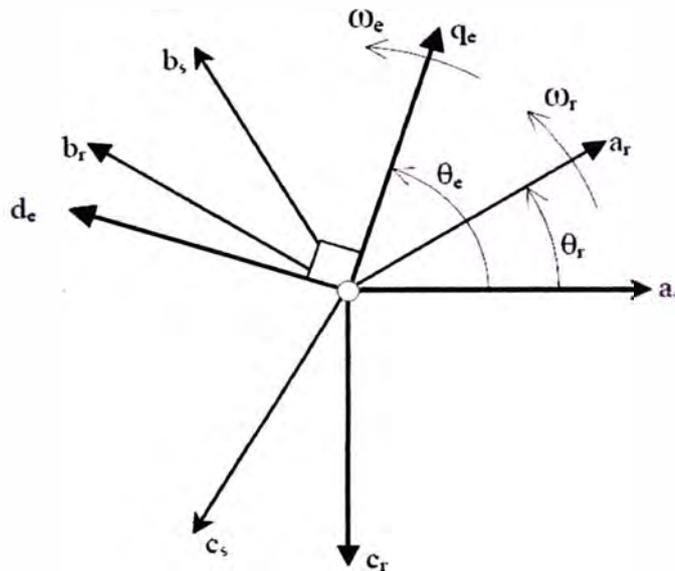


Fig. 3.11: Ejes empleados en la transformación d-q. La relación entre flujos e intensidades se ajusta a la expresión matricial:

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{sqd}^e \\ \Lambda_{rkd}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sqd}^e \\ I_{rkd}^e \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

Donde:

$$L_s = (K_s^e)^{-1} L_{s,abc} K_s^e = \begin{bmatrix} l_s & 0 \\ 0 & l_s \end{bmatrix}; L_r = (K_r^e)^{-1} L_{r,abc} K_r^e = \begin{bmatrix} l_r & 0 \\ 0 & l_r \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

$$L_m = (K_s^e)^{-1} L_{m,abc} K_r^e = \begin{bmatrix} l_m & 0 \\ 0 & l_m \end{bmatrix}$$

$$l_m = \frac{3}{2} l_{ms} \quad (3.72)$$

$$l_s = l_{ls} + l_m$$

$$l_r = l_{lr} + l_m$$

Mediante la notación compleja se pueden obtener unas expresiones más compactas como:

$$\bar{V}_{sqd}^e = r_s \bar{I}_{sqd}^e + j\omega_e \bar{\Lambda}_{sqd}^e + \frac{d}{dt} \bar{\Lambda}_{sqd}^e \quad (3.73)$$

$$\bar{V}_{rkd}^e = r_r' \bar{I}_{rkd}^e + js\omega_e \bar{\Lambda}_{rkd}^e + \frac{d}{dt} \bar{\Lambda}_{rkd}^e$$

$$\bar{\Lambda}_{sqd}^e = l_s \bar{I}_{sqd}^e + l_m \bar{I}_{rkd}^e \quad (3.74)$$

$$\bar{\Lambda}_{rkd}^e = l_m \bar{I}_{sqd}^e + l_r \bar{I}_{rkd}^e$$

3.2.3 Modelo Simplificado

El modelo mostrado en el apartado anterior admite varias simplificaciones que permiten un estudio más simple del comportamiento en régimen dinámico. Una de las consideraciones más habituales es la de despreciar los transitorios en el estator, o sea:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{sq} \\ \lambda_{sd} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.75)$$

Teniendo en cuenta (3.75) y (3.70) se obtiene la siguiente expresión para las corrientes rotóricas:

$$I_{rkd}^e = L_r^{-1} (\Lambda_{rkd}^e - L_m I_{sqd}^e) \quad (3.76)$$

Entonces de (3.66) se puede obtener las expresiones:

$$\frac{d}{dt} \Lambda_{rkd}^e = V_{rkd}^e - s\omega_e J \Lambda_{rkd}^e - \frac{1}{T_0'} (\Lambda_{rkd}^e - L_{rs} I_{sqd}^e) \quad (3.77)$$

$$\Lambda_{sqd}^e = L_m I_{rkd}^e + L_s I_{sqd}^e = L_m L_r^{-1} \Lambda_{rkd}^e + (L_s - L_m L_r^{-1} L_m) I_{sqd}^e \quad (3.78)$$

Donde $T_0' = l_{rr} / r_r$ es la constante de tiempo del rotor en cortocircuito. Según (3.78) y (3.66) se pueden expresar de las corrientes estáticas como:

$$V_{sqd}^e = R_s I_{sqd}^e - \omega_e J (L_m L_r^{-1} \Lambda_{rkd}^e + (L_s - L_m L_r^{-1} L_m) I_{sqd}^e) \quad (3.79)$$

Con el objeto de simplificar las expresiones obtenidas, se aplica el cambio de variable:

$$E_{qd} = \omega_e J L_m L_r^{-1} \Lambda_{rqd}^e \quad (3.80)$$

Lo que lleva a las expresiones para la máquina asíncrona:

$$\frac{d}{dt} E_{qd} = j\omega_e V_{rqd}^{e'} - s\omega_e J E_{qd} + \frac{l}{T_0'} (E_{qd} - (X_s - X') J) I_{sqd}^e \quad (3.81)$$

$$V_{sqd}^e - E_{qd} = R_s I_{sqd}^e + X' J I_{sqd}^e \quad (3.82)$$

Donde se definen las reactancias:

$$X_s = \omega_e l_{ss}; \quad X_{lr} = \omega_e l_{lr}; \quad X_{ls} = \omega_e l_{ls}; \quad X_m = \omega_e l_m \quad (3.83)$$

$$X' = (X_r X_s - X_m^2) / X_r = X_{ls} + X_{lr} X_m / (X_{lr} + X_{lm}) \quad (3.84)$$

Y la tensión del rotor modificada:

$$V_{rqd}^{e'} = V_{rqd}^e \frac{X_m}{X_{lr} + X_m} \quad (3.85)$$

Las ecuaciones (3.81) y (3.82) puestas en notación compleja son:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \tilde{E}_{qd} &= j\omega_e \tilde{V}_{rqd}^{e'} - js\omega_e \tilde{E}_{qd} - \frac{1}{T_0'} (\tilde{E}_{qd} - j(X_s - X') \tilde{I}_{sqd}^e) \\ V_{sqd}^e - \tilde{E}_{qd} &= R_s \tilde{I}_{sqd}^e + jX' \tilde{I}_{sqd}^e \end{aligned} \quad (3.86)$$

Estas ecuaciones admiten la representación de la Fig. 3.12.

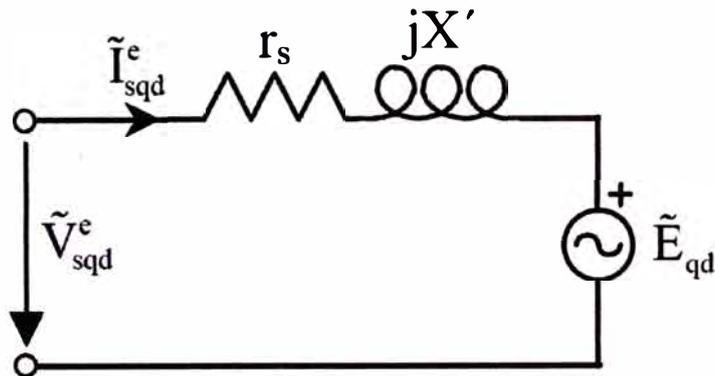


Fig. 3.12: Modelo Simplificado de la Máquina Asíncrona.

3.2.4 Ecuaciones Electromecánicas

Una vez obtenidas las ecuaciones eléctricas de la máquina asíncrona (ver apartados anteriores), es necesario la introducción de la correspondiente ecuación mecánica para determinar completamente su comportamiento, la cual, si se supone un funcionamiento como generador, es la siguiente:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} + D\omega_{rm} \quad Nm \quad (3.87)$$

Donde:

- T_m es el par mecánico motor.
- T_e es el par resistente de la máquina (par electromecánico).
- J es el momento de inercia de la máquina.
- D es el factor de rozamiento mecánico, generalmente se toma igual a cero.

Esta ecuación en por unidad (pu) se puede poner como:

$$T_m - T_e = 2H \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad pu \quad (3.88)$$

Donde H es la constante de inercia definida como la relación entre la energía cinética de la inercia girando a la velocidad base y la potencia base, su expresión es:

$$H = J \frac{\omega_{base}^2}{2p^2 S_{base}} \quad sg \quad (3.89)$$

Y el factor de rozamiento en pu es:

$$D_{pu} = D \frac{\omega_{base}^2}{2p^2 S_{base}} \quad pu \quad (3.90)$$

La interacción entre los campos magnéticos existentes en la superficie de rotor y las corrientes que por él circulan, es la que provoca la aparición del par electromecánico (T_e) que se opone al par de arrastre. Su expresión es:

$$T_e \frac{1}{pI_{ms}} = \left[i_{as} \left(i_{ar} - \frac{1}{2} i_{br} - \frac{1}{2} i_{cr} \right) + i_{bs} \left(i_{br} - \frac{1}{2} i_{ar} - \frac{1}{2} i_{cr} \right) + i_{cs} \left(i_{cr} - \frac{1}{2} i_{br} - \frac{1}{2} i_{ar} \right) \right] \text{sen} \theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} \left[i_{as} (i_{br} - i_{cr}) + i_{bs} (i_{cr} - i_{ar}) + i_{cs} (i_{ar} - i_{br}) \right] \text{cos} \theta_r \quad (3.91)$$

Sin embargo, cuando se emplean coordenadas $d - q$ se pueden obtener expresiones más sencillas para el par. Si se parte de que la potencia eléctrica consumida por la máquina tiene la expresión:

$$P_{ent} = \begin{bmatrix} V_{sa} & V_{sb} & V_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ra} & V_{rb} & V_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} = V_{sabc}^T I_{sabc} + V_{rabc}^T I_{rabc} \quad (3.92)$$

La cual en coordenadas $d - q$ es:

$$P_{ent} = \frac{3}{2} \left[(V_{sqd}^e)^T I_{sqd}^e + (V_{rqd}^e)^T I_{rqd}^e \right] \quad (3.93)$$

Y en notación compleja se obtiene que:

$$P_{ent} = \frac{3}{2} \left[\tilde{V}_{sqd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} + \tilde{V}_{rqd}^e \tilde{I}_{rqd}^{e*} \right] W \quad (3.94)$$

$$P_{ent} = \tilde{V}_{sqd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} + \tilde{V}_{rqd}^e \tilde{I}_{rqd}^{e*} \quad pu$$

Desarrollando esta ecuación se llega a:

$$P_{ent} = \frac{3}{2} \text{real} \left\{ r_s |\tilde{I}_{sqd}^e|^2 + r_r |\tilde{I}_{rqd}^e|^2 + \frac{d\tilde{\Lambda}_{sqd}^e}{dt} \tilde{I}_{sqd}^{e*} + \frac{d\tilde{\Lambda}_{rqd}^e}{dt} \tilde{I}_{rqd}^{e*} + \right. \\ \left. j\omega_e \tilde{\Lambda}_{sqd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} + js\omega_e \tilde{\Lambda}_{rqd}^e \tilde{I}_{rqd}^{e*} \right\} \quad (3.95)$$

Los dos primeros términos de (3.95) representan las pérdidas óhmicas en los devanados estáticos y rotóricos, por otra parte, los dos siguientes representan el ratio de intercambio de energía magnética entre rotor y estator. Por lo tanto, la potencia transferida a través del entrehierro está representada por los dos últimos términos, la cual dividida por la velocidad del rotor es el par electromecánico en el eje de la máquina:

$$T_e = -\frac{3p}{2\omega_r} \left[\omega_e (\lambda_{sd}^e i_{sq}^e - \lambda_{sq}^e i_{sd}^e) + \omega_e s (\lambda_{rd}^e i_{rq}^e - \lambda_{rq}^e i_{rd}^e) \right] \quad (3.96)$$

Teniendo en cuenta (3.70) se pueden obtener las siguientes relaciones:

$$\lambda_{sd}^e i_{sq}^e - \lambda_{sq}^e i_{sd}^e = -(\lambda_{rd}^e i_{rq}^e - \lambda_{rq}^e i_{rd}^e) = 1_{rs} (i_{sq}^e i_{rd}^e - i_{sd}^e i_{rq}^e) \quad (3.97)$$

De esta forma, la ecuación del par electromecánico se puede poner como:

$$T_e = \frac{-3p}{2} (\lambda_{sd}^e i_{sq}^e - \lambda_{sq}^e i_{sd}^e) = \frac{3p}{2} (\lambda_{rd}^e i_{rq}^e - \lambda_{rq}^e i_{rd}^e) = \frac{-3p}{2} 1_m (i_{sq}^e i_{rd}^e - i_{sd}^e i_{rq}^e) Nm \quad (3.98)$$

$$T_e = -\omega_e (\lambda_{sd}^e i_{sq}^e - \lambda_{sq}^e i_{sd}^e) = \omega_e (\lambda_{rd}^e i_{rq}^e - \lambda_{rq}^e i_{rd}^e) = -X_m (i_{sq}^e i_{rd}^e - i_{sd}^e i_{rq}^e) pu$$

O en notación compleja:

$$T_e = \frac{-3p}{2} \text{imag} \left\{ \tilde{\Lambda}_{sqd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} \right\} = \frac{3p}{2} \text{imag} \left\{ \tilde{\Lambda}_{rqd}^e \tilde{I}_{rqd}^{e*} \right\} = \frac{-3p 1_m}{2} \text{imag} \left\{ \tilde{I}_{rqd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} \right\} Nm \quad (3.99)$$

$$T_e = -\omega_e \text{imag} \left\{ \tilde{\Lambda}_{sqd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} \right\} = \omega_e \text{imag} \left\{ \tilde{\Lambda}_{rqd}^e \tilde{I}_{rqd}^{e*} \right\} = -X_m \text{imag} \left\{ \tilde{I}_{rqd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} \right\} pu$$

En el modelo simplificado se pueden emplear además las siguientes expresiones:

$$P_{ag} = \frac{3}{2} \text{real} \left\{ \tilde{E}_{qd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} \right\} W; \quad T_e = \frac{3p}{2\omega_e} \text{real} \left\{ \tilde{E}_{qd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} \right\} N.m \quad (3.100)$$

$$T_e = P_{ag} = \text{real} \left\{ \tilde{E}_{qd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} \right\} pu$$

Donde P_{ag} es la potencia entregada desde el estator al entrehierro de la máquina.

3.2.5 Estudio de la Máquina Asíncrona en Régimen Permanente

El estudio de la máquina asíncrona en régimen permanente se hará con la notación compleja, de esta forma, mediante las expresiones obtenidas mediante la transformada d-q, se pueden obtener resultados comparables directamente con los fasores del régimen estacionario senoidal si, por ejemplo, se eligen las bases adecuadas. Para el estudio en régimen permanente se toma:

$$\frac{d}{dt} \tilde{E}_{qd} = 0 \quad (3.101)$$

Por lo tanto se obtiene:

$$\bar{E}_{qd} = \frac{X_{rs}}{X_s} \frac{\bar{V}_{rqd}^e - r_r \bar{I}_{rqd}^e}{s} \quad (3.102)$$

Donde:

$$\bar{I}_{rqd}^e = \frac{(r_s + jX_s) \bar{V}_{rqd}^e - jsX_m \bar{V}_{sqd}^e}{(r_s + jX_s)(r_r + jsX_r) + sX_{rs}^2} \quad (3.103)$$

En este caso, el estudio del régimen permanente con el modelo completo o simplificado es equivalente, ya que en ambos modelos se cumple (3.75). El modelo en régimen permanente admite la representación mostrada en Fig. 3.13.

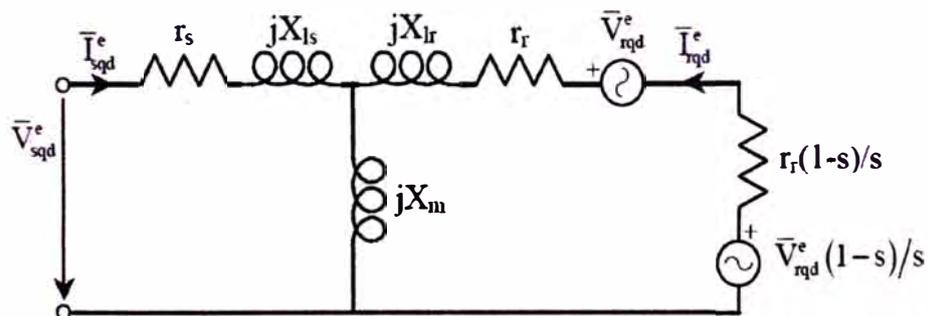


Fig. 3.13: Representación de la máquina asíncrona en régimen permanente.

Las potencias que intervienen en el funcionamiento en el régimen permanente son las mostradas en la Tabla 3.2 y en la Fig. 3.14, en donde se ha escogido el funcionamiento como generador, entregando energía hacia el rotor y el estator.

Tabla 3.2: Potencias de la máquina asíncrona en régimen permanente [S/N]

potencia entregada por la máquina al estator	$P_s = \frac{3}{2} \text{real} \left\{ \bar{V}_{sqd}^e \tilde{I}_{sqd}^{e*} \right\} \quad W \quad (3.104)$
potencia entregada por la máquina al rotor	$P_r = \frac{3}{2} \text{real} \left\{ \bar{V}_{rqd}^e \tilde{I}_{rqd}^{e*} \right\} \quad W \quad (3.105)$
pérdidas por efecto joule en los devanados del estator	$P_{s,cu} = -\frac{3}{2} r_s \bar{I}_{sqd}^e ^2 \quad W \quad (3.106)$
pérdidas por efecto joule en los devanados del rotor	$P_{r,cu} = -\frac{3}{2} r_r \bar{I}_{rqd}^e ^2 \quad W \quad (3.107)$
potencia electromecánica entregada por el eje	$P_e = -\left(\frac{3}{2}\right) \frac{1-s}{s} \left[r_r \bar{I}_{rqd}^e ^2 - \text{real} \left\{ \bar{V}_{rqd}^e \tilde{I}_{rqd}^{e*} \right\} \right] \quad W \quad (3.108)$
potencia transferida desde el estator al entrehierro	$P_{ag} = -\left(\frac{3}{2}\right) \frac{1}{s} \left[r_r \bar{I}_{rqd}^e ^2 - \text{real} \left\{ \bar{V}_{rqd}^e \tilde{I}_{rqd}^{e*} \right\} \right] \quad W \quad (3.109)$

CAPÍTULO IV

MARCO TEÓRICO - INVERSORES

4.1 Control de la tensión de salida del inversor

4.1.1 Índice de Modulación

Se define como índice de modulación a la relación entre el valor máximo de la tensión de control sinusoidal (V_c .max) y el valor máximo de la onda triangular (V_t .max).

$$m_a = \frac{\hat{V}_c}{\hat{V}_t} \quad (4.1)$$

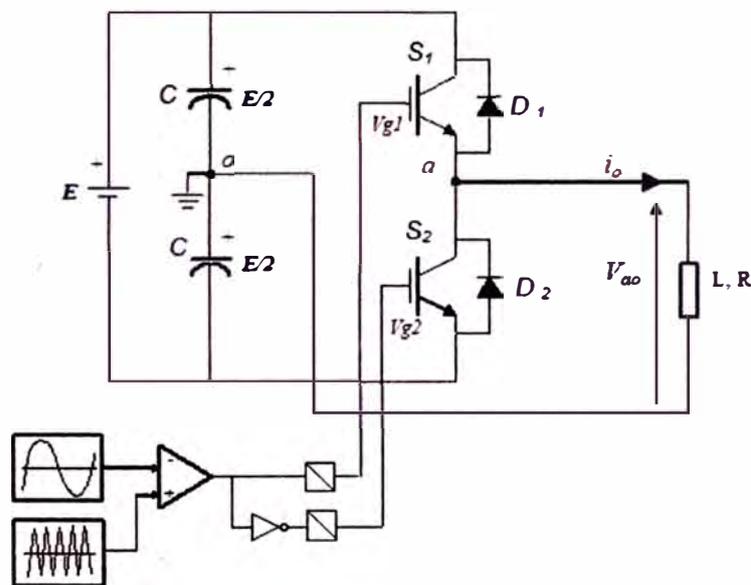
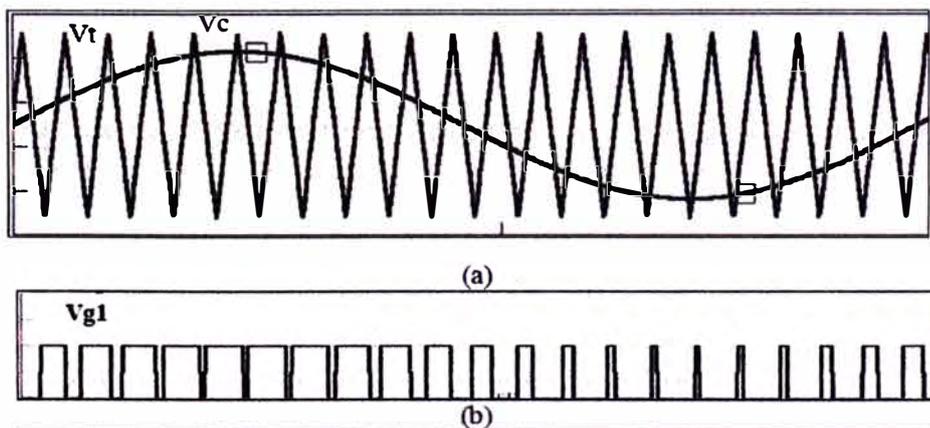


Fig. 4.1: Inversor de tensión monofásico medio puente con SPWM



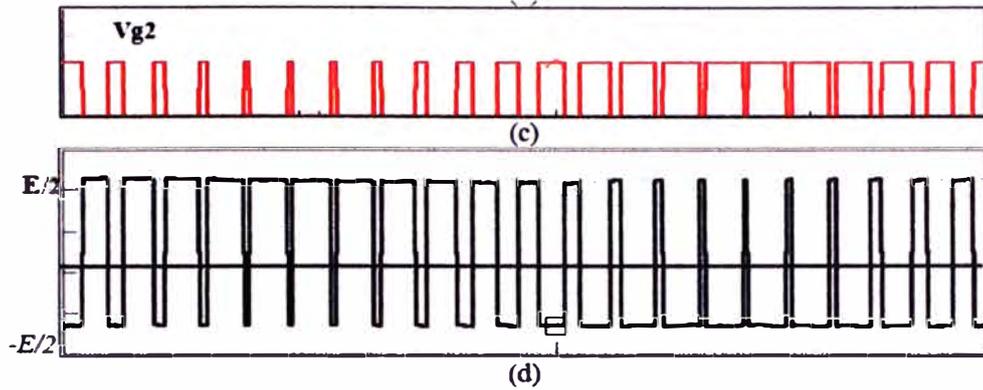


Fig. 4.2: Modulación senoidal SPWM para $IM = 0.8$ (a) Señales de control del modulador (b) y (c) Señales de control de los semiconductores S1 y S2 respectivamente (d) Tensión de salida resultante PWM

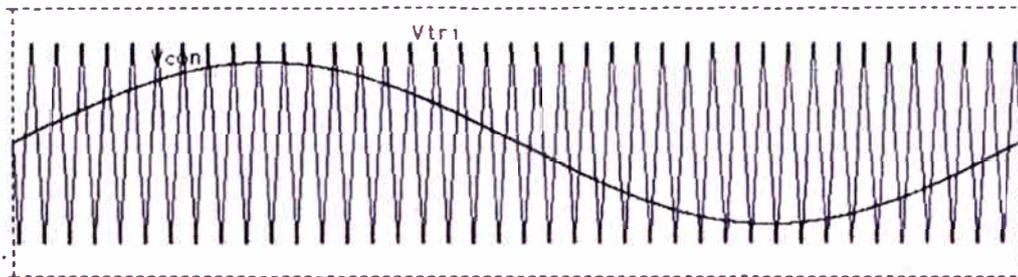


Fig. 4.3: Señales de control (V_{con}) y portadora (V_{tri}).

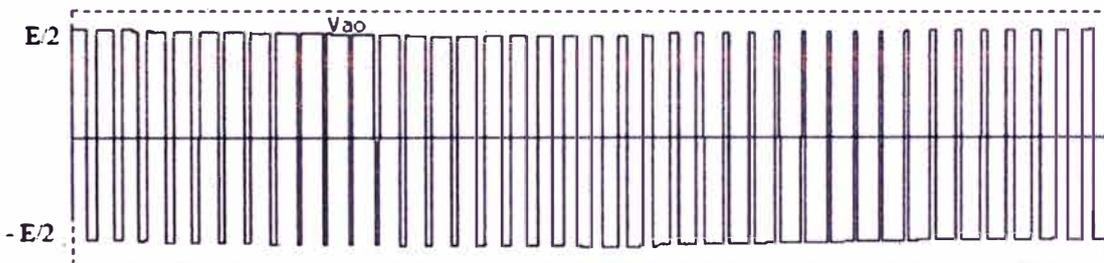


Fig. 4.4: Tensión V_{ao} de salida del inversor.

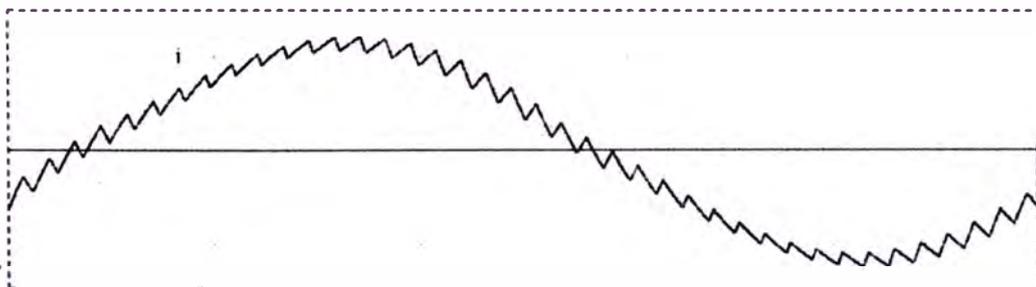


Fig. 4.5: Corriente i_o de carga

Así mismo se puede definir como índice de modulación “ m ”, a la relación entre la tensión en bornes del inversor V_{a01} y la tensión de salida de la fuente en continua $E/2$:

$$m = \frac{\hat{V}_{ao1}}{E/2}, \quad 0 \leq m \leq 1 \quad (4.2)$$

$$m = \frac{\hat{V}_{ao1}}{E/2} = \frac{\hat{V}_c}{\hat{V}_i} = m_a \quad (4.3)$$

$$\hat{V}_{ao1} = \left(\frac{E}{2}\right) \cdot m \quad (4.4)$$

$$\hat{V}_{ao1} = \left(\frac{E}{2}\right) \cdot m \quad (4.5)$$

La máxima componente fundamental de tensión que se puede obtener a la salida del inversor con este tipo de modulación es cuando $m = 1$ es decir

$$\hat{V}_{ao1(\text{máx})} = \frac{E}{2} \quad (4.6)$$

4.2 Operación del inversor conectado en la red eléctrica

4.2.1 Operación del inversor inyectado o absorbiendo potencia activa

En la figura 4.6 se muestra un esquema del inversor conectado a la red con el bloque de generación PWM sincronizado con la tensión de la red. Con este sistema se controla el ángulo de fase y la amplitud o el valor eficaz de la tensión del inversor V_c con referencia a la tensión de la red V_s . La figura 4.6 muestra los diagramas fasoriales correspondientes al control del flujo de potencia activa, donde se observa cómo se regula el ángulo de fase (δ) y amplitud (m) de la tensión V_c .

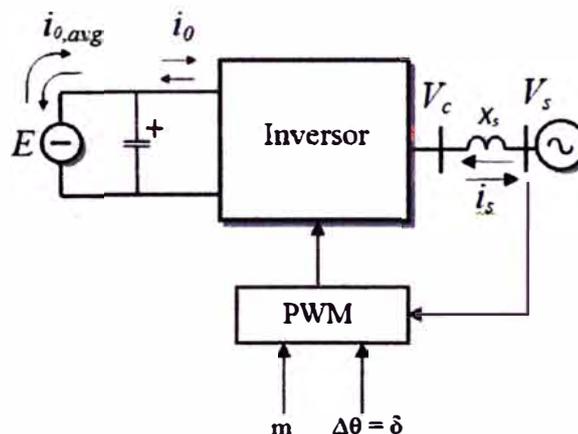


Fig. 4.6: Control del inversor conectado a la red.

En el primer caso, se regula la tensión del inversor para que la corriente de lado AC del inversor (i_{sa}) este en fase con la tensión de la red ($V_{sa,n}$) como se muestra en la figura 4.7(a). La red en este caso entrega potencia activa al convertidor que lo inyectada a la fuente E (operación como rectificador). En el segundo caso, se controla la tensión del inversor para colocar la corriente de lado AC del inversor (i_{sa}) en contrafase respecto a la

tensión de la red ($V_{sa,n}$) como en la figura 4.7(b) en este caso es el inversor que inyecta potencia activa a la red, potencia entregada o que viene de la fuente E (operación como inversor).

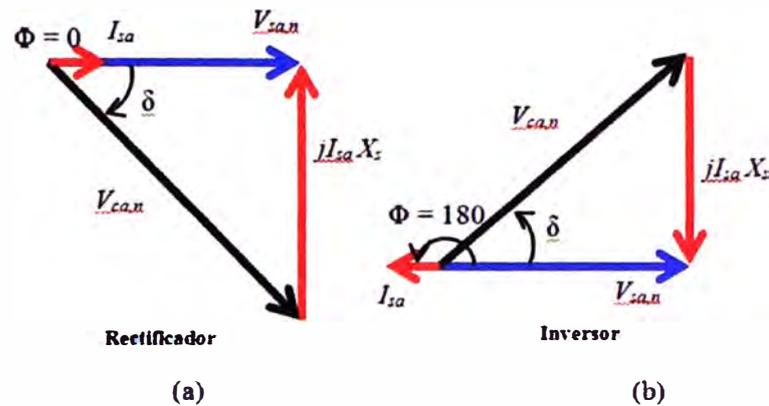


Fig. 4.7: Operación del convertidor conectado a la red (a) como rectificador (b) como inversor.

En la figura 4.8 muestra los resultados de simulación del inversor conectado a una red de potencia, donde el periodo de conducción de los semiconductores de potencia corresponde a $1/60$ s (seis pulsos) mientras que la amplitud $V_{ca,n}$ y la fase δ son modificados para cada caso.

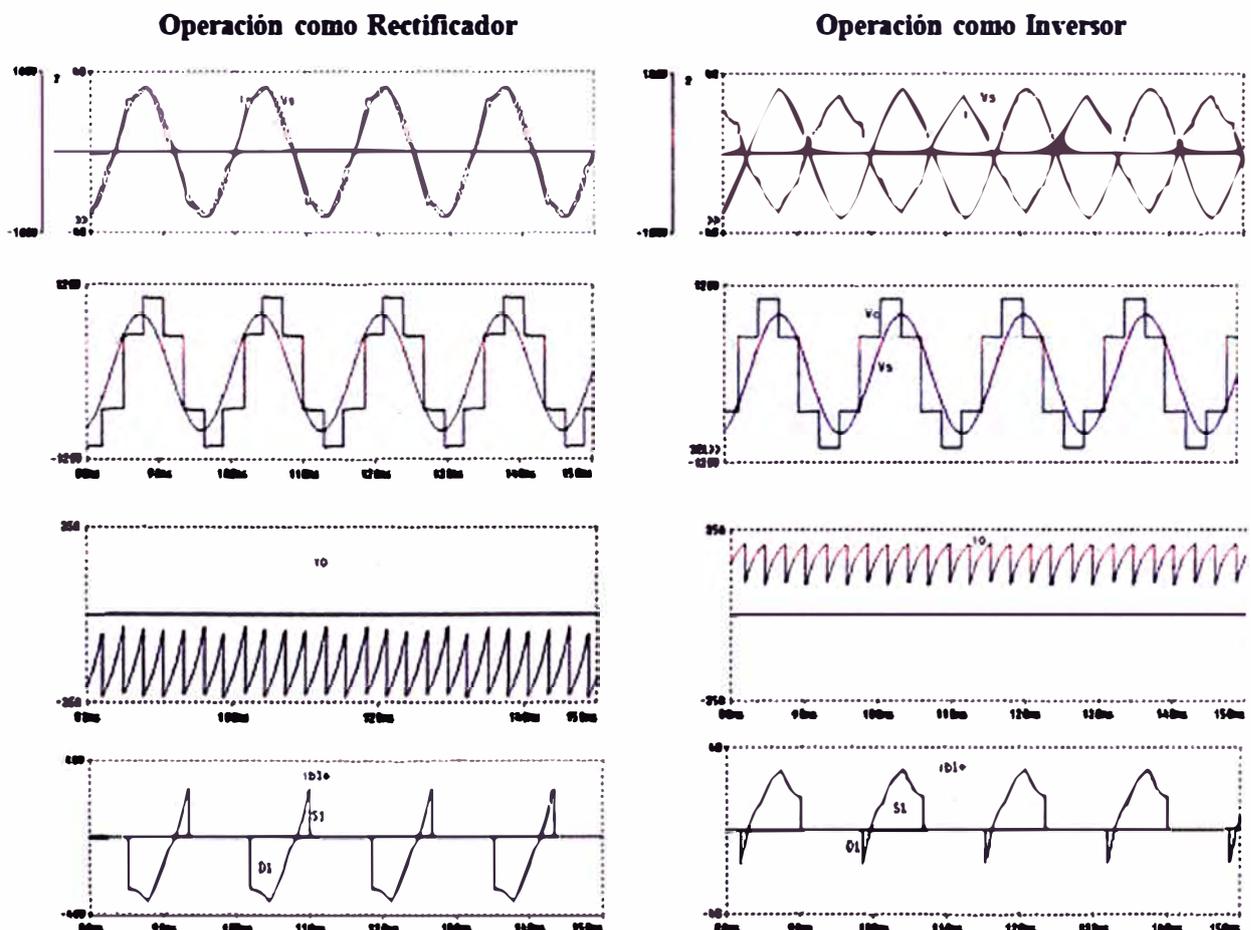


Fig. 4.8: Operación del VSC como rectificador y como inversor

En la operación de control de la potencia activa el factor de pot. es uno, es decir:

$$\cos \Phi = 1, \Phi = 0 \quad (4.7)$$

$$P_{3\phi} = 3 \cdot V_{sa,n} \cdot I_{sa} = E \cdot I_{0,avg} \quad (4.8)$$

$$I_{sa} = \frac{E \cdot I_{0,avg}}{3 \cdot V_{sa,n}} \quad (4.9)$$

$$V_{ca,n} = \sqrt{V_{sa,n}^2 + (I_{sa} \cdot X_s)^2} \quad (4.10)$$

$$m = \frac{V_{sa,n}}{E/2} \quad (4.11)$$

$$\delta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{I_{sa} \cdot X_s}{V_{sa,n}} \right) \quad (4.12)$$

CAPÍTULO V

MODELO DEL GENERADOR EÓLICO EN ESTADO ESTACIONARIO

5.1 Objetivo

A partir de las expresiones de cálculo indicadas en los capítulos II, III y IV, se procederá a modelar en estado estacionario, el generador VESTAS V80; para realizar cálculos para diferentes velocidades de viento y analizar su comportamiento a partir de los resultados obtenidos.

5.2 Procedimiento y Cálculo

Se comienza esquematizando los componentes del aerogenerador a analizar, con el fin de desacoplar las componentes y analizarlas de manera independiente. El esquema del aerogenerador a analizar es el siguiente:

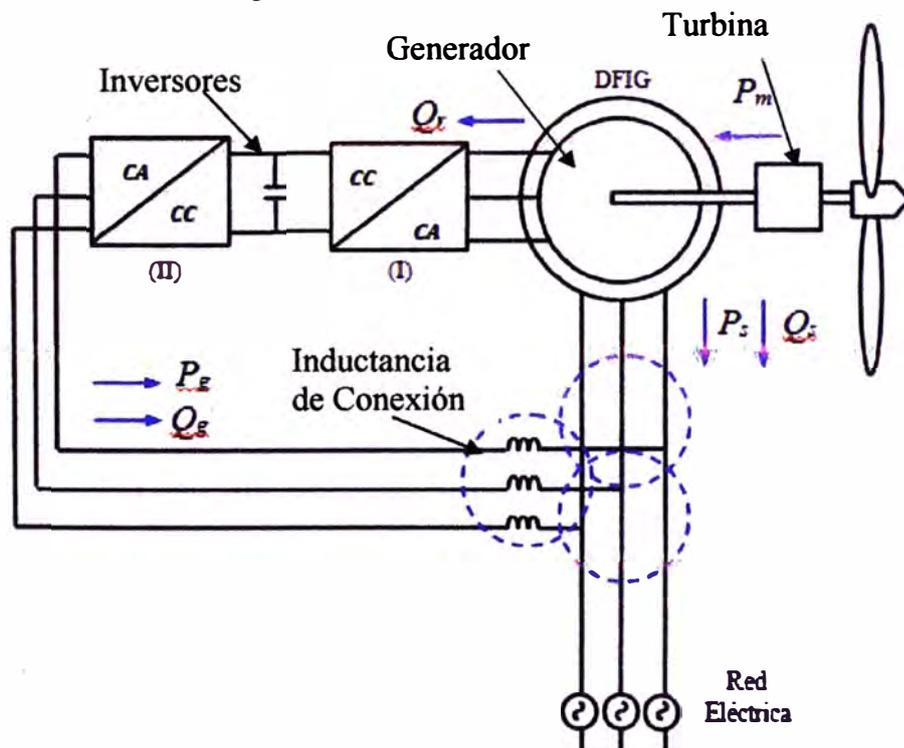


Fig. 5.1: Esquema de componentes del aerogenerador

En el esquema el P y Q representan las potencias activas y reactivas que fluyen a través de todo el aerogenerador; comenzando por la potencia que se aprovecha del viento a través de la turbina (P_m), la cual es transmitida a través del multiplicador hacia el

generador asíncrono; este a su vez entrega o absorbe potencia activa y reactivo a través de el estator (P_s y Q_s) y el rotor (P_r y Q_r). Luego a través del rectificador fluye la potencia activa P_r y entre la salida del segundo rectificador conectado a la red fluye una potencia activa y reactiva $P_g = P_r$ y Q_g , parte de la cual es consumida por la reactancia entre el rectificador y la red. Finalmente la potencia activa y reactiva que se entrega en bornes de la red será la suma de todas estas componentes.

Para realizar el cálculo comenzaremos analizando el primer componente, la Turbina, para lo cual se requieren los siguientes datos: Diámetro, área barrida, velocidad nominal, velocidad mínima y velocidad máxima del rotor; velocidad de viento para ingreso, velocidad nominal del viento y velocidad del viento para la salida; radio del multiplicador, velocidad mínima del generador y velocidad máxima del generador. También se requiere el modelo de la eficiencia de la turbina el cual es función del ángulo de paso y el TSR. Como dato del ambiente se requiere la densidad del aire.

En el siguiente cuadro se indican los datos solicitados:

Tabla 5.1.- Datos de la Turbina [1]

Diámetro del rotor	80.0 m	Velocidad del viento para ingreso	4.0 m/s
Área barrida por el rotor	5027.0 m²	Velocidad nominal del viento	15.0 m/s
Velocidad Nominal del rotor	16.7 rpm	Velocidad del viento para salida	25.0 m/s
Velocidad min del rotor	9.0 rpm	Radio del multiplicador	1/120
Velocidad max del rotor	19.0 rpm	velocidad min del generador	1320.0 rpm
densidad del aire	1.19 kg/m³	velocidad max del generador	2340.0 rpm

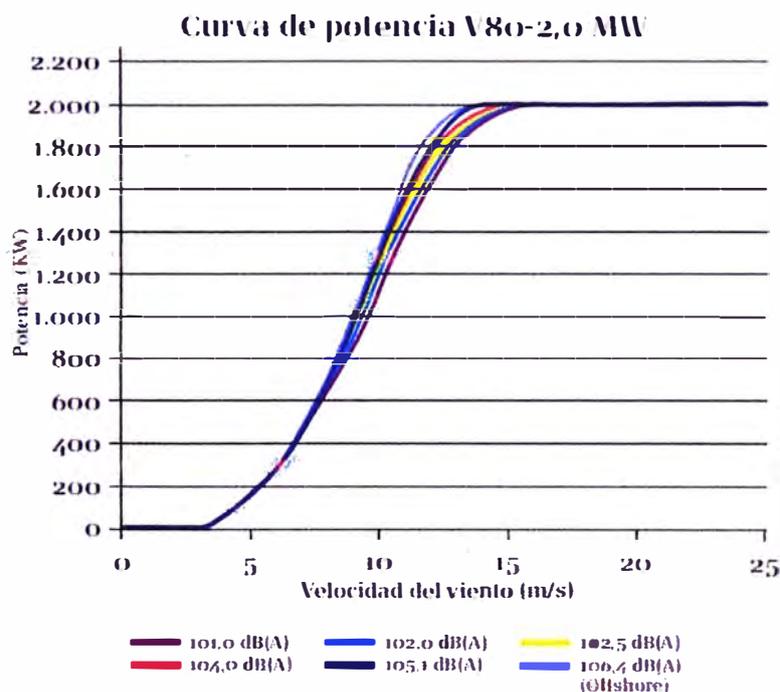


Fig. 5.2: Curva del fabricante de Potencia Vs Velocidad del Viento

De la gráfica se puede observar que la curva de potencia varía conforme se aumenta o disminuye el nivel de ruido emitido (dato del fabricante).

Segundo se procede a identificar los datos del segundo componente, el generador, cuyos parámetros eléctricos necesarios son: Potencia nominal, voltaje de línea, frecuencia, número de polos, factor de potencia, resistencia del estator, reactancia del estator, reactancia de magnetización, resistencia del rotor, resistencia del estator, resistencia de magnetización.

En el siguiente cuadro se indican los datos solicitados:

Tabla 5.2.- Datos del Generador [1]

Potencia Nominal (Pn)	2.0 MW	Resistencia del estator (Rs)	0.00164 ohm
Voltaje de línea (Va,b,c)	690.0 V	Reactancia del estator (Xs)	0.03000 ohm
frecuencia (f)	60.0 Hz	Reactancia de Magnetización (Xm)	1.62832 ohm
Numero de polos (2p)	4.0	Resistencia del rotor (Rr)	0.00105 ohm
Factor de potencia (f.p=cosphi)	1.00	Reactancia del rotor (Xr)	0.04300 ohm
		Resistencia de magnetización (Rm)	0.00000 ohm

De donde los valores de la reactancia y resistencia del rotor son con respecto al estator.

Tercero se procede a requerir los datos del inversor, tales como la tensión en bornes del condensador y la inductancia de conexión a la red. La tensión del condensador $V_{cond}=1200$ V y la inductancia de conexión entre el inversor y la red es de 0.001 henrio.

Luego de establecidos los datos del generador; procedemos a desarrollar el modelo de la eficiencia; como sabemos esta es función del ángulo de paso y el TSR; y es propio de cada generador. La curva de eficiencia de la turbina C_p es la siguiente:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.05176 \left[\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right] e^{-\frac{21}{\lambda_1}} + 0.00581\lambda \quad (5.1)$$

$$\lambda_1 = \left[\left(\frac{1}{0.855\lambda + 0.08\beta} \right) - \left(\frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \right]^{-1} \quad (5.2)$$

Donde λ = TSR(Tip-Speed-Ratio), representa la relación entre la velocidad periférica de la pala y la del viento; y β representa al ángulo de paso. Se procede a graficar el comportamiento de C_p para β igual a 0° , 2.5° , 5° , 7.5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° y 40° , y para cada β diferentes valores de λ ; obteniendo la siguiente grafica:

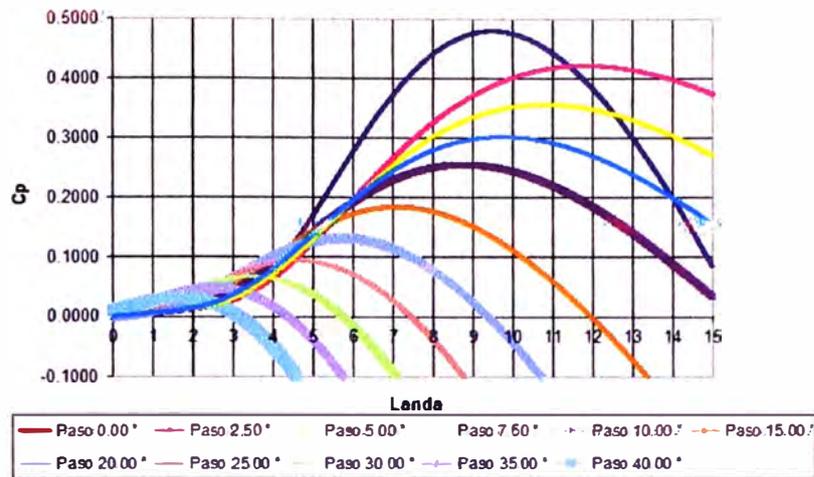


Fig. 5.3: Eficiencia(C_p) Vs $TSR(\lambda)$

Donde los puntos de inflexión de la curva representan la máxima eficiencia a la que puede trabajar una turbina para un determinado ángulo de paso. De las gráficas se observa que conforme el ángulo de paso se va incrementando la eficiencia máxima se hace cada vez menor (punto de inflexión de cada curva); por lo tanto para el ángulo de paso $\beta=0^\circ$, se obtendrá la máxima eficiencia.

De la gráfica se obtiene para $\beta=0^\circ$ y $\lambda=9.43$; la máxima eficiencia $C_p=0.48$. Los aerogeneradores se diseñan para que trabajen en el punto de máxima eficiencia, teniendo en cuenta que no se debe superar las características de operación mínimas, nominales y máximas de las mismas; con lo que se puede concluir que para cada valor de β le corresponderá un C_p máximo ligado a un valor de λ .

Seguidamente procedemos a definir las zonas de trabajo del aerogenerador, las cuales están delimitadas por intervalos de velocidad de viento las cuales presentan las siguientes características:

Velocidades Bajas: intervalo en el cual se trabaja con la máxima eficiencia C_p ($\beta=0^\circ$, $\lambda=9.43$ y $C_p=0.48$); teniendo como condición que el intervalo de operación de la turbina va desde la velocidad mínima (9 rpm) hasta la velocidad nominal (16,7 rpm); la turbina no debe ser superada. En el siguiente cuadro se muestran los resultados de la velocidad de la turbina para una determinada velocidad del viento:

Tabla 5.3.- Velocidad del viento Vs Velocidad de la turbina [S/N]

Velocidad del viento	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s	13 m/s	14 m/s	15 m/s
n de la turbina (rpm)	9	11.3	13.5	15.8	18	20.3	22.5	24.8	27	29.3	31.5	33.8

Se puede observar que a partir de una velocidad de 8 m/s la velocidad nominal de la turbina es superada; con lo cual quedaría definido el primer intervalo de operación:
 $4\text{m/s} \leq V_{\text{viento}} < 8\text{m/s}$.

Velocidades intermedias ($8\text{m/s} \leq V_{\text{viento}} < 15\text{m/s}$): Intervalo en el cual se trabaja con la misma curva C_p para $\beta=0^\circ$ pero con $\lambda = \text{variable}$, de tal forma que las velocidades de la turbina varíen desde la nominal (16.7 rpm) hasta la máxima (19 rpm) y que no se supere la potencia máxima del aerogenerador (2000 kW para una velocidad de viento de 15 m/s); lo cual se consigue aplicando un par resistente propio de la turbina; el cual actúa como freno impidiendo que se supere los límites de velocidad indicados. En el siguiente cuadro se muestra los valores de la velocidad de la turbina variando los parámetros mencionados líneas arriba:

Tabla 5.4.- Velocidad de la turbina variando el punto de operación [S/N]

Velocidad del viento	Paso (β)	TSR (λ)	C_p	n de la turbina (rpm)	Potencia max
8 m/s	0.0	8.74	0.4706	16.7	727 kW
9 m/s	0.0	7.93	0.4383	17.0	964 kW
10 m/s	0.0	7.27	0.3954	17.4	1193 kW
11 m/s	0.0	6.73	0.3503	17.7	1406 kW
12 m/s	0.0	6.29	0.3082	18.0	1606 kW
13 m/s	0.0	5.91	0.2691	18.3	1783 kW
14 m/s	0.0	5.59	0.2350	18.7	1945 kW
15 m/s	0.0	5.31	0.2050	19.0	2087 kW
16 m/s	0.0	5.06	0.1785	19.3	2205 kW
17 m/s	0.0	4.84	0.1559	19.7	2310 kW
18 m/s	0.0	4.65	0.1371	20.0	2412 kW

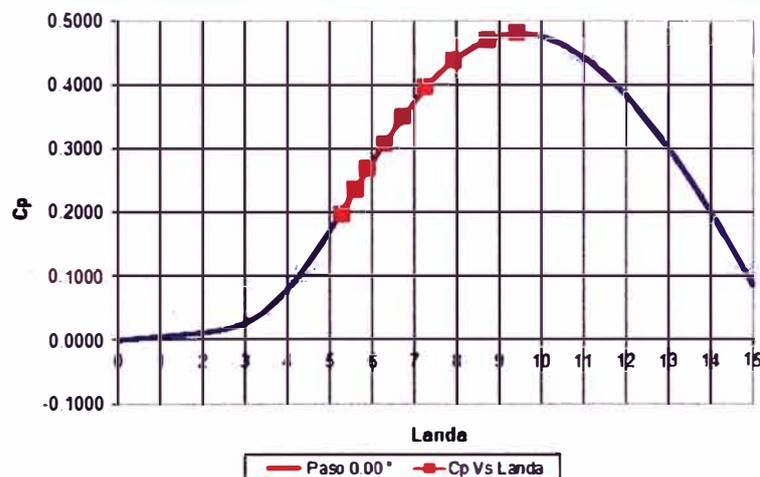


Fig. 5.4: Desplazamiento del punto de operación a lo largo de la curva C_p para $\beta=0$

Se puede observar que a partir de una velocidad de 15 m/s la potencia nominal es superada, y para los valores siguientes de velocidad del viento se supera la velocidad máxima de la turbina y la potencia nominal de la máquina.

Velocidades altas ($15\text{m/s} \leq V_{\text{viento}} < 25\text{m/s}$): en esta zona de operación el objetivo es no superar la potencia nominal de la máquina ni tampoco la velocidad máxima de rotación de la turbina; para lo cual se modificara el ángulo de paso.

El siguiente cuadro muestra los valores de la velocidad de la turbina, variando el ángulo de paso, de tal forma de no superar la potencia nominal del aerogenerador:

Tabla 5.5.- Potencia y velocidad de la turbina para C_p max, para determinados β y λ [S/N]

Velocidad del viento	C_p max	Paso (β) para C_p max	TSR (λ) para C_p max	Potencia max	n de la turbina
15 m/s	0.1965	14.01	7.40	2000 kW	26.015
16 m/s	0.1619	16.95	6.50	2000 kW	24.8
17 m/s	0.1350	19.71	5.73	2000 kW	23.3
18 m/s	0.1137	22.32	5.10	2000 kW	21.9
19 m/s	0.0967	24.77	4.57	2000 kW	20.7
20 m/s	0.0829	27.06	4.00	2000 kW	19.1
21 m/s	0.0716	29.22	3.55	2000 kW	17.8
22 m/s	0.0623	31.25	3.20	2000 kW	16.8
23 m/s	0.0545	33.14	2.81	2000 kW	15.4
24 m/s	0.0480	34.90	2.51	2000 kW	14.4
25 m/s	0.0424	36.55	2.17	2000 kW	13.0

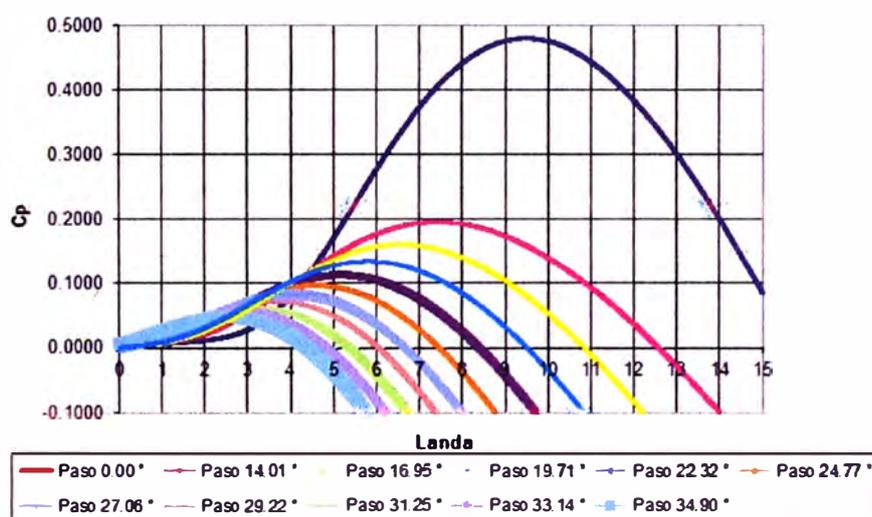


Fig. 5.5: Curva C_p vs λ

Se puede observar que para las velocidades de 15 a 20 m/s, la velocidad máxima de la turbina es superada, al trabajar con el punto óptimo (C_p max) de operación para determinado β y λ . Para lograr controlar estos decrementos de velocidad aplicamos nuevamente el par resistente de la turbina, pero en esta oportunidad tendremos como dato el C_p y el λ ; los cuales se obtienen considerando que la velocidad máxima de la turbina (19 rpm) y la potencia nominal (2000 kW) no deben ser superados. A partir de las ecuaciones 5.1 y 5.2, se obtienen los valores de β para cada par de valores de C_p y λ ; para lo cual empleamos un pequeño programa desarrollado en Matlab; cuyas soluciones se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 5.6.- Soluciones de β , para determinados C_p y λ [S/N]

Velocidad del viento	C_p	TSR (λ)	Soluciones de (β)
15 m/s	0.1965	5.31	0.54°
16 m/s	0.1619	6.50	0.57°
17 m/s	0.1350	5.73	0.56°
18 m/s	0.1137	5.10	0.49°; 10.78°; 20.54°
19 m/s	0.0967	4.57	9.06°; 24.36°
20 m/s	0.0829	4.00	8.27°; 27.04°

En caso de tener varias soluciones, se toman los valores más altos, pues estos indican una menor eficiencia y por lo tanto un menor par resistente.

Finalmente el siguiente cuadro indica los parámetros finales con los cuales trabaja la maquina:

Tabla 5.7.- Soluciones de β , para determinados C_p y λ [S/N]

Velocidad del viento	C_p max	Paso (β)	TSR (landa)	n de la turbina	Potencia max
4 m/s	0.4800	0.0	9.43	9.0	93 kW
5 m/s	0.4800	0.0	9.43	11.3	181 kW
6 m/s	0.4800	0.0	9.43	13.5	313 kW
7 m/s	0.4800	0.0	9.43	15.8	497 kW
8 m/s	0.4706	0.0	8.74	16.7	727 kW
9 m/s	0.4383	0.0	7.93	17.0	964 kW
10 m/s	0.3954	0.0	7.27	17.4	1193 kW
11 m/s	0.3503	0.0	6.73	17.7	1406 kW
12 m/s	0.3082	0.0	6.29	18.0	1606 kW
13 m/s	0.2691	0.0	5.91	18.3	1783 kW
14 m/s	0.2350	0.0	5.59	18.7	1945 kW
15 m/s	0.1965	0.54	5.31	19.0	2000 kW
16 m/s	0.1619	0.57	4.97	19.0	2000 kW
17 m/s	0.1350	0.56	4.68	19.0	2000 kW
18 m/s	0.1137	20.54	4.42	19.0	2000 kW
19 m/s	0.0967	24.36	4.19	19.0	2000 kW
20 m/s	0.0829	27.04	3.98	19.0	2000 kW
21 m/s	0.0716	29.2	3.55	17.8	2000 kW
22 m/s	0.0623	31.3	3.20	16.8	2000 kW
23 m/s	0.0545	33.1	2.81	15.4	2000 kW
24 m/s	0.0480	34.9	2.51	14.4	2000 kW
25 m/s	0.0424	36.6	2.17	13.0	2000 kW

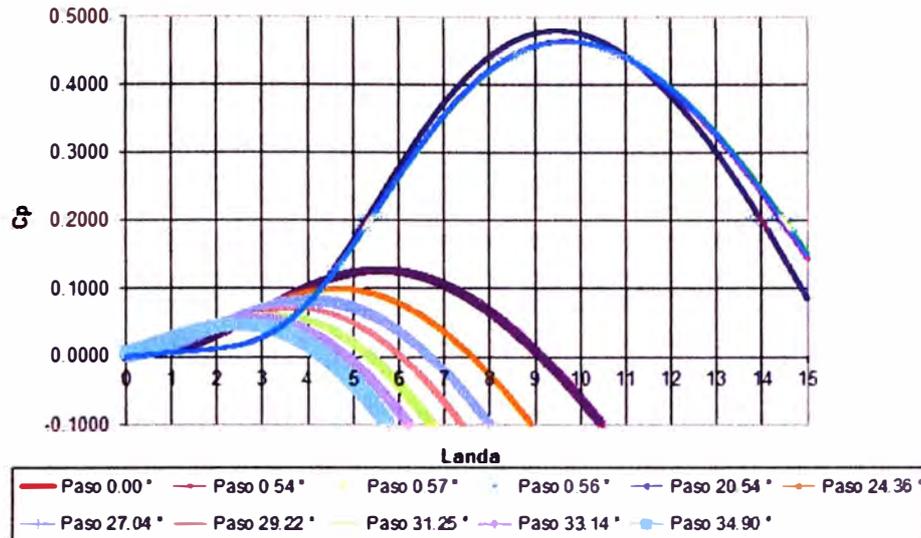


Fig. 5.6: Curvas de operación C_p vs λ

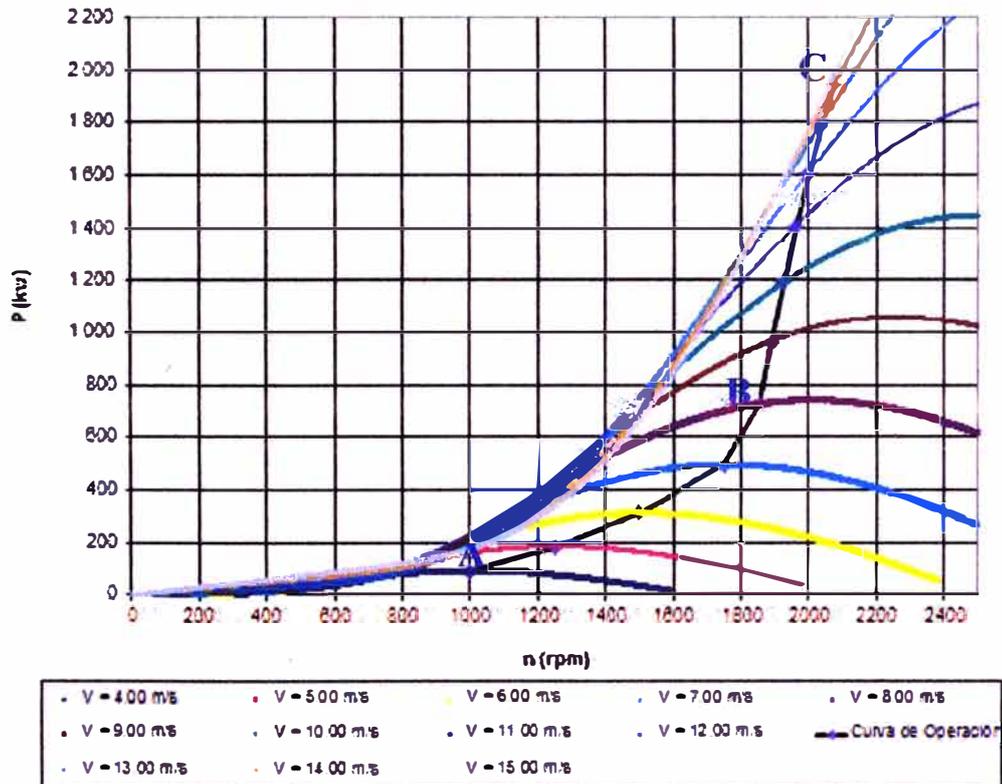


Fig. 5.7: Curvas de operación C_p vs λ

La curva de color azul representa las zonas de operación de la maquina, donde la curva A-B representa la zona de velocidades mínimas ($\beta=0$ y C_p max); la zona de B-C representa la zona de velocidades intermedias ($\beta=0$, $16.7\text{rpm} \leq V_{\text{turbina}} < 19\text{rpm}$) y el punto C representa la zona de velocidades altas ($P_{\text{nom}}=2000\text{kW}$, $V_{\text{turbina}}=19\text{rpm}$). La siguiente grafica compara la curva del fabricante (fig. 5.2) con la curva obtenida mediante el proceso indicado:

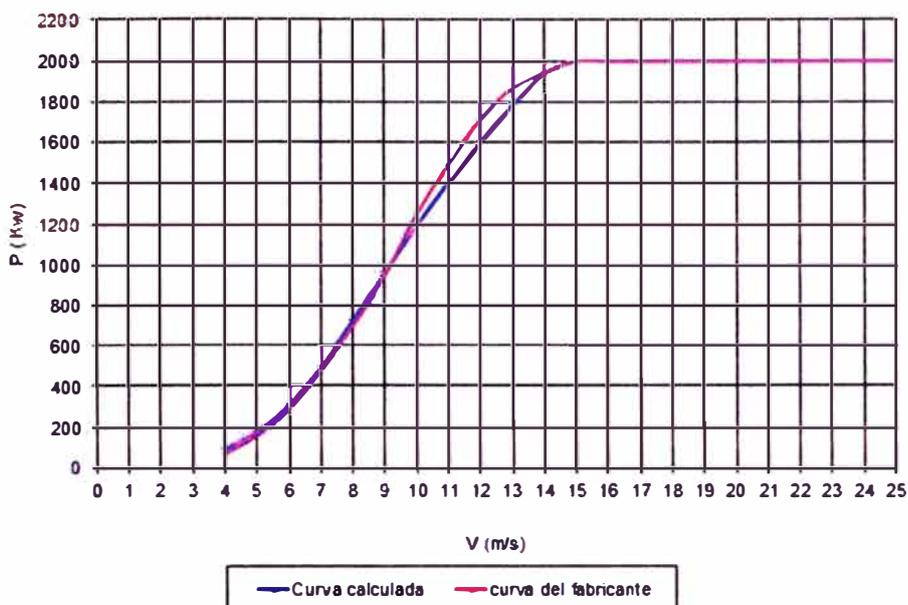


Fig. 5.8: Curvas Potencia Vs Velocidad del Viento, calculada y del fabricante

La curva de color azul es elaborada con el proceso de cálculo mencionado; y la de color magenta representa la curva del fabricante. Se observa que entre dichas curvas hay ligeras diferencias, esto es debido a que el presente modelo no considera el efecto del nivel de ruido emitido por el aerogenerador.

Luego de esto procedemos a realizar el cálculo de la potencia mecánica que produce la turbina en el eje del generador; para diferentes velocidades del viento:

Tabla 5.8.- Potencia máxima en el eje del rotor [S/N]

Velocidad del viento	n mecánica max del rotor	Potencia max
4 m/s	1000	93 kW
5 m/s	1249	181 kW
6 m/s	1499	313 kW
7 m/s	1749	497 kW
8 m/s	1854	727 kW
9 m/s	1890	964 kW
10 m/s	1927	1193 kW
11 m/s	1963	1406 kW
12 m/s	2000	1606 kW
13 m/s	2036	1783 kW
14 m/s	2073	1945 kW
15 m/s	2109	2000 kW
16 m/s	2109	2000 kW
17 m/s	2109	2000 kW
18 m/s	2109	2000 kW
19 m/s	2109	2000 kW
20 m/s	2109	2000 kW
21 m/s	1976	2000 kW

Velocidad del viento	mecánica max del rotor	Potencia max
22 m/s	1866	2000 kW
23 m/s	1713	2000 kW
24 m/s	1596	2000 kW
25 m/s	1438	2000 kW

Luego se procederá a obtener la potencia activa entregada en bornes del generador, considerando un factor de potencia igual a 1; con lo cual la potencia reactiva en bornes del generador es igual a 0.

Todos los parámetros eléctricos serán transformados al sistema dq; con la idea de poder tener un conjunto de ecuaciones independientes del tiempo, y que permitan el desarrollo del sistema de una manera más práctica. El esquema eléctrico del generador asíncrono es el siguiente:

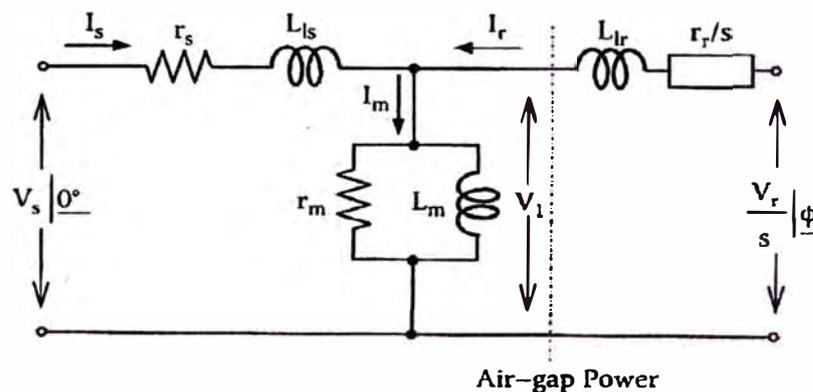


Fig. 5.9: Esquema eléctrico del generador Asíncrono

Cuyo equivalente en parámetros d q será:

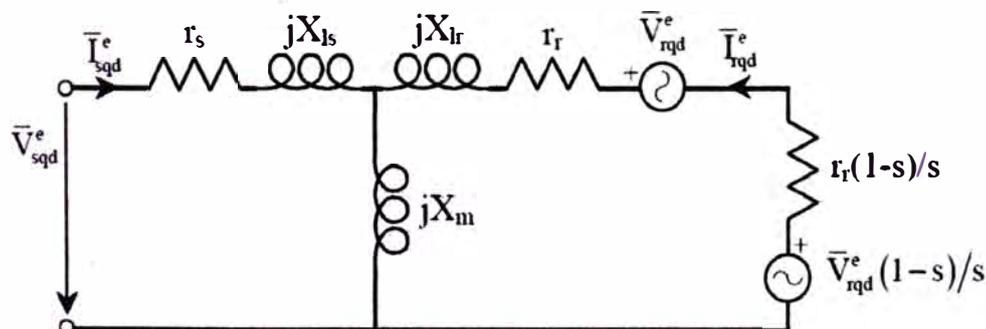


Fig. 5.10: Esquema eléctrico del generador Asíncrono con parámetros d q

De las ecuaciones 3.66, 3.67, 3.68, 3.70, 3.71 y 3.72; presentadas en el Capítulo III, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} V_{sq}^e \\ V_{sd}^e \\ V_{rq}^e \\ V_{rd}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sq}^e \\ I_{sd}^e \\ I_{rq}^e \\ I_{rd}^e \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s \\ 0 & 0 & s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{sq}^e \\ \lambda_{sd}^e \\ \lambda_{rq}^e \\ \lambda_{rd}^e \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{sq}^e \\ \lambda_{sd}^e \\ \lambda_{rq}^e \\ \lambda_{rd}^e \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Siendo:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sq}^e \\ \lambda_{sd}^e \\ \lambda_{rq}^e \\ \lambda_{rd}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & 0 & l_m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & l_m \\ l_m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & l_m & 0 & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sq}^e \\ I_{sd}^e \\ I_{rq}^e \\ I_{rd}^e \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Donde las matrices de resistencias y de inductancias del rotor y del estator, así como la matriz de inductancias mutuas; a partir de los parámetros de la maquina indicados en la tabla 5.2, son las siguientes:

Tabla 5.9.- Matrices de Resistencias y de Inductancias

Matriz Rqds	
0.00164	0.00000
0.00000	0.00164

Matriz Rqdr	
0.00105	0.00000
0.00000	0.00105

Matriz Lqds	
0.00656	0.00000
0.00000	0.00656

Matriz Lqdr	
0.00659	0.00000
0.00000	0.00659

Matriz Lqdm	
0.00648	0.00000
0.00000	0.00648

La orientación con el vector espacial de flujo del estator λ_s es escogida porque se logra un control desacoplado de las potencias activa P_s y reactiva Q_s del generador de inducción.

Considerando que la caída de tensión en la resistencia de estator es despreciable y como el estator está conectado a la red, el vector espacial del flujo del estator $\lambda_s = \lambda_{sd} + j\lambda_{sq}$ se mantendrá constante y se atrasará con respecto al vector espacial de tensión del estator $V_s = v_{sd} + jv_{sq}$ en un ángulo de 90° .

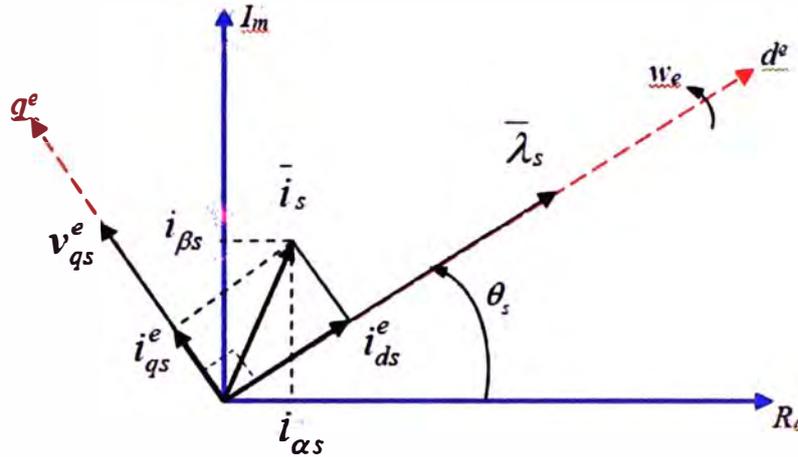


Fig. 5.11: Sistema de referencia dq orientado con el flujo del estator.

Por lo tanto, debido a la orientación del sistema de referencia con respecto al flujo del estator $\lambda_s = \lambda_{sd}$, $\lambda_{sd} = 0$ como se muestra en la figura 3.43, la componente en el eje directo de la tensión de la red es cero $V_{sd} = 0$ ($V_s = jv_{sq}$).

Sabiendo que las ecuaciones que permiten determinar las potencias activas y reactivas en bornes del estator son las siguientes:

$$P_s = \frac{3(V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq})}{2} \quad (5.5)$$

$$Q_s = \frac{3(V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq})}{2} \quad (5.6)$$

Remplazando $V_{sd} = 0$, en las ecuaciones 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 se obtiene:

$$V_{sq} = r_s \cdot I_{sq} + w_e \cdot (-1)(l_s \cdot I_{sd} + l_m \cdot I_{rd}) \quad (5.7)$$

$$V_{rq} = r_r \cdot I_{rq} + w_e \cdot (-s)(l_m \cdot I_{sd} + l_r \cdot I_{rd}) \quad (5.8)$$

$$V_{rd} = r_r \cdot I_{rd} + w_e \cdot s(l_m \cdot I_{sq} + l_r \cdot I_{rq}) \quad (5.9)$$

$$I_{rq} = -\frac{l_s \cdot I_{sq}}{l_m} \quad (5.10)$$

$$I_{sd} = I_{sq} \tan \theta \quad (5.11)$$

$$P_s = \frac{3V_{sq}I_{sq}}{2} \quad (5.12)$$

$$Q_s = \frac{3V_{sq}I_{sd}}{2} \quad (5.13)$$

Donde θ es el ángulo que forma la corriente de salida del estator con la tensión en bornes del mismo. Así mismo, el ángulo θ , es el ángulo que forman la tensión y la corriente en bornes del generador al conectarse con la red. El coseno del ángulo θ representa el factor de potencia del aerogenerador.

Empleando las ecuaciones 5.7 al 5.11 en la ecuación 3.108; se tiene:

$$P_e = \frac{3}{2}(1-s)I_{sq}(r_s I_{sq} - V_{sq}) \quad (5.12)$$

Donde: "Pe" es la potencia electromecánica entregada en el eje del rotor, "V_{sq}" es la tensión de línea de la red entre / raíz(3), "s" es el deslizamiento y "rs" es la resistencia del circuito eléctrico equivalente del devanado del estator.

Sabiendo que la tensión de línea y la frecuencia eléctrica de la fem en el estator son impuestas por la red, estas se pueden considerar como datos. Así mismo la resistencia "rs" es un parámetro propio del estator, el cual también es dato.

El deslizamiento "s" depende de la frecuencia eléctrica de la red (constante), del número de polos del rotor (constante), y de la velocidad angular de giro del eje de la turbina; esta última depende de la velocidad del viento (variable) y del ángulo de paso (variable); por lo tanto para un determinado valor de velocidad del viento y de ángulo de paso, se tendrá un determinado deslizamiento "s". La potencia "Pe", al igual que "s", depende de la velocidad del viento y del ángulo de paso.

Con lo mencionado en los párrafos superiores, y reacomodando la ecuación 5.12; se tiene lo siguiente:

$$0 = r_s I_{sq}^2 - V_{sq} I_{sq} - \frac{2P_e}{3(1-s)} \quad (5.13)$$

La cual tiene la forma de una ecuación de segundo grado, de la cual obtendremos un determinado valor de I_{sq}, para cada valor de "Pe" y de "s", que se da en el eje de la turbina.

De la ecuación 5.10, se puede apreciar que la corriente I_{rq} es función de la corriente I_{sq}, por lo tanto esta también depende de la potencia "Pe" y de "s".

De la ecuación 5.9, se puede obtener I_{rd} en función de V_{rd}:

$$I_{rd} = \frac{V_{rd} - \omega_e \cdot s (l_m \cdot I_{sq} + l_r \cdot I_{rq})}{r_r} \quad (5.14)$$

De lo que se puede concluir que controlando la componente en el eje directo de la tensión de entrada en el rotor se puede controlar la corriente I_{rd}.

De la ecuación 5.8, se puede obtener I_{sd} , en función de V_{rq} :

$$I_{sd} = \frac{r_r \cdot I_{rq} - w_e \cdot s \cdot I_r \cdot I_{rd} - V_{rq}}{w_e \cdot s \cdot I_m} \quad (5.15)$$

De lo que se puede concluir que controlando la componente en el eje cuadratura de la tensión de entrada en el rotor se puede controlar la corriente I_{sd} .

Sabiendo que la tensión $V_{sq}=394.4$ Volt y $r_s=0.00164$ ohm; y controlando las tensiones en V_{rq} y V_{rd} con el objetivo de obtener factor de potencia igual a 1; se obtiene los siguientes resultados resolviendo las ecuaciones del 5.7 al 5.15:

Tabla 5.10.- Tensiones y Corrientes en el estator y en el rotor [S/N]

Nº	Velocidad	Ángulo de paso	Potencia en el eje (Pe)	s	Isq	Irq	Vrd	Vrq	Ird	Isd	Factor de potencia
1	4.0 m/s	0.0 °	92.7 kW	0.44	-278.9 A	282.3 A	8.9 V	180.8 V	-163.3 A	0.0 A	1.00
2	5.0 m/s	0.0 °	181.0 kW	0.31	-435.5 A	440.9 A	9.6 V	124.7 V	-163.4 A	0.0 A	1.00
3	6.0 m/s	0.0 °	312.7 kW	0.17	-626.7 A	634.4 A	7.5 V	68.6 V	-163.5 A	0.0 A	1.00
4	7.0 m/s	0.0 °	496.6 kW	0.03	-852.2 A	862.6 A	1.6 V	12.4 V	-163.7 A	0.0 A	1.00
5	8.0 m/s	0.0 °	726.7 kW	-0.03	-1175.3 A	1189.7 A	-2.8 V	-10.9 V	-163.9 A	0.0 A	1.00
6	9.0 m/s	0.0 °	963.7 kW	-0.05	-1526.3 A	1545.0 A	-5.8 V	-18.8 V	-164.1 A	0.0 A	1.00
7	10.0 m/s	0.0 °	1192.6 kW	-0.07	-1850.5 A	1873.2 A	-9.7 V	-26.8 V	-164.3 A	0.0 A	1.00
8	11.0 m/s	0.0 °	1406.3 kW	-0.09	-2139.0 A	2165.3 A	-14.4 V	-34.8 V	-164.5 A	0.0 A	1.00
9	12.0 m/s	0.0 °	1606.3 kW	-0.11	-2396.2 A	2425.6 A	-19.7 V	-42.8 V	-164.7 A	0.0 A	1.00
10	13.0 m/s	0.0 °	1783.2 kW	-0.13	-2610.1 A	2642.2 A	-25.3 V	-51.0 V	-164.9 A	0.0 A	1.00
11	14.0 m/s	0.0 °	1945.0 kW	-0.15	-2794.7 A	2829.0 A	-31.3 V	-59.1 V	-165.0 A	0.0 A	1.00
12	15.0 m/s	0.54°	2000.0 kW	-0.17	-2823.8 A	2858.4 A	-35.8 V	-67.4 V	-165.0 A	0.0 A	1.00
13	16.0 m/s	0.57°	2000.0 kW	-0.17	-2823.8 A	2858.4 A	-35.8 V	-67.4 V	-165.0 A	0.0 A	1.00
14	17.0 m/s	0.56°	2000.0 kW	-0.17	-2823.8 A	2858.4 A	-35.8 V	-67.4 V	-165.0 A	0.0 A	1.00
15	18.0 m/s	20.54°	2000.0 kW	-0.17	-2823.8 A	2858.4 A	-35.8 V	-67.4 V	-165.0 A	0.0 A	1.00
16	19.0 m/s	24.36°	2000.0 kW	-0.17	-2823.8 A	2858.4 A	-35.8 V	-67.4 V	-165.0 A	0.0 A	1.00
17	20.0 m/s	27.04°	2000.0 kW	-0.17	-2823.8 A	2858.4 A	-35.8 V	-67.4 V	-165.0 A	0.0 A	1.00
18	21.0 m/s	29.2 °	2000.0 kW	-0.10	-3012.2 A	3049.2 A	-21.8 V	-36.8 V	-165.1 A	0.0 A	1.00
19	22.0 m/s	31.3 °	2000.0 kW	-0.04	-3187.5 A	3226.7 A	-8.7 V	-11.6 V	-165.2 A	0.0 A	1.00
20	23.0 m/s	33.1 °	2000.0 kW	0.05	-3468.1 A	3510.7 A	12.2 V	23.6 V	-165.4 A	0.0 A	1.00
21	24.0 m/s	34.9 °	2000.0 kW	0.11	-3717.1 A	3762.8 A	30.8 V	50.5 V	-165.6 A	0.0 A	1.00
22	25.0 m/s	36.6 °	2000.0 kW	0.20	-4120.8 A	4171.4 A	60.8 V	87.4 V	-165.9 A	0.0 A	1.00

Se puede apreciar que la corriente I_{sd} es igual a 0; esto es debido a que la potencia reactiva en bornes del estator “ Q_s ” es igual a 0; ya que el factor de potencia es igual a la unidad. La potencia activa y reactiva en el lado del rotor se determina a través de las siguientes ecuaciones:

$$P_r = \frac{3(V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq})}{2} \quad (5.16)$$

$$Q_r = \frac{3(V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq})}{2} \quad (5.17)$$

Empleando los resultados obtenidos en la tabla 5.4, en las ecuaciones 5.12, 5.13, 5.16, 5.17, 3.106, 3.107; se obtiene el siguiente cuadro de flujos de potencias en el rotor y estator:

Tabla 5.11.- Potencias en bornes del estator y del rotor [S/N]

Nº	Velocidad	Potencia en eje	Potencia estator (Ps)	Potencia Rotor (Pr)	Pérdidas en el rotor	Pérdidas en el estator	Potencia reactiva en el rotor (Qr)	Potencia reactiva en el Estator (Qs)
1	4.0 m/s	92.7 kW	-166.7 kW	74.4 kW	-0.2 kW	-0.2 kW	-48.1 kVAR	0.0 kVAR
2	5.0 m/s	181.0 kW	-260.2 kW	80.1 kW	-0.3 kW	-0.5 kW	-36.9 kVAR	0.0 kVAR
3	6.0 m/s	312.7 kW	-374.5 kW	63.4 kW	-0.7 kW	-1.0 kW	-24.0 kVAR	0.0 kVAR
4	7.0 m/s	496.6 kW	-509.2 kW	15.6 kW	-1.2 kW	-1.8 kW	-5.1 kVAR	0.0 kVAR
5	8.0 m/s	726.7 kW	-702.3 kW	-18.8 kW	-2.3 kW	-3.4 kW	7.6 kVAR	0.0 kVAR
6	9.0 m/s	963.7 kW	-912.0 kW	-42.2 kW	-3.8 kW	-5.7 kW	18.1 kVAR	0.0 kVAR
7	10.0 m/s	1192.6 kW	-1105.8 kW	-72.8 kW	-5.6 kW	-8.4 kW	34.0 kVAR	0.0 kVAR
8	11.0 m/s	1406.3 kW	-1278.2 kW	-109.4 kW	-7.4 kW	-11.3 kW	55.4 kVAR	0.0 kVAR
9	12.0 m/s	1606.3 kW	-1431.9 kW	-151.0 kW	-9.3 kW	-14.1 kW	82.3 kVAR	0.0 kVAR
10	13.0 m/s	1783.2 kW	-1559.7 kW	-195.7 kW	-11.0 kW	-16.8 kW	113.0 kVAR	0.0 kVAR
11	14.0 m/s	1945.0 kW	-1670.0 kW	-243.1 kW	-12.6 kW	-19.2 kW	147.4 kVAR	0.0 kVAR
12	15.0 m/s	2000.0 kW	-1687.4 kW	-280.1 kW	-12.9 kW	-19.6 kW	170.2 kVAR	0.0 kVAR
13	16.0 m/s	2000.0 kW	-1687.4 kW	-280.1 kW	-12.9 kW	-19.6 kW	170.2 kVAR	0.0 kVAR
14	17.0 m/s	2000.0 kW	-1687.4 kW	-280.1 kW	-12.9 kW	-19.6 kW	170.2 kVAR	0.0 kVAR
15	18.0 m/s	2000.0 kW	-1687.4 kW	-280.1 kW	-12.9 kW	-19.6 kW	170.2 kVAR	0.0 kVAR
16	19.0 m/s	2000.0 kW	-1687.4 kW	-280.1 kW	-12.9 kW	-19.6 kW	170.2 kVAR	0.0 kVAR
17	20.0 m/s	2000.0 kW	-1687.4 kW	-280.1 kW	-12.9 kW	-19.6 kW	170.2 kVAR	0.0 kVAR
18	21.0 m/s	2000.0 kW	-1800.0 kW	-163.0 kW	-14.7 kW	-22.3 kW	108.7 kVAR	0.0 kVAR
19	22.0 m/s	2000.0 kW	-1904.7 kW	-53.8 kW	-16.4 kW	-25.0 kW	45.0 kVAR	0.0 kVAR
20	23.0 m/s	2000.0 kW	-2072.4 kW	121.5 kW	-19.5 kW	-29.6 kW	-70.1 kVAR	0.0 kVAR
21	24.0 m/s	2000.0 kW	-2221.2 kW	277.5 kW	-22.3 kW	-34.0 kW	-186.1 kVAR	0.0 kVAR
22	25.0 m/s	2000.0 kW	-2462.4 kW	531.6 kW	-27.4 kW	-41.8 kW	-402.4 kVAR	0.0 kVAR

Las tensiones V_{rd} y V_{rq} son las componentes en el eje directo y en el de cuadratura de la tensión en bornes del inversor; cuya amplitud es obtenida a partir del índice de modulación “m- V_r ” y la tensión en bornes del capacitor del inversor V_{cap} , que para el caso estudiado toma el valor de 1200 V. La potencia activa entregada o absorbida por el rotor, “Pr”, es la misma que absorbe o entrega el inversor conectado al rotor. Dicha potencia es la misma que entrega o absorbe el inversor a la red eléctrica, llamada “Pg”.

Esta potencia se controla a través de la tensión V_c en bornes del inversor, conectado a la red a través de la inductancia X_s ; y del control del ángulo δ que forma dicha tensión con la tensión de la red V_s . La amplitud de la tensión V_c depende del índice de modulación “m- V_c ” del inversor conectado a la red.

El siguiente grafico ilustra el inversor del aerogenerador que está conectado a la red eléctrica, a través de una inductancia X_s ; identificándose las variables V_c , V_s y I_s .

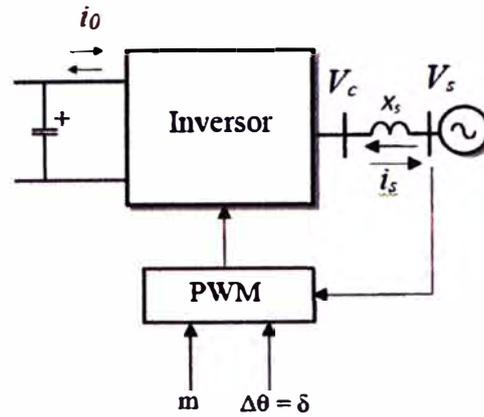


Fig. 5.12: Inversor conectado a la red.

Para poder entregar o absorber la potencia P_g , se debe de entregar o absorber una corriente I_s ; la cual al igual que P_g depende de la tensión V_c y del ángulo δ . La siguiente ecuación nos permite el cálculo de I_s :

$$I_s \angle \beta = \frac{V_c \angle \delta - V_s \angle 0}{X_s} \quad (5.18)$$

Donde β es el ángulo que forma la corriente I_s con la tensión V_s ; el cual cuando se esta entregando potencia activa, tomara un valor igual a θ ; siendo este al arco cuyo coseno es el Factor de Potencia; lo que significa que I_s se encuentra en fase con la corriente del estator. En el caso se esté absorbiendo potencia activa, β será igual a $180+\theta$, lo que significa que I_s esta en contrafase con la corriente del estator.

La siguiente tabla nos indica los valores de los parámetros a manejar en bornes del inversor, para poder entregar o consumir la potencia activa y reactiva que se desea en bornes del aerogenerador – la red eléctrica:

Tabla 5.12.- Parámetros en bornes de entrada y salida del rectificador

Nº	Tensión fase Tierra rms en el rotor	índice de modulación (m-Vr)	Vcap	índice de modulación (m-Vc)	Vc (fase-tierra rms)	δ	X_s	I_s	ángulo entre I_s y V_s (β)
1	181.0 V	0.30	1200.0 V	0.33	399.1 V	3.4 °	0.4 ohm	-62.2 A	180.0 °
2	125.0 V	0.21	1200.0 V	0.33	399.2 V	3.6 °	0.4 ohm	-67.0 A	180.0 °
3	69.0 V	0.11	1200.0 V	0.33	398.9 V	2.9 °	0.4 ohm	-53.0 A	180.0 °
4	12.5 V	0.02	1200.0 V	0.33	398.4 V	0.7 °	0.4 ohm	-13.1 A	180.0 °
5	11.2 V	0.02	1200.0 V	0.33	398.4 V	-0.9 °	0.4 ohm	15.7 A	0.0 °
6	19.7 V	0.03	1200.0 V	0.33	398.6 V	-1.9 °	0.4 ohm	35.3 A	0.0 °
7	28.5 V	0.05	1200.0 V	0.33	399.0 V	-3.3 °	0.4 ohm	60.9 A	0.0 °
8	37.7 V	0.06	1200.0 V	0.33	399.9 V	-5.0 °	0.4 ohm	91.6 A	0.0 °
9	47.2 V	0.08	1200.0 V	0.33	401.2 V	-6.8 °	0.4 ohm	126.4 A	0.0 °
10	56.9 V	0.09	1200.0 V	0.34	403.1 V	-8.8 °	0.4 ohm	163.8 A	0.0 °
11	66.9 V	0.11	1200.0 V	0.34	405.7 V	-10.9 °	0.4 ohm	203.4 A	0.0 °
12	76.3 V	0.13	1200.0 V	0.34	408.1 V	-12.5 °	0.4 ohm	234.4 A	0.0 °
13	76.3 V	0.13	1200.0 V	0.34	408.1 V	-12.5 °	0.4 ohm	234.4 A	0.0 °

Nº	Tensión fase Tierra rms en el rotor	índice de modulación (m-Vr)	Vcap	índice de modulación (m-Vc)	Vc (fase-tierra rms)	δ	Xs	Is	ángulo entre Is y Vs (β)
14	76.3 V	0.13	1200.0 V	0.34	408.1 V	-12.5 °	0.4 ohm	234.4 A	0.0 °
15	76.3 V	0.13	1200.0 V	0.34	408.1 V	-12.5 °	0.4 ohm	234.4 A	0.0 °
16	76.3 V	0.13	1200.0 V	0.34	408.1 V	-12.5 °	0.4 ohm	234.4 A	0.0 °
17	76.3 V	0.13	1200.0 V	0.34	408.1 V	-12.5 °	0.4 ohm	234.4 A	0.0 °
18	42.8 V	0.07	1200.0 V	0.33	401.7 V	-7.4 °	0.4 ohm	136.4 A	0.0 °
19	14.5 V	0.02	1200.0 V	0.33	398.7 V	-2.4 °	0.4 ohm	45.0 A	0.0 °
20	26.6 V	0.04	1200.0 V	0.33	400.2 V	5.5 °	0.4 ohm	-101.6 A	180.0 °
21	59.1 V	0.10	1200.0 V	0.34	407.9 V	12.4 °	0.4 ohm	-232.2 A	180.0 °
22	106.5 V	0.18	1200.0 V	0.36	432.2 V	22.8 °	0.4 ohm	-444.8 A	180.0 °

La potencia reactiva Q_g entregada o consumida por el inversor, se determina con la siguiente expresión:

$$Q_g = 3V_c I_s \text{sen}(\delta - \beta) \quad (5.19)$$

Potencia que para el presente caso en el cual la potencia reactiva en bornes del generador es "0", será consumida en su totalidad por la inductancia X_s . Finalmente para determinar la potencia activa y reactiva total entregada en bornes del aerogenerador y cuyo factor de potencia debe ser igual al presentado en bornes del estator (en el presente caso F.P=1); se indican las siguientes ecuaciones:

$$P_{total} = P_r + P_s = P_g + P_s \quad (5.20)$$

$$Q_{total} = Q_s + 3V_s I_s \text{sen}(-\beta) \quad (5.21)$$

Siendo el resultado Q_{total} igual a 0, ya que el F.P=1. En la tabla siguiente se indican los resultados finales de las potencias a la salida del inversor y del aerogenerador:

Tabla 5.13.- Parámetros entre el inversor y la red – Potencia total en bornes del aerogenerador [S/N]

Nº	Pg	Qg	P activa entregada a la red	Q reactiva entregada a la red
1	-74.4 kW	-4.4 kVAR	-92.3 kW	0.0 kVAR
2	-80.1 kW	-5.1 kVAR	-180.2 kW	0.0 kVAR
3	-63.4 kW	-3.2 kVAR	-311.1 kW	0.0 kVAR
4	-15.6 kW	-0.2 kVAR	-493.6 kW	0.0 kVAR
5	18.8 kW	-0.3 kVAR	-721.1 kW	0.0 kVAR
6	42.2 kW	-1.4 kVAR	-954.2 kW	0.0 kVAR
7	72.8 kW	-4.2 kVAR	-1178.6 kW	0.0 kVAR
8	109.4 kW	-9.5 kVAR	-1387.6 kW	0.0 kVAR
9	151.0 kW	-18.1 kVAR	-1582.9 kW	0.0 kVAR
10	195.7 kW	-30.3 kVAR	-1755.4 kW	0.0 kVAR
11	243.1 kW	-46.8 kVAR	-1913.1 kW	0.0 kVAR
12	280.1 kW	-62.1 kVAR	-1967.5 kW	0.0 kVAR
13	280.1 kW	-62.1 kVAR	-1967.5 kW	0.0 kVAR

N°	P _g	Q _g	P activa entregada a la red	Q reactiva entregada a la red
14	280.1 kW	-62.1 kVAR	-1967.5 kW	0.0 kVAR
15	280.1 kW	-62.1 kVAR	-1967.5 kW	0.0 kVAR
16	280.1 kW	-62.1 kVAR	-1967.5 kW	0.0 kVAR
17	280.1 kW	-62.1 kVAR	-1967.5 kW	0.0 kVAR
18	163.0 kW	-21.0 kVAR	-1963.0 kW	0.0 kVAR
19	53.8 kW	-2.3 kVAR	-1958.6 kW	0.0 kVAR
20	-121.5 kW	-11.7 kVAR	-1951.0 kW	0.0 kVAR
21	-277.5 kW	-61.0 kVAR	-1943.7 kW	0.0 kVAR
22	-531.6 kW	-223.8 kVAR	-1930.8 kW	0.0 kVAR

5.3 Análisis de resultados

- Se puede observar, de las tablas 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13, que cuando comienza el movimiento de la turbina para una velocidad de 4m/s; el deslizamiento es 0.44, lo que significa que la maquina empieza a operar con una velocidad menor a la velocidad síncrona, sin embargo en vez de comportarse como motor se comporta como generador, ya que en bornes conectado a la red entrega una potencia de 92.3 kW; logrando esto gracias a la potencia activa que absorbe a través del rotor (74.4 kW). A esta zona de operación (deslizamiento >0 y absorción de potencia por el rotor) se le conoce como zona sub-síncrona.
- Se puede observar, de las tablas 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13, que conforme la velocidad se va incrementando el deslizamiento se va acercando a 0, hasta que para la velocidad de 8 m/s el deslizamiento es -0.03 y el aerogenerador entrega una potencia activa igual a 721.1 kW; entregando a través del rotor una potencia activa igual a 18.8 kW. A esta zona de operación (deslizamiento < 0 y entregando potencia activa por el rotor) se conoce como zona super-síncrona.
- De la tabla 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13; se puede apreciar que una vez que se llega a la potencia máxima que puede transmitir la turbina, se procede a disminuir el ángulo de paso, con la finalidad de reducir la velocidad de rotación y mantener el límite máximo de potencia estable. Se puede apreciar como el deslizamiento empieza a disminuir, hasta que entre la velocidad de 22 a 23 m/s, pasa de la zona super-síncrona a la zona subsíncrona, saliendo de operación cuando la velocidad del viento llega a supera los 25 m/s.
- De la tabla 5.12; salida del inversor conectado a la red a través de la reactancia inductiva $X_s = 0.4 \text{ ohm}$; se puede apreciar que para las velocidades de 4 a 7 m/s y 23 a 25 m/s, cuando se esta absorbiendo potencia activa de la red, la corriente se encuentra a 180° respecto de la tensión de la red, y la tensión V_c en bornes del inversor presenta un ángulo

$\delta(+)$ adelantado a la tensión de la red; comportándose en este instante como un inversor (capítulo 4 – Ítem 4.2.1).

- De la tabla 5.12 y 5.13; salida del inversor conectado a la red a través de la reactancia inductiva $X_s = 0.4 \text{ ohm}$; se puede apreciar que para las velocidades de 8 a 22 m/s, cuando se está entregando potencia activa a la red, la corriente se encuentra a 0° respecto de la tensión de la red (están en fase), y la tensión V_c en bornes del inversor presenta un ángulo $\delta(-)$ atrasado a la tensión de la red; comportándose en este instante como un rectificador (capítulo 4 – Ítem 4.2.1).
- De la tabla 5.12 y 5.13, se puede apreciar que en todo momento a la salida del inversor se está entregando potencia reactiva, la misma que es absorbida en su totalidad por la inductancia $X_s=0.4 \text{ ohm}$.
- Se observa que conforme la eficiencia C_p de la turbina va disminuyendo, las pérdidas de potencia se van incrementando; desde 0.39%, al inicio de operación del aerogenerador, hasta 3.46% al límite de servicio. Esto significa que la potencia activa entregada en bornes del aerogenerador va decayendo respecto de la potencia entregada en el eje de la turbina. El siguiente esquema grafica lo enunciado:

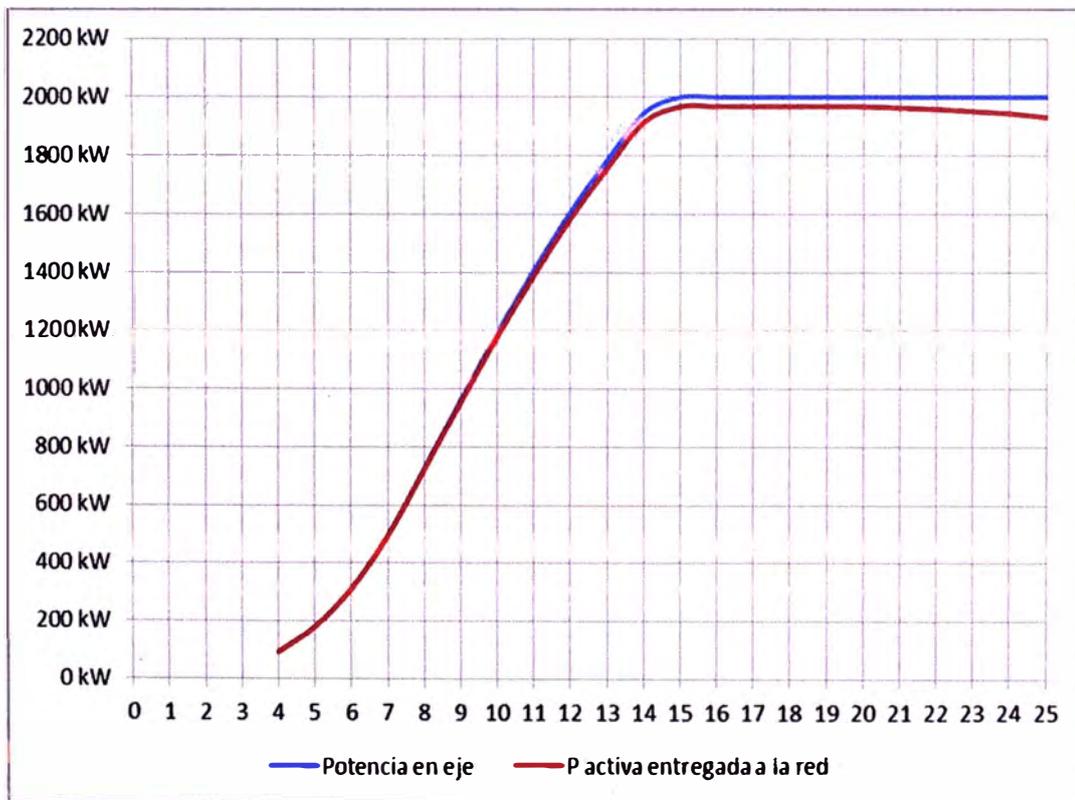


Fig. 5.13: Potencia activa entregada en el eje Vs Potencia activa entrega a la red.

CONCLUSIONES

1. Se ha mostrado el funcionamiento, en estado estacionario, de un aerogenerador con doble alimentación al generador de inducción, de una manera práctica, empleando una hoja de cálculo elaborado en un software de fácil acceso y uso como es el Excel.
2. Se ha realizado una aproximación de la curva C.p. del fabricante tomando como referencia el modelo matemático de las curvas de operación del aerogenerador VESTAS V80-2MW indicado en el paper “Analysis of a Commercial Wind Farm in Taiwan Part I: Measurement Results and Simulations“ de la IEEE; observándose ligeras diferencias entre las mismas; debido a que no se ha considerado el parámetro “ruido”, que también se considera en la determinación del C.p real (C.p Fabricante).
3. A través de los resultados se ha llegado a corroborar toda la teoría, desde el modelo de la eficiencia, el cual es propio de cada turbina, las zonas de operación del generador asíncrono, la operación del inversor conectado a la red entregando potencia y absorbiendo potencia activa; y finalmente la potencia total entregada en bornes del aerogenerador, que para este caso, presenta un factor próximo a la unidad.
4. Se ha verificado que mediante la doble alimentación, se puede generar energía trabajando a velocidades menores que la velocidad de sincronismo; lo cual permite ampliar el rango de velocidades de viento para la generación de energía (se trabaja en un intervalo de velocidades de viento de 4m/s hasta 25 m/s).

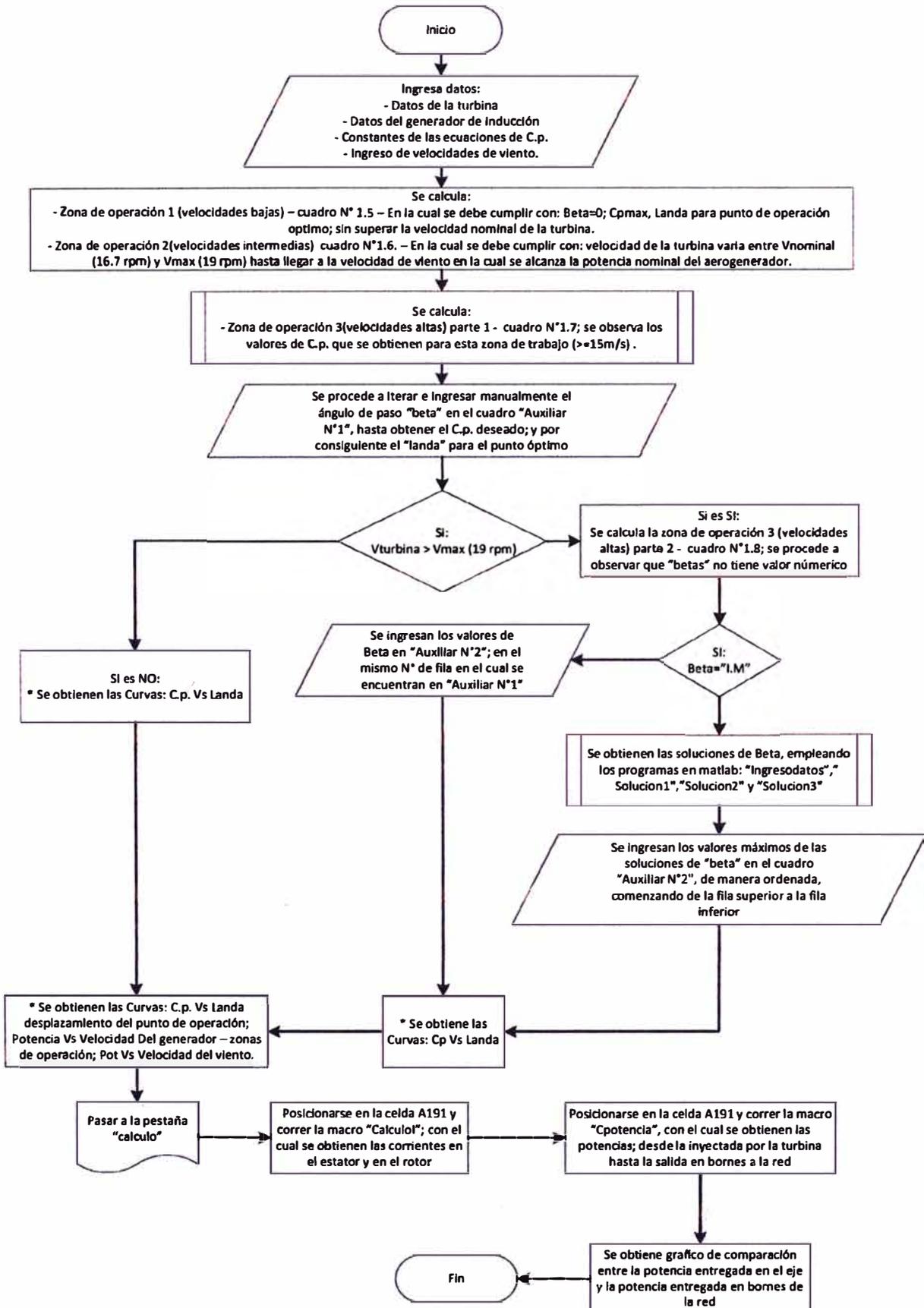
RECOMENDACIONES

1. Aun queda por profundizar mas en el modelo planteado, puesto como se indico al inicio del informe, el análisis realizado es en estado estacionario, mas no en estado transitorio; lo cual implica realizar mejoras en la presente hoja de cálculo para lograr dicho fin; o trasladar lo planteado a software tales como el matlab que facilitan el desarrollo de este tipo de sistemas.
2. Se deberían realizar simulaciones en software de fácil manejo de cada una de las maquinas que se estudian a lo largo de la carrera universitaria, con el fin que los alumnos puedan comprender mejor el comportamiento de cada uno de estos subsistemas (Eléctrico, Control, Mecánico, etc); para luego pasar a los software de flujo de carga como el Digsilent o de análisis de transitorios electromagnéticos como el A.T.P, en los cuales ya se cuentan con modelos de estos equipos.
3. El presente informe ha sido redactado con el objetivo de poder describir, explicar y predecir de manera didáctica una de las tecnologías de aerogeneradores más comerciales del mundo, como es el aerogenerador con doble alimentación al generador de inducción. Esperando que sea de utilidad, tanto el presente informe, como la hoja de cálculo desarrollada para cualquier futuro tesista o persona interesada en entender el funcionamiento y realizar mejoras en cada uno de los subsistemas que corresponden a este tipo de maquinas.

ANEXOS

ANEXO A
DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE CÁLCULO DE LA HOJA EN EXCEL

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE CÁLCULO DE LA HOJA EN EXCEL



ANEXO B
CÓDIGO FUENTE DE PROGRAMA EN MATLAB PARA RESOLVER
ECUACIÓN DE β EN FUNCIÓN DE λ Y CP

CÓDIGO FUENTE DE PROGRAMA EN MATLAB PARA RESOLVER ECUACIÓN DE β EN FUNCIÓN DE λ Y CP

```

%ingresar datos
y=input('ingresar Cp: ');
z=input('ingresar landa: ');

%ecuación a resolver-solución 1
fun=inline('y-0.00581*z-0.5176*(116*((1/(0.855*z+0.08*beta))-
(0.035/((beta^3)+1)))-0.4*beta-5)*exp(-21*((1/(0.855*z+0.08*beta))-
(0.035/((beta^3)+1))))');
beta1=fzero(fun,[0,10],[],y,z)

%ecuación a resolver - Solución 2
fun=inline('y-0.00581*z-0.5176*(116*((1/(0.855*z+0.08*beta))-
(0.035/((beta^3)+1)))-0.4*beta-5)*exp(-21*((1/(0.855*z+0.08*beta))-
(0.035/((beta^3)+1))))');
beta2=fzero(fun,[10,20],[],y,z)

%ecuación a resolver - Solución 3
fun=inline('y-0.00581*z-0.5176*(116*((1/(0.855*z+0.08*beta))-
(0.035/((beta^3)+1)))-0.4*beta-5)*exp(-21*((1/(0.855*z+0.08*beta))-
(0.035/((beta^3)+1))))');
beta3=fzero(fun,[40,[],y,z)
clear

```

ANEXO C
CATÁLOGO DEL AEROGENERADOR

V80-2,0 MW

Versatilidad en megavatios

Vestas[®]
No. 1 in Modern Energy

Versatilidad en megavatios

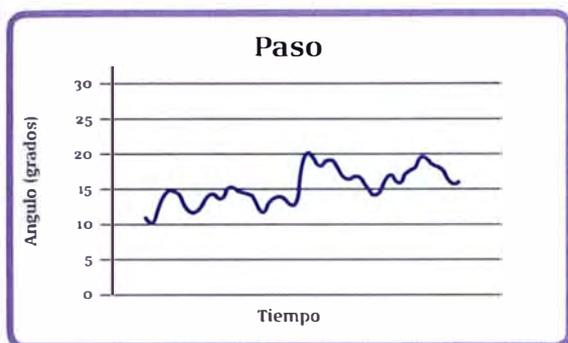


En muchos campos de la ingeniería, la flexibilidad y la eficiencia son consideradas casi diametralmente opuestas. Es decir, sólo puede mejorarse una a expensas de la otra. En Vestas nos especializamos en buscar maneras de mejorar ambas a la vez. Para ver cómo lo conseguimos, sólo tiene ver el V80, la piedra angular de nuestra categoría de 2 MW.

El V80 es un aerogenerador con regulación de paso para vientos medios y altos, que incorpora OptiSpeed®, una tecnología de velocidad variable que permite una variación de las velocidades de giro del rotor de aproximadamente un 60% en relación con la velocidad nominal. Eso significa que, con OptiSpeed®, la velocidad del rotor puede variar hasta un 30% por encima o por debajo de la velocidad sincrónica. Por lo tanto, OptiSpeed® incrementa significativamente la productividad y hace posible mantener los niveles sonoros dentro de los límites estipulados por las normativas locales.

Esta flexibilidad, mejorada con la amplia gama de alturas de torre, hace que el aerogenerador V80 sea especialmente adecuado para una gran variedad de ubicaciones, tanto en tierra como en el mar.

Junto con OptiTip®, nuestro sistema de regulación de paso, OptiSpeed® proporciona al V80 una ventaja sobre el resto de modelos de su clase. Esta ventaja, respaldada por la reputación de fiabilidad, la gestión de proyectos y el servicio de mantenimiento de alto nivel de Vestas, ha hecho del V80 uno de los aerogeneradores más vendidos del mundo. La popularidad de este aerogenerador significa que podemos mantener los costes de producción (y por tanto, sus costes por kWh) al mínimo.



OptiSpeed® permite una variación de las velocidades de giro del rotor de un 60% aproximadamente en relación con la velocidad nominal. Así, con OptiSpeed®, la velocidad del rotor puede variar hasta un 30% por encima o por debajo de la velocidad sincrónica. Esto reduce las fluctuaciones no deseadas en la producción suministrada a la red eléctrica y minimiza las cargas en las partes esenciales del aerogenerador.

Rotor

Diámetro:	80 m
Área barrida:	5.027 m ²
Velocidad de giro nominal:	16,7 rpm
Intervalo operativo:	9-19 rpm
Número de palas:	3
Regulación de potencia:	Paso/OptiSpeed®
Freno neumático:	Tres cilindros hidráulicos de paso independientes

Torre

Altura del buje (aprox.):	60 m, 67 m, 78 m, 100 m
---------------------------	-------------------------

Datos operativos

Velocidad de arranque:	4 m/s
Velocidad de viento nominal (2.000 kW):	15 m/s
Velocidad de corte:	25 m/s

Generador

Tipo:	Asíncrono con OptiSpeed®
Producción nominal:	2.000 kW
Datos operativos:	50 Hz/60 Hz 690 V

Multiplicadora

Tipo:	Ejes paralelos/planetarios
-------	----------------------------

Control

Tipo:	Control basado en microprocesador de todas las funciones del aerogenerador con opción de supervisión remota. Optimización y regulación de producción mediante OptiSpeed® y regulación de paso OptiTip®.
-------	---

Peso

Góndola:	67 t
Rotor:	37 t

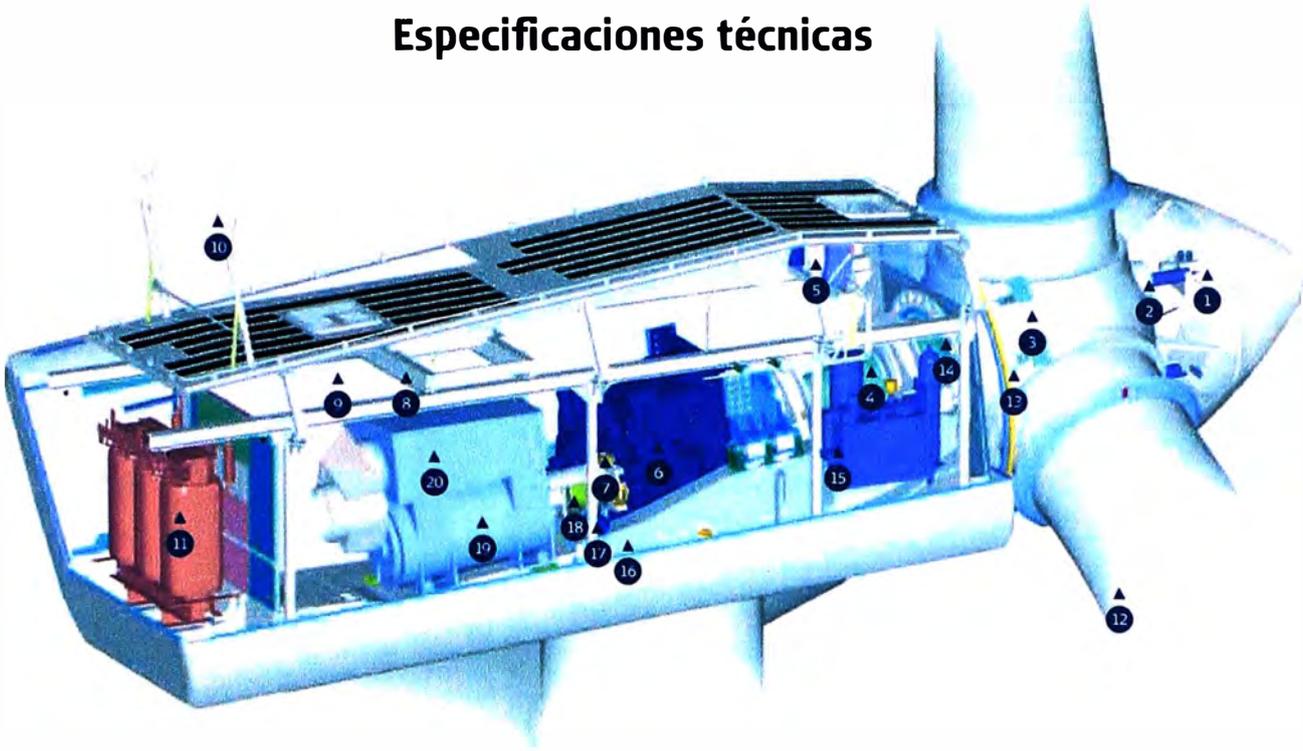
Torre:				
Altura del buje:	IEC IA	IEC IIA	DIBt II	DIBt III
60 m	130 t	120 t	-	125 t
67 m	160 t	135 t	-	-
78 m	205 t	190 t	165 t	199 t
100 m	-	225 t	200 t	-

t = toneladas métricas

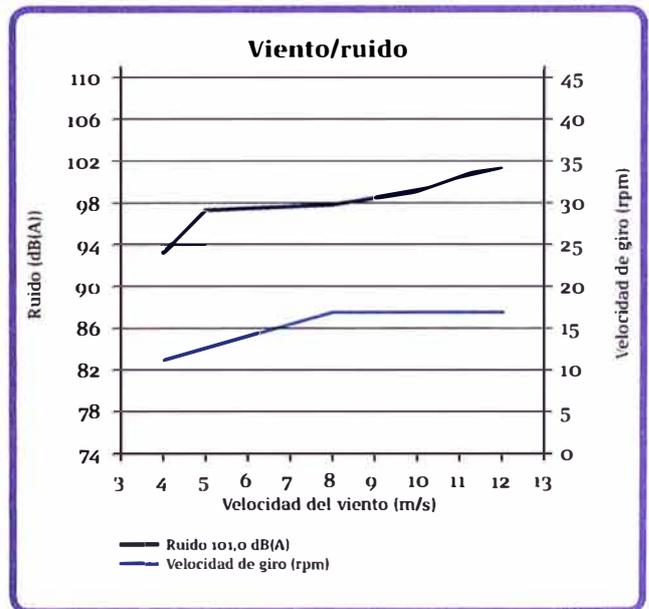
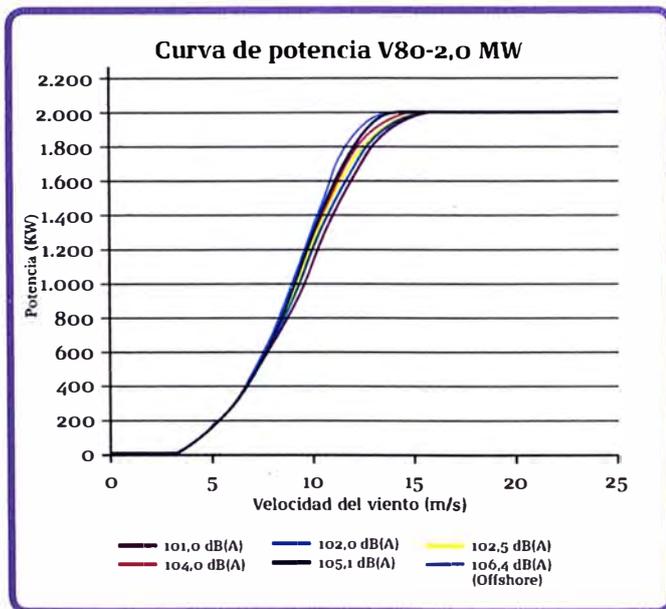
Las torres DIBt sólo han sido aprobadas en Alemania.

Todas las especificaciones están sujetas a modificaciones sin preaviso.

Especificaciones técnicas

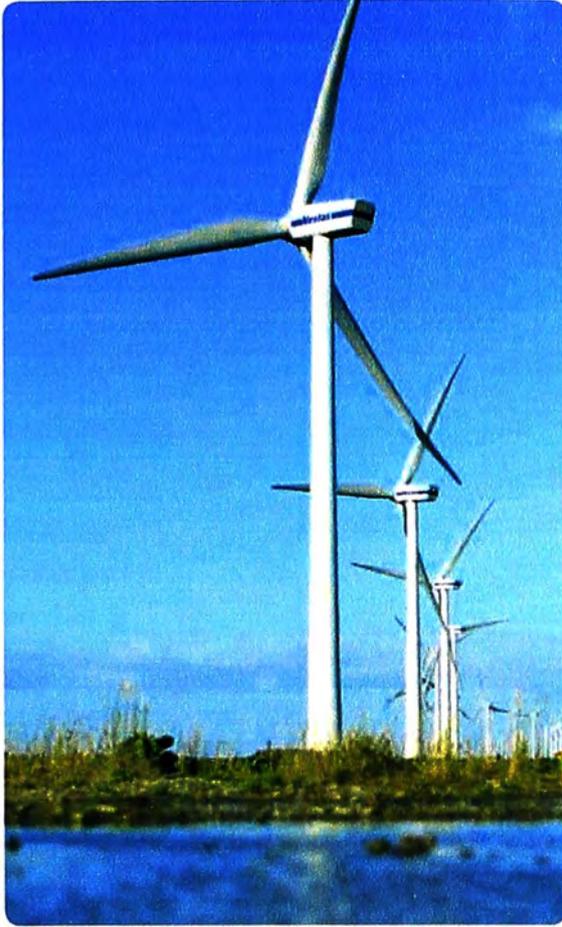


- | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|--|
| ● Controlador del buje | ● Multiplicadora | ● Transformador de alta tensión | ● Chasis |
| ● Cilindros de control de paso | ● Freno de disco mecánico | ● Pala | ● Motor reductores de orientación |
| ● Buje | ● Puente grúa | ● Rodamiento de pala | ● Acoplamiento |
| ● Eje principal | ● Controlador VMP-Top con convertidor | ● Sistema de bloqueo del rotor | ● Generador OptiSpeed* |
| ● Refrigerador de aceite | ● Sensores ultrasónicos | ● Unidad hidráulica | ● Refrigerador de aire para el generador |



La figura anterior indica las curvas de energía a diferentes niveles de sonido para el aerogenerador V80-2,0 MW, que está equipado con OptiSpeed*.

El nivel de producción de ruido se ajusta variando la velocidad de giro del aerogenerador como se indica en la figura anterior. Se muestran claramente las ventajas de los niveles de ruido de las velocidades de giro más bajas, ya que el nivel de ruido aproximado es de 7 dB(A) menos a 4 m/s que a 8 m/s. Con respecto a otros niveles de ruido, la diferencia puede llegar a ser hasta de 10 dB(A). Asimismo, debe tenerse en cuenta que una disminución de 3 dB(A) representa la reducción del nivel de ruido a la mitad.



Versatilidad en megavatios

El aerogenerador V80-2,0 MW ha sido diseñado para sacar el máximo partido a los emplazamientos de la categoría IEC I, puesto que proporciona una productividad incomparable tanto con vientos elevados como moderados. Ya se han instalado más de 2.700 aerogeneradores del modelo V80 en todo el mundo, y han demostrado su valía tanto en entornos marinos como terrestres. Su alto rendimiento energético hace del V80 una excelente elección para ubicaciones en las que el espacio es limitado. Asimismo, presenta un excelente historial afrontando las más duras condiciones marítimas, en las que su alta disponibilidad operativa, su excelente adaptación a la red, y su probada tecnología lo convierten en una alternativa competitiva tanto en coste como en rendimiento.

Uno de los factores que contribuyen al superior rendimiento del aerogenerador V80-2,0 MW es OptiTip®, su sistema de regulación de paso. Este sistema incorpora microprocesadores que giran las palas sobre sus ejes longitudinales, asegurando un ajuste continuo para mantener los ángulos de pala óptimos en relación con el viento dominante. Al mismo tiempo, OptiTip® hace posible el

mantenimiento de los niveles de ruido dentro de los límites estipulados por las normativas locales.

Máxima producción

Otro factor que ayuda a maximizar la eficiencia y a minimizar el nivel de ruido del V80 es OptiSpeed®*. El generador OptiSpeed® permite que la velocidad del rotor del aerogenerador varíe entre 9 y 19 rpm dependiendo de las condiciones ambientales. Si bien la tecnología implicada es avanzada, su objetivo es sencillo: optimizar la producción. Para alcanzar este objetivo, se aprovecha el mayor rendimiento de la rotación lenta y variable, se almacena el exceso de energía en forma rotatoria y se explota toda la fuerza de las rachas pasajeras. Como resultado, OptiSpeed® incrementa la producción anual de energía.

Como beneficio adicional, OptiSpeed® también reduce las tensiones en la multiplicadora, en las palas y en la torre gracias a los menores picos de carga. Además, puesto que el sonido de un aerogenerador depende de la velocidad del viento, la menor velocidad de rotación que permite OptiSpeed® reduce de forma natural los niveles de ruido.

Finalmente, la tecnología OptiSpeed® permite al V80 suministrar energía de mejor calidad a la red, con una sincronización rápida, una distorsión armónica reducida y menores fluctuaciones. Simple y llanamente, el aerogenerador V80-2,0 MW es sinónimo de mayor producción, energía de mejor calidad, menores tensiones mecánicas y menos ruido.

Rendimiento demostrado

Los parques de energía eólica requieren grandes inversiones y el proceso puede ser muy complicado. Para facilitar el proceso de evaluación y compra, Vestas ha identificado tres factores decisivos que determinan la calidad y rendimiento de un aerogenerador: la producción energética, la calidad energética y los niveles de ruido.

Pasamos varios meses ensayando y documentando el rendimiento de nuestros aerogeneradores. Una vez plenamente satisfechos, realizamos una última comprobación mediante una organización independiente que verifica los resultados. Esta es una práctica normal en Vestas, un procedimiento que denominamos Proven Performance (Rendimiento Demostrado). En Vestas no nos limitamos a hablar de calidad. Se la demostramos con hechos.

* OptiSpeed® de Vestas no está disponible en EE.UU. ni Canadá.

Vestas Mediterranean
Edificio Sarrià Forum B Planta 4a
Can Rabia, 3-5
08017 Barcelona
España
Tel.: +34 932 41 98 00
Fax: +34 932 41 40 80
vestas-mediterranean@vestas.com
www.vestas.com

Puede encontrar un listado completo
de todas nuestras oficinas de venta
y servicio en www.vestas.com

ANEXO D
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL AEROGENERADOR

Electrical Description

History of this Document

Rev. no.:	Date:	Description of change
0		First edition
2	2003-10-08	Section 3: "The rated power of the transformer can be increased by 40% if they are equipped with 6 fans for forced cooling (AF - Air Forced)" has been deleted. Section 6: "Neutral earth" changed to "earth". 180 replaced by 180°. Section 9 updated.
3	2003-11-26	Section 9: "AGO" added.
4	2005-06-02	"Medium Voltage" replaced with "High Voltage" Nameplates for V80-1.8MW and V90-2.0MW added in section 7

Page 4: In section title, "50Hz" removed

Page 5: In section title, "50Hz" removed

Page 6: In section title, "50Hz" removed

Added name plates:

V66-1.75MW / 60 Hz

V66-2.0MW / 60 Hz

V80-2.0MW / 60 Hz

V80-2.0MW / 50 Hz

V90-1.8MW / 60 Hz

V90-2.0MW / 60 Hz

Contents	Page
1. High Voltage Grid Connection	3
2. Transformer	3
3. Transformer Data	3
4. High Voltage-Circuit Breaker	7
5. Earthing	7
6. The Earthing System of the Wind Turbine/Lightning Protection	7
7. Nameplate on the Nacelle Controller	9
8. Short Curcuit Protection of the Nacelle Controller	14
9. Monitoring of the Grid	14
10. Component Prefix	15
11. Component Numbers	16
12. Assembly and Terminal Designation	17

1. High Voltage Grid Connection

The turbine can be connected to the grid in the range from 6 kV to 33 kV, where 36 kV (Um) is the highest equipment voltage. The high voltage grid cables are led through a 200 mm tube in the foundation to the high voltage circuit breaker which is placed at the bottom of the tower.

The voltage of the high-voltage grid shall be within +5 / -5 %. Steady variations within +1 / -3 Hz are acceptable. Intermitted or rapid fluctuations off the grid's frequency may cause serious damage to the turbine. Grid dropouts must only take place once a week as an average over the lifetime of the turbine.

2. Transformer

The transformer is located in the nacelle. The winding is delta connected on the HV-side unless anything else is specified. The winding is connected in star on the LV-side (690V). The 690V system in the nacelle is a TN-system, which means that the star point is connected to earth.

The transformer is a three-phase dry type transformer, which is self-extinguishing.

3. Transformer Data

Three phased transformers for indoor use.

Fittings: 2 pcs. PT100 sensors per phase

Design, manufacturing, routine tests and tolerances according to IEC 76 and IEC 726 standards.

Transformer 10.5 kV.

Rated power 690V:	S_r	=	1902 kVA (AF - Air Forced)
Rated power 480V:	S_r	=	205 kVA (AF - Air Forced)
Frequency:	f	=	50 or 60 Hz
Primary voltage:	U	=	10500 V
Secondary voltage:	U_s	=	690/480 V
No load losses:	P_0	≤	3900 W
Impedance losses at rated load (75°C):	$P_{Cu(75°C)}$	≤	14400 W
Impedance losses at rated load (120°C):	$P_{Cu(120°C)}$	≤	16500 W
Impedance voltage 690V, 1902kVA:	e_k	≥	7 %
Short circuit current 690V, 1902kVA:	$I_{max,3p}$	≤	23 kA
Short circuit current 480V, 205kVA:	$I_{max,3p}$	≤	36 kA
Full load current at 10,5 kV:	$I_{10,5kV}$	=	110/115 A (Cosφ=1/0,96)
Tap changer:	n_{tp}	=	±2x2,5 %
Highest equipment voltage:	U_m	=	12 kV
Power frequency voltage (50 Hz, 1 min.):	U_d	=	28 kV (RMS)
Lightning impulse voltage BIL (1,2/50 μs):	U_p	=	75 kV
LV clearance voltage:		=	1,1 kV
LV test voltage (50 Hz, 1 min.):		=	3 kV
Connection:		=	Dyn5 or Dyn11
Weight:		<	5500 kg
Max. ambient temperature:		=	50°C
Max. daily average temperature:		=	40°C
Max. yearly average temperature:		=	30°C
Max. temperature rise (hotspot):	$\Delta T_{(Pt100)}$	=	95 K
Reduction of generator power (hotspot):	$T_{(Pt100)}$	=	145°C
Cut out of generator (hotspot):	$T_{(Pt100)}$	=	150°C
Cut out of HV-grid (hotspot):	$T_{(Pt100)}$	=	155°C
Temperature class:		=	F
Environment class:		=	E2
Climate class:		=	C2
Fire behavior class:		=	F1

Transformer 20 kV.

Rated power 690V:	S_r	=	1902 kVA (AF - Air Forced)
Rated power 480V:	S_r	=	205 kVA (AF - Air Forced)
Frequency:	f	=	50 or 60 Hz
Primary voltage:	U	=	20000 V
Secondary voltage:	U_s	=	690/480 V
No load losses:	P_0	≤	3900 W
Impedance losses at rated load (75°C):	$P_{Cu(75°C)}$	≤	14400 W
Impedance losses at rated load (120°C):	$P_{Cu(120°C)}$	≤	16500 W
Impedance voltage 690V, 1902kVA:	e_k	≥	7 %
Short circuit current 690V, 1902kVA:	$I_{max,3p}$	≤	23 kA
Short circuit current 480V, 205kVA:	$I_{max,3p}$	≤	36 kA
Full load current at 20 kV:	I_{20kV}	=	58/60 A (Cosφ=1/0,96)
Tap changer:	n_{tp}	=	±2x2,5 %
Highest equipment voltage:	U_m	=	24 kV
Power frequency voltage (50 Hz, 1 min.):	U_d	=	50 kV (RMS)
Lightning impulse voltage BIL (1,2/50 μs):	U_p	=	125 kV
LV clearance voltage:		=	1,1 kV
LV test voltage (50 Hz, 1 min.):		=	3 kV
Connection:		=	Dyn5 or Dyn11
Weight:		<	5500 kg
Max. ambient temperature:		=	50°C
Max. daily average temperature:		=	40°C
Max. yearly average temperature:		=	30°C
Max. temperature rise (hotspot):	$\Delta T_{(Pt100)}$	=	95 K
Reduction of generatorpower (hotspot):	$T_{(Pt100)}$	=	145°C
Cut out of generator (hotspot) :	$T_{(Pt100)}$	=	150°C
Cut out of HV-grid (hotspot) :	$T_{(Pt100)}$	=	155°C
Temperature class:		=	F
Environment class:		=	E2
Climate class:		=	C2
Fire behavior class:		=	F1

Transformer 33 kV.

Rated power 690V:	S_r	=	1902 kVA (AF - Air Forced)
Rated power 480V:	S_r	=	205 kVA (AF - Air Forced)
Frequency:	f	=	50 or 60 Hz
Primary voltage:	U	=	33000 V
Secondary voltage:	U_s	=	690/480 V
No load losses:	P_0	≤	3900 W
Impedance losses at rated load (75°C):	$P_{Cu(75°C)}$	≤	14400 W
Impedance losses at rated load (120°C):	$P_{Cu(120°C)}$	≤	16500 W
Impedance voltage 690V, 1902kVA:	e_k	≥	7 %
Short circuit current 690V, 1902kVA:	$I_{max,3p}$	≤	23 kA
Short circuit current 480V, 205kVA:	$I_{max,3p}$	≤	36 kA
Full load current at 33 kV:	I_{33kV}	=	35/36 A (Cosφ=1/0,96)
Tap changer:	n_{tp}	=	±2x2,5 %
Highest equipment voltage:	U_m	=	36 kV
Power frequency voltage (50 Hz, 1 min.):	U_d	=	70 kV (RMS)
Lightning impulse voltage BIL (1,2/50 μs):	U_p	=	170 kV
LV clearance voltage:		=	1,1 kV
LV test voltage (50 Hz, 1 min.):		=	3 kV
Connection:		=	Dyn5 or Dyn11
Weight:		<	5500 kg
Max. ambient temperature:		=	50°C
Max. daily average temperature:		=	40°C
Max. yearly average temperature:		=	30°C
Max. temperature rise (hotspot):	$\Delta T_{(Pt100)}$	=	95 K
Reduction of generatorpower (hotspot):	$T_{(Pt100)}$	=	145°C
Cut out of generator (hotspot):	$T_{(Pt100)}$	=	150°C
Cut out of HV-grid (hotspot) :	$T_{(Pt100)}$	=	155°C
Temperature class:		=	F
Environment class:		=	E2
Climate class:		=	C2
Fire behavior class:		=	F1

4. High Voltage-Circuit Breaker

Selection of high voltage-circuit breaker depends on the short circuit level.

- 1) Circuit breaker.
A circuit breaker is able to protect the transformer cable (3x25+25 mm²) up to 11 kA.
- 2) Fuses.
Fuses protect the cable if high short circuit currents occur. However, there might be problems with the selectivity to short circuit protection of the high voltage-grid.
- 3) Circuit breaker and fuses.
Fuses protect the cable at high short circuit currents, and it is possible to get the selectivity to short circuit protection of the high voltage-grid.

The high voltage-circuit breaker must be equipped with a trip coil (230 V) which can be activated by the VMP-controller and manually from the nacelle.

If the high voltage-circuit breaker is selected as a "ring main unit", it is possible to loop further on to e.g. other turbines.

5. Earthing

It has to be possible to make an earthing on the grid side and on the turbine side. It is possible to make an earthing in the nacelle. Equipment for the earthing in the nacelle is not supplied from Vestas.

6. The Earthing System of the Wind Turbine/Lightning Protection

The system should be made at the same time as the foundation work.

The earthing system must be accommodated to local soil conditions. The resistance to earth must be according to the requirements of the local authorities, but no more than 10 Ω.

The earthing system must be made as a closed ring conductor with earthing rods providing the following advantages:

1. **Personnel safety.**
The ring conductor limits step and contact voltage for persons, staying near the tower foundation in case of a lightning stroke.

2. Operational safety.

The earthing rods ensure a steady and low resistance to earth for the whole earthing system.

The earthing system is made as follows:

1. Ring conductor in 50 mm² Cu is established at a distance of 1 m from the foundation and approx. 1 m below ground level.
2. The ring conductor is equipped with 2 copper coated earthing rods, each of 6 m (Ø14). The earthing rods are rammed down on each side of the tower (180° between the earthing rods).
3. The ring conductor is connected to two opposite points on the tubular tower. The nacelle controller is connected to one of these points.

If the resistance to earth is not sufficiently low, the earthing system can be improved.

1. The two earthing rods can be extended to 10 m.

Two extra earthing rods each of a length of 10 m can be added (90° between the 4 earthing rods).

7. Nameplate on the Nacelle Controller

1.75 MW

		 2000
Vestas Wind Systems A/S Alsvej 21 DK-800 Randers Tlf. (+45) 97 30 00 00 Fax. (+45) 97 30 00 01		
Wind Turbine type:	V66-1.75MW	
Controller type:	VMP- 1.75/2.0MW	
Voltage:	3x690 V +10/-10%	
Voltage:	3x480 V +10/-10%	
Frequency:	50 Hz +1/-3 Hz	
Current 690V:	1418A	
Current 480V:	213A	
Max. short circuit current 690V:	$I_k = 23kA$	
Max. short circuit current 480V:	$I_k = 36kA$	
Main wiring diagram:	946471-946478	

		 2000
Vestas Wind Systems A/S Alsvej 21 DK-800 Randers Tlf. (+45) 97 30 00 00 Fax. (+45) 97 30 00 01		
Wind Turbine type:	V66-1.75MW	
Controller type:	VMP- 1.75/2.0MW	
Voltage:	3x690 V +10/-10%	
Voltage:	3x480 V +10/-10%	
Frequency:	60 Hz +2/-3 Hz	
Current 690V:	1418A	
Current 480V:	213A	
Max. short circuit current 690V:	$I_k = 23kA$	
Max. short circuit current 480V:	$I_k = 36kA$	
Main wiring diagram:	946471-946478	

1.8MW

		 2000
Vestas Wind Systems A/S Alsvej 21 DK-800 Randers Tlf.(+45) 97 30 00 00 Fax. (+45) 97 30 00 01		
Wind Turbine type:	V90-1.8MW	
Controller type:	VMP- 1.75/2.0MW	
Voltage:	3x690 V +10/-10%	
Voltage:	3x480 V +10/-10%	
Frequency:	50 Hz +2/-3 Hz	
Current 690V:	1378A	
Current 480V:	220A	
Max. short circuit current 690V:	$I_K = 23kA$	
Max. short circuit current 480V:	$I_K = 36kA$	
Main wiring diagram:	946471-946478	

		 2000
Vestas Wind Systems A/S Alsvej 21 DK-800 Randers Tlf.(+45) 97 30 00 00 Fax. (+45) 97 30 00 01		
Wind Turbine type:	V90-1.8MW	
Controller type:	VMP- 1.75/2.0MW	
Voltage:	3x690 V +10/-10%	
Voltage:	3x480 V +10/-10%	
Frequency:	60 Hz +2/-3 Hz	
Current 690V:	1378A	
Current 480V:	220A	
Max. short circuit current 690V:	$I_K = 23kA$	
Max. short circuit current 480V:	$I_K = 36kA$	
Main wiring diagram:	946471-946478	

2.0MW

		 2000
Vestas Wind Systems A/S Alsvej 21 DK-800 Randers Tlf.(+45) 97 30 00 00 Fax. (+45) 97 30 00 01		
Wind Turbine type:	V66-2.0MW	
Controller type:	VMP- 1.75/2.0MW	
Voltage:	3x690 V +10/-10%	
Voltage:	3x480 V +10/-10%	
Frequency:	50 Hz +1/-3 Hz	
Current 690V:	1600A	
Current 480V:	240A	
Max. short circuit current 690V:	$I_K = 23kA$	
Max. short circuit current 480V:	$I_K = 36kA$	
Main wiring diagram:	946471-946478	

		 2000
Vestas Wind Systems A/S Alsvej 21 DK-800 Randers Tlf.(+45) 97 30 00 00 Fax. (+45) 97 30 00 01		
Wind Turbine type:	V66-2.0MW	
Controller type:	VMP- 1.75/2.0MW	
Voltage:	3x690 V +10/-10%	
Voltage:	3x480 V +10/-10%	
Frequency:	60 Hz +2/-3 Hz	
Current 690V:	1600A	
Current 480V:	240A	
Max. short circuit current 690V:	$I_K = 23kA$	
Max. short circuit current 480V:	$I_K = 36kA$	
Main wiring diagram:	946471-946478	



Vestas Wind Systems A/S

Alsvej 21 DK-800 Randers

Tlf. (+45) 97 30 00 00 Fax. (+45) 97 30 00 01



2000

Wind Turbine type:	V80-2.0MW
Controller type:	VMP- 1.75/2.0MW
Voltage:	3x690 V +10/-10%
Voltage:	3x480 V +10/-10%
Frequency:	60 Hz +2/-3 Hz
Current 690V:	1600A
Current 480V:	240A
Max. short circuit current 690V:	$I_k = 23kA$
Max. short circuit current 480V:	$I_k = 36kA$
Main wiring diagram:	946471-946478



Vestas Wind Systems A/S

Alsvej 21 DK-800 Randers

Tlf. (+45) 97 30 00 00 Fax. (+45) 97 30 00 01



2000

Wind Turbine type:	V80-2.0MW
Controller type:	VMP- 1.75/2.0MW
Voltage:	3x690 V +10/-10%
Voltage:	3x480 V +10/-10%
Frequency:	50 Hz +1/-3 Hz
Current 690V:	1600A
Current 480V:	240A
Max. short circuit current 690V:	$I_k = 23kA$
Max. short circuit current 480V:	$I_k = 36kA$
Main wiring diagram:	946471-946478



Vestas Wind Systems A/S
 Alsvej 21 DK-800 Randers
 Tlf. (+45) 97 30 00 00 Fax. (+45) 97 30 00 01



2000

Wind Turbine type:	V90-2.0MW
Controller type:	VMP- 1.75/2.0MW
Voltage:	3x690 V +10/-10%
Voltage:	3x480 V +10/-10%
Frequency:	50 Hz +1/-3 Hz
Current 690V:	1600A
Current 480V:	240A
Max. short circuit current 690V:	$I_K = 23kA$
Max. short circuit current 480V:	$I_K = 36kA$
Main wiring diagram:	946471-946478



Vestas Wind Systems A/S
 Alsvej 21 DK-800 Randers
 Tlf. (+45) 97 30 00 00 Fax. (+45) 97 30 00 01



2000

Wind Turbine type:	V90-2.0MW
Controller type:	VMP- 1.75/2.0MW
Voltage:	3x690 V +10/-10%
Voltage:	3x480 V +10/-10%
Frequency:	60 Hz +1/-3 Hz
Current 690V:	1600A
Current 480V:	240A
Max. short circuit current 690V:	$I_K = 23kA$
Max. short circuit current 480V:	$I_K = 36kA$
Main wiring diagram:	946471-946478

8. Short Circuit Protection of the Nacelle Controller

Breakers 690V	Generator / Q8 ABB S7H 1600	Controller / Q15 ABB S3X	VCS / Q7 ABB S5H 400
Breaking capacity, I_{cu} , I_{cs}	23 kA	75 kA	40 kA
Making capacity, I_{cm}	52 kA	440 kA	40 kA
Thermo release, I_{th}	1600A	100 A	400 A
Magnetic release, I_m	9.6 kA	1.0 kA	1600 A

9. Monitoring of the Grid

The generator will be disconnected if the voltage or the frequency exceeds the following limits (measured at the 690 V side):

Nominal phase voltage:

$U_{P,nom} = 400 \text{ V}$.

Phase voltage:

U_P

Grid voltage:

U_N

The generator and the converter will be disconnected if:

The voltage is 10 % above the nominal voltage for 60 s.

U_P U_N
440 V 762 V

The voltage is 10 % below the nominal voltage for 60 s.

360 V 624 V

The voltage is 13.5 % above the nominal voltage for 0.2 s.

454 V 786 V

The frequency is above 51 Hz for 0.2 s.

The frequency is below 47 Hz for 0.2 s.

If a fault on the grid interrupts and the voltage supply to the VMP-controller, the emergency stop circuit will be opened immediately, and the generator will be disconnected simultaneously. In case the turbine has an Advanced Grid Option (AGO) the control system is supplied from an UPS system and the generator is kept connected until the voltage tolerance curve for the specific AGO solution is exceeded.

10. Component Prefix

This chapter explains the rules for stating the name of the components used in the controller.

Components, in- and output are named with the following letter prefix:

Prefix	Subject
A	Group of components, e.g. top and ground controller
B	Electronical signal ground controller, e.g. windvane, thermostat, sensor
D	Auxiliary Relay
E	Heating element/fan
F	Thermo relay/circuit breaker/fuse
G	Generator
H	Signal lamp
K	Contactator, relay
L	Coil, discharge coil
M	Motor
Q	Circuit breaker for main current circuit
R	Resistance (temperature sensors)
S	Switch function
T	Transformer
U	Rectifier
V	Thyristor
W	Cable
X	Terminal
Y	Magnetic valve

11. Component Numbers

Components, in- and output are named with the following number:

Component number	Number group	
0.. 99	Electric installation	
100..199	Yaw System	
200..299	Hydraulic System	
300..399	Ambient	
400..499	Transmission System/VOG	
500..599	Generator/VCS	
600..699	Control System/VCS	
700..799	Control System	
800..899	Control System - Hub	
900..999	Emergency Stop	

In- and output have the same number, if these have connection with the same component (e.g. control signal and feedback from contactor). The distinction is made by means of the signal's letter prefix.

Two components with a complete parallel function have the same number, but they can be distinguished by means of a subsequent letter (E.g.: K100A, K100B).

The auxiliary relays are defined as a component, which exclusively functions as a connecting link between e.g. a computer output and a contactor coil. The auxiliary relays have the letter prefix D and the same number as the component, which they serve.

12. Assembly and Terminal Designation

VMP-1,75/2,0MW controller include the following assemblies:

A1	:	Busbar section.
A2	:	Hub controller.
A3	:	VCS section.
A4	:	Control section..
A5	:	Ground controller.
A6A	:	Box for ultrasonic sensor.
A6B	:	Box for ultrasonic sensor.
A7	:	Box on rotating transformer.
A8	:	Box on gear (sensors).
A9	:	Box for sensors at the main shaft.
A10	:	Box on generator.
A11	:	Box for sensors for the yaw system.
A14	:	Box for heating elements on the gear box.
A15	:	Box for transformer ventilation (trafo wall).
A16	:	Box for termistor on transformer vent. motors.
A18	:	Box for LT Heating systems in systems
A32	:	Box for Hydraulic systems
A33	:	Box on sliprings champer – generator
A34	:	Box on sliprings champer – Gear
A35	:	Box on offline filter gear

Example of designation of terminals:

Nacelle controller (A1), terminal block X4, terminal 8:	A1.X4:8
Hub controller (A2), terminal block X1, terminal 4:	A2.X1:4
Component K44, terminal 3:	K44:3
Component K903, terminal 5:	K903:5

ANEXO D
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL AEROGENERADOR

Technical Specifications/Main Components

History of this Document

Changes in this document:

Rev. no.:	Date:	Description of change
1	2002-01-17	(adapting the document for V80 1,8 MW) Section 2.3: 60Hz added. 215 bar changed to 200 bar. "Weight with oil cooler - 525 kg (1.8MW)" added. Section 4: 50/60Hz types added. Section 5.1: 117 l/min changed to 100 l/min. Section 5.4: "HDU 15/25 PM-690V (60Hz)" added. Section 5.2, 5.6, 5.7 and 5.9 specified for L&S and Hansen gearboxes. Section 5.5: 60Hz type added. Section 6.3: 800 and \varnothing 108 changed to 950 and \varnothing 109. Section 8: New types added. Updating of section 8. Section 10: New types added. Updating of section 10.
2	2005-03-11	Section 1: "thread" added to "Stainless steel inserts" To "Colour" "custom-designed" has been added Section 2.3: Pressure, brake system: 50Hz and 60 Hz added Section 9.1: Weight for ABB generator changed Leroy Somer removed; Table added Section 10.1: V80 VRCC added; Table added Section 13.1: FT sensor added Drawing 950645 updated to revision 2 Drawing 950646 updated to revision 1

Related Documentation

Item no.	Title
947905	V80 1,8/2,0MW, Klasse II, Tekniske spesifikationer for hovedkomponenter

Contents	Page
1. Rotor	3
1.1 Blade	3
1.2 Blade Bearing.....	3
1.3 Nose Cone	3
1.4 Blade Hub.....	3
2. Pitch System	3
2.1 Hydraulic Cylinder	3
2.2 Linear Transducer in Cylinder	3
2.3 Hydraulic Power Unit.....	4
2.4 Hydraulic Block on Cylinder	4
2.5 Plain Bearing on Cylinder.....	4
2.6 Spherical Plain Bearing on Cylinder Rod.....	4

3.	Main Shaft Arrangement	4
3.1	Main Shaft	4
3.2	Front Main Bearing (nearest to the rotor).....	4
3.3	Rear Main Bearing (furthest from the rotor)	5
3.4	Front Main Bearing Seal	5
3.5	Rear Main Bearing Seal	5
3.6	Hydraulic Cylinder for Rotor Locking	5
3.7	Manuel Hydraulic Pump for Rotor Locking	5
4.	Main Gearbox Arrangement	5
4.1	Gearbox.....	5
4.2	Shrink Disc	6
4.3	Torque Arm Rubber Spring	6
4.4	Brake Calibre	6
4.5	Brake Pad.....	6
4.6	Transmission Shaft	6
5.	Gearbox Oil System	7
5.1	Electrical Pump	7
5.2	Shaft Driven Pump	7
5.3	Oil Filter	7
5.4	Off-line Filter.....	7
5.5	Oil Coolers.....	7
5.6	Oil Heating Elements	7
5.7	Oil Level Switch.....	8
5.8	Oil Sump Temperature Sensor	8
5.9	Bearing Temperature Sensor.....	8
6.	Rotating Transference	8
6.1	Rotating Trafo	8
6.2	Rotating ARC-net	8
6.3	Rotating Hydraulic Union	9
7.	Machinery Foundation	9
7.1	Main beam (left & right).....	9
7.2	Generator Foundation	9
8.	Yaw System	9
8.1	Yaw Ring	9
8.2	Yaw Gear	9
8.3	Yaw Gear Pinion	10
8.4	Yawing Plain Bearings	10
9.	Generator	10
9.1	Generator	10
10.	Trafo Arrangement	11
10.1	Trafo	11
11.	Crane	12
11.1	Service Crane	12
11.2	Component Crane (not included).....	12
12.	Machine Cover	12
12.1	Cover Parts	12
12.2	Cover Support	12
13.	Wind Sensor	12
13.1	FT Sensor/Ultrasonic Sensor	12
14.	Tubular Tower	12
15.	Dimension Drawings	13
15.1	Nacelle Cover and Blade, Overall Dimensions	13
15.2	Nacelle, Side View	14

1. Rotor

1.1 Blade

Manufacturer:	Vestas
Type no.:	VESTAS 39 m
Material:	Glass fibre reinforced epoxy (blade shells) Glass fibre reinforced epoxy (blade spar) Stainless steel thread inserts (root attachment)
Surface:	Epoxy gelcoat
Colour:	RAL 9010, RAL 7035 and custom-designed
Overall length:	39 m
Max. Chord:	3357 mm
Weight:	6500 kg

1.2 Blade Bearing

Manufacturer:	ROLLIX/ HOESCH ROETHE ERDE
Type:	Double row, 4 point contact ball bearing
Lubrication:	Grease: Aeroshell 14
Dimension:	ø2120/ ø1700 x 192 mm
Weight:	1475 kg

1.3 Nose Cone

Manufacturer:	Vestas
Form:	Length 4.14 m, diameter 3.46 m.
Material:	Glass fibre reinforced polyester coated with polyester gelcoat
Weight:	Approx. 600 kg

1.4 Blade Hub

Manufacturer:	Vestas
Material:	EN-GJSF400-18U-LT-D
Weight:	8463 kg

2. Pitch System

2.1 Hydraulic Cylinder

Manufacturer:	LJM
Type:	021 VD 125/80 x 760 – 808-g-T
Dimension:	305 x 178 x 1352 mm

2.2 Linear Transducer in Cylinder

Manufacturer:	Balluff
Type:	BTL5-A11-M0800-B-SA56-S32

2.3 Hydraulic Power Unit

Manufacturer:	PMC Technology
Pump motor:	18,5 kW, 690 V, 50/60 Hz, and 4 poles
Proportional valve:	NG10
Pump flow:	46,2 - 49 l/min - 50 Hz 40,8 - 44,9 l/min - 60 Hz
Pressure, pitch system:	180 - 200 bar
Pressure, pitch system, return:	Min. 6 bar
Pressure, brake system:	50Hz: 40 bar 60Hz: 34 bar
Size of oil reservoir:	300 l (gross volume)
Oil quantity (system):	320 l
Weight (without oil)	475 kg
Weight with oil cooler	525 kg (1.8 MW)

2.4 Hydraulic Block on Cylinder

Manufacturer:	PMC Technology
---------------	----------------

2.5 Plain Bearing on Cylinder

Manufacturer:	SKF
Type:	PWM 809060
Dimension:	ø90/ ø60 x 40 mm

2.6 Spherical Plain Bearing on Cylinder Rod

Manufacturer:	SKF
Type:	GE100TG 3A-2RS
Dimension:	ø150/ ø100 x 70 mm

3. Main Shaft Arrangement

3.1 Main Shaft

Manufacturer:	Vestas
Material:	42CrMo4 / V / EN 10083
Size:	ø630/ flange ø1500/ length 2690 mm
Weight:	6078 kg

3.2 Front Main Bearing (nearest to the rotor)

Manufacturer:	SKF/FAG/Koyo
Type:	230/630 CAW33
Dimension:	ø920 mm/ ø630 mm x 212 mm
Weight:	485 kg

3.3 Rear Main Bearing (furthest from the rotor)

Manufacturer: SKF/FAG/Koyo
Type: 24188 CA/W33
Dimension: $\varnothing 720$ mm/ $\varnothing 440$ mm x 280 mm
Weight: 460 kg

3.4 Front Main Bearing Seal

Manufacturer: Seal Pool
Type: $\varnothing 660$ / $\varnothing 700$ x 20 mm GVP

3.5 Rear Main Bearing Seal

Manufacturer: Seal Pool
Type: $\varnothing 500$ / $\varnothing 540$ x 20 mm CB

3.6 Hydraulic Cylinder for Rotor Locking

Manufacturer: LJM
Type: SNH30 FD 63/30x60-360-G
Dimension: $\varnothing 169$ x 625 mm

3.7 Manuel Hydraulic Pump for Rotor Locking

Manufacturer: LJM
Type: HANSA TMP/GLDE20/I
Dimension: 100 x 290 x 700 mm

4. Main Gearbox Arrangement

4.1 Gearbox

Manufacturer: Lohmann & Stolterfoht
Type: GPV 440
Shaft displacement: 948 mm (horizontal)
Total length: 2689 mm
Weight: 14500 kg
Ratio: 50 Hz: 1:100,845
Ratio: 60 Hz: 1:121,28

Manufacturer: Lohmann & Stolterfoht
Type: GPV 441
Shaft displacement: 948 mm (horizontal)
Total length: 2689 mm
Weight: 14500 kg
Ratio: 50 Hz: 1:100,33 (Onshore)
Ratio: 60 Hz: 1:120,099

Manufacturer: Hansen Transmissions
Type: EH802N21 (Onshore)
Shaft displacement: 948 mm (horizontal)
Total length: 2689 mm

Weight: 14000 kg
 Ratio: 60 Hz: 1:120,515
 Ratio: 60 Hz: 1:111,36
 Ratio: 50 Hz: 1:101,02 (Onshore)

4.2 Shrink Disc

Manufacturer: Stüwe
 Type: HSD 530-23
 Dimension: ø980/ ø530 x 338 mm
 Weight: 1200 kg

Manufacturer: Ovako
 Type: OKCK 530
 Dimension: ø950/ ø530 x 364 mm
 Weight: 1225 kg

4.3 Torque Arm Rubber Spring

Manufacturer: EFFBE-Werk
 Type: Elastomer spring/ Urelast 90 h.A
 Dimension: ø200/ ø44 x 40 mm

4.4 Brake Calibre

Manufacturer: BREMBO
 Type: PZ.I.4420.2802.10
 STILFRENI
 PR771401000
 PR771301000
 Piston diameter: ø75 mm
 Weight: 16 kg
 Max. pressure: 150 bar

4.5 Brake Pad

Manufacturer: Micke
 Type: MPM 030

4.6 Transmission Shaft

Manufacturer: Vestas
 Size: ø480 x 410 mm
 Weight: 15 kg

5. Gearbox Oil System

5.1 Electrical Pump

Manufacturer: Settima
Type: GR45 210 SMT 16B-2.2 kW-690 V (50 Hz)
GR45 180 SMT 16B-2.2 kW-690 V (60 Hz)
Capacity: 100l/min. (50/60 Hz).
Pressure: Max. 15 bar

5.2 Shaft Driven Pump

Lohmann & Stolterfoht.
Manufacturer: Rickmeier
Type: R 4.5/45 FL-Z-UNI-SO
Capacity: 65 l/min. at 1500 RPM
Pressure: Max. 8 bar

Hansen Transmissions.
Manufacturer: SHW
Type: SHW40
Capacity: 45 l/min. at 1500 RPM
Pressure: Max. 15 bar

5.3 Oil Filter

Manufacturer: Mahle
Type: HC35 SM-X 1511
Filtration: 10 µm ABS.

5.4 Off-line Filter

Manufacturer: C.C. Jensen
Type: HDU 15/25 PM - 1x230 V (50 Hz)
HDU 15/25 PU - 690 V (60 HZ)
Filtration: 3 µm

5.5 Oil Coolers

Manufacturer: Nissen Cooler
Size: 502 x 620 mm, fan ø456 mm
10 blades 25°, type 3HL
Fan motors 50 Hz: 90S B14, 2 pole 1,5 kW/ 690 V
Fan motors 60 Hz: 90L B14, 2 pole 3,0 kW/ 690 V

5.6 Oil Heating Elements

Lohmann & Stolterfoht.
Manufacturer: Helios
Connection: 2" BSPP
Size: 2 x 980 W + 1 x 650 W

Hansen Transmissions.

Manufacturer:

Helios

Connection:

2" BSPP

Size:

1 x 1500 W + 1 x 750 W

5.7 Oil Level Switch

Lohmann & Stolterfoht.

Manufacturer:

Barksdale

Type:

UNS 1000-MS/T2-ST1

Voltage:

Voltage: 24 V DC

Hansen Transmissions.

Manufacturer:

KOBOLT

Type:

320-NBA1000

Voltage:

Voltage: 24 V DC

5.8 Oil Sump Temperature Sensor

Manufacturer:

Danfoss

Type:

MBT 5250

5.9 Bearing Temperature Sensor

Lohmann & Stolterfoht.

Manufacturer:

Bühler

Type:

TF-M-PT 100-VAL

Hansen Transmissions.

Manufacturer:

SENSYCON GmbH

Type:

WM60F

6. Rotating Transference

6.1 Rotating Trafo

Manufacturer:

Weier

Type:

ETK160

Dimension:

ø360 x 405 mm

Weight: 147 kg

6.2 Rotating ARC-net

Manufacturer:

Vestas

Dimension:

ø280 mm

6.3 Rotating Hydraulic Union

Manufacturer:	Deublin
Type:	9110-950
Dimension:	ø109 x 203 mm

7. Machinery Foundation

7.1 Main beam (left & right)

Manufacturer:	Vestas
Material:	EN-GJSF400-18U-LT-D / EN 1560
Size:	4590 x 1200 x 1280 mm each
Weight:	4526 kg each

7.2 Generator Foundation

Manufacturer:	Vestas
Material:	S 355 J2H (EN 10025)
Size:	3560 x 2300 x 660 mm
Weight:	2500 kg

8. Yaw System

8.1 Yaw Ring

Manufacturer	Niebuhr Tandhjulsfabrik + Hoesch Rothe Erde	
Material:	34CrNiMo 6 / V / 42CrMo 4 / V (EN 10083)	
Normal module:	16	
Number of teeth:	143	
Tooth width:	96 mm	
Weight:	767 kg	

8.2 Yaw Gear

Before 01.10.01

Manufacturer:	Bonfiglioli/Transmittal	SOM
Type:	709T2M	PG1802
Type Worm gear:	W110	MNRV110
Ratio/Planetary stages:	1:28	1:22,1
Ratio/Worm gear:	1:40	1:50
Ratio total:	1:112	1:1105
Electric motor spec.:	2.2 kW/6 pole/690 V	
Weight:	190 kg	

After.01.10.01

Manufacturer:	Bonfiglioli/Transmittal	SOM	Brevini
Type:	709T3M	PG1603	RPR3140
Type Worm gear:	W75	MNRV075	FRS85
Ratio/Planetary stages:	1: 110,17	1:149,5	1:131,8
Ratio/Worm gear:	1:10	1:7,5	1:8,5
Ratio total:	1:1101,7	1:1121	1:1119,9
Electric motor spec.:	2.2 kW/6 pole/690 V		
Weight:	190 kg		

8.3 Yaw Gear Pinion

Before 01.10.01

Manufacturer:	Bonfiglioli/SOM
Material:	18NiCrMo5 (UNI 8550)
Normal module:	16
Number of teeth:	11
Tooth width:	100 mm
Weight:	Included in yaw gear weight

After 01.10.01: All yaw gears are delivered with integrated pinion.

8.4 Yawing Plain Bearings

Manufacturer:	Vestas
Material:	PETP

9. Generator**9.1 Generator**

Manufacturer:	ABB
Type:	AMK 500L4A BAYH
Poles:	4
Building size:	500
Degree of protection:	IP55
Insulation class:	H
Weight cooler:	430 kg
Weight generator:	5700 kg
Bearing drive end (DE):	6330M C3
Bearing non-drive end (NDE):	6330M C3

Manufacturer:	WEIER
Type:	DVSG500/4Msp
Poles:	4
Building size:	500
Degree of protection:	IP54
Insulation class:	F/H
Weight cooler:	650 kg
Weight generator:	5500 kg
Bearing drive end (DE):	6330M C4
Bearing non-drive end (NDE):	6330M C4

For both bearings the following applies:

Level of insulation: 1000 V DC
 Max. radial run-out inner ring: 15 µm radial
 10 µm axial

	V80 VCS 50Hz	V80 VCS 60Hz	V80 VRCC 60Hz
Generator supplier	ABB / Weier	ABB	ABB

10. Trafo Arrangement

10.1 Trafo

Standard: IEC 60076-11 2004
 Manufacturer: SIEMENS/SGB/ABB/FRANCE TRANSFO
 Type: CAST-RESIN
 Rated power: 2100 kVA
 Rated HV: 6-34.5 kV
 Highest equipment voltage: 36 kV (U_m)
 Highest power frequency withstand voltage (IEC): 70 kV
 Highest impulse withstand voltage (IEC): 170 kV
 HV tap changer: ±2x2.5%
 Rated LV: 0.48/0.69 kV
 Max. size: 2100 x 920 x 2150 mm
 Max. weight: 5500 kg

Standard: IEC 60076-11 2004
 Manufacturer: SIEMENS
 Type: CAST-RESIN
 Rated power: 1850 kVA
 Rated HV: 6-34.5 kV
 Highest equipment voltage: 36 kV (U_m)
 Highest power frequency withstand voltage (IEC): 70 kV
 Highest impulse withstand voltage (IEC): 170 kV
 HV tap changer: ±2x2.5%
 Rated LV: 0.69 kV
 Max. size: 2100 x 920 x 2150 mm
 Max. weight: 5500 kg

	V80 VCS	V80 VRCC
Trafo supplier	SIEMENS/SGB/ABB/FRANCE TRANSFO	SIEMENS

11. Crane

11.1 Service Crane

Manufacturer:	ABB
Type:	B 4.2 500/1-12 690V, BAU-LIFTKET
Lifting capacity (max.):	800 kg
Lifting speed:	12 m/min.

11.2 Component Crane (not included)

Manufacturer:	Secalt/Tractel
Type:	T 1000 P, 690V, Tirak
Lifting capacity:	6400 kg
Lifting speed:	4.5/18 m/min.
Length of wire:	500 m

12. Machine Cover

12.1 Cover Parts

Manufacturer:	Vestas
Material:	Reinforced glass fibre

12.2 Cover Support

Manufacturer:	Vestas
Vibration dampers:	IKAS Novibra RA 800 EMB

13. Wind Sensor

13.1 FT Sensor/Ultrasonic Sensor

Manufacturer:	FT Technologies Ltd
Type:	FT702LT
Size:	ø50 x 160 mm
Weight:	0.3 kg

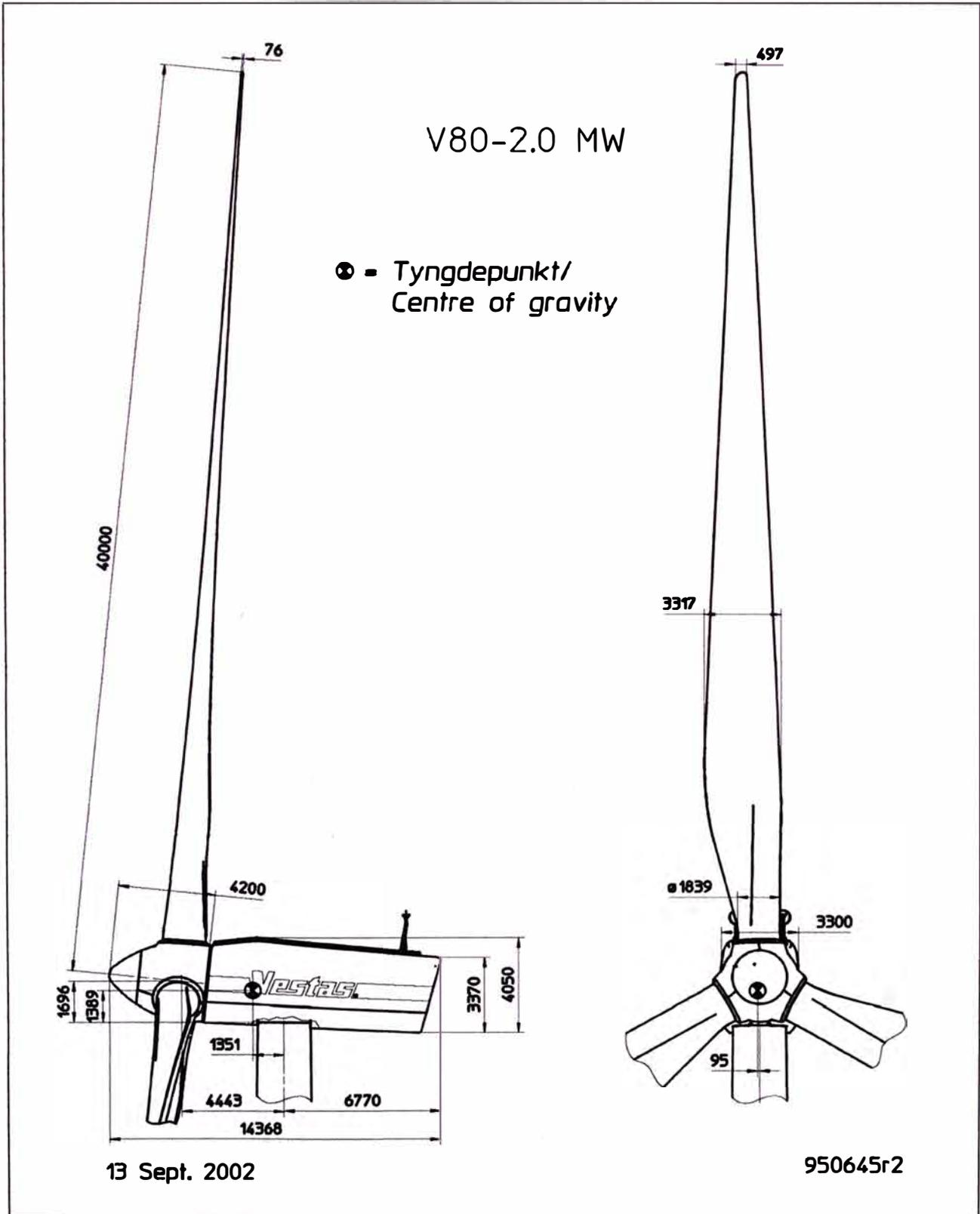
Manufacturer:	Vestas
Type:	VUS2D 2.0
Size:	ø70/ ø275 x 422 mm
Weight:	2.5 kg

14. Tubular Tower

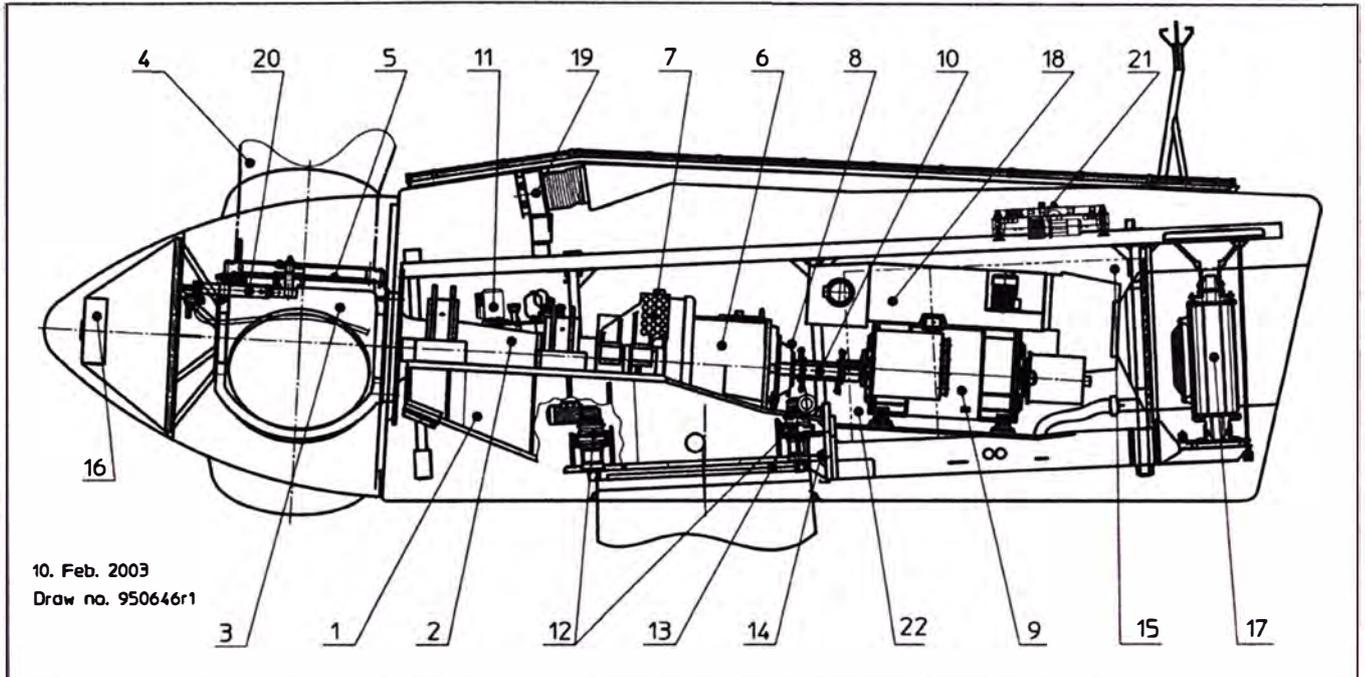
Manufacturer:	Vestas
Material:	S235 J0/JR
Heights:	60 m, 67 m, 78 m, 100 m
Top diameter:	2.3 m
Bottom diameter:	4.0 m

15. Dimension Drawings

15.1 Nacelle Cover and Blade, Overall Dimensions



15.2 Nacelle, Side View



Please disregard the position numbers.

ANEXO E
PLANOS DEL AEROGENERADOR

V80-2.0MW, Tubular Tower, North Hoyle

History of this Document

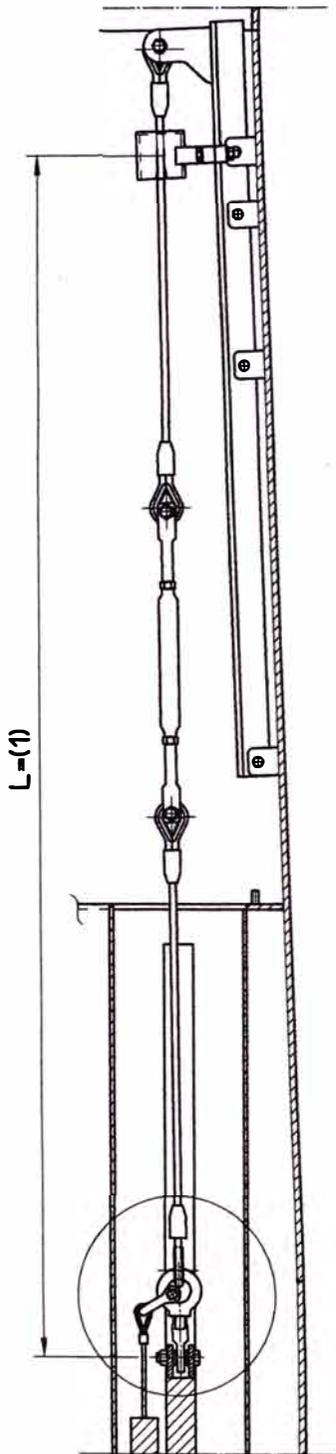
Changes in this document:

Rev. no.:	Date:	Description of change
0	2004-01-22	First edition

Manufacturer: VESTAS

1. Drawings

App. Drawing	Turbine type/Hub height/App.	Site Drawing/ Assembly Drawing
950926	V80 2.0 MW 48 m North Hoyle	
928041	Pendulum Length, North Hoyle	
928240	Arrangement Drawing North Hoyle	
	V80 2.0 MW North Hoyle Site	459000
	V80 2.0 NH Signal Site	459001



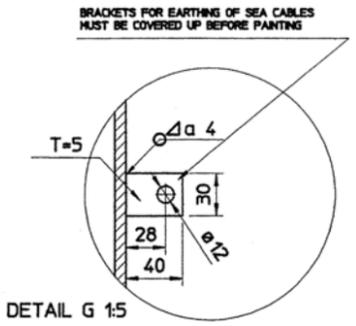
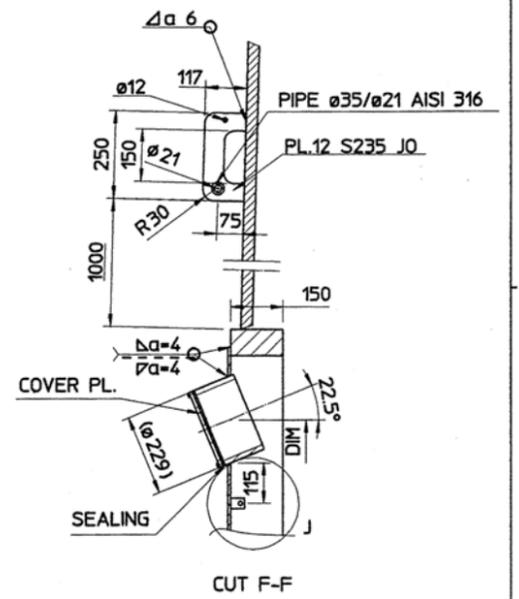
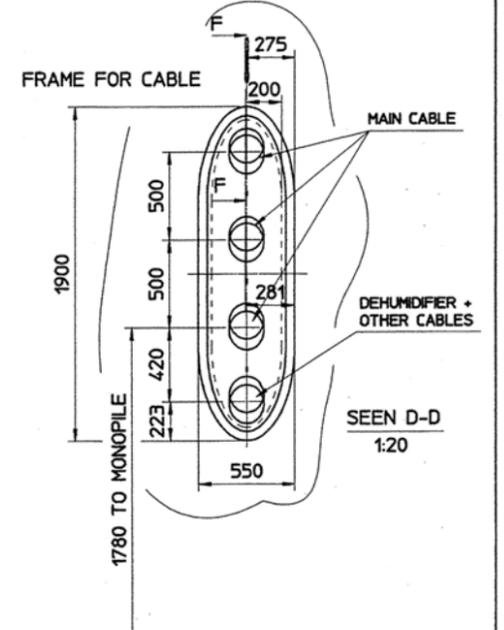
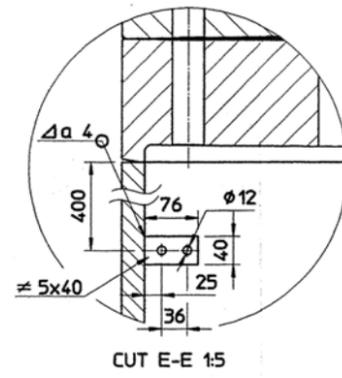
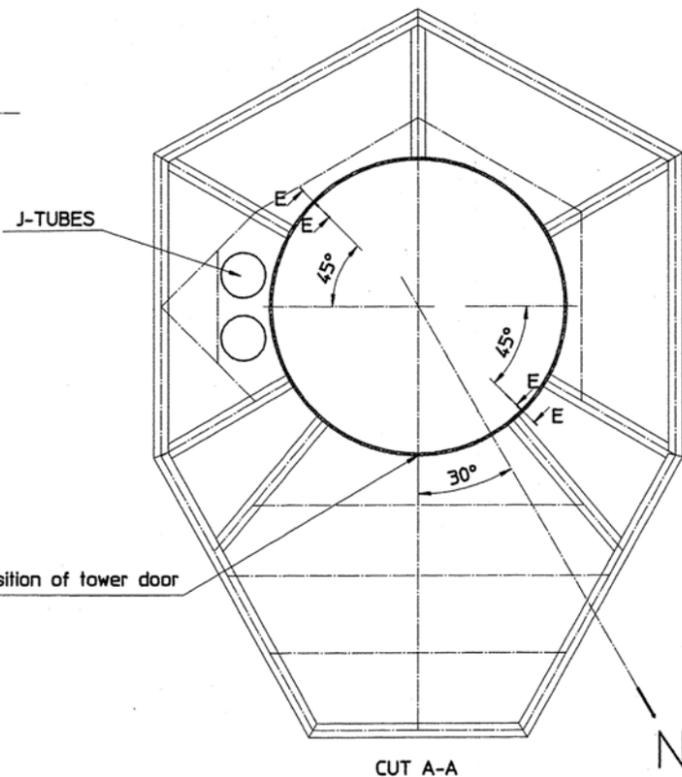
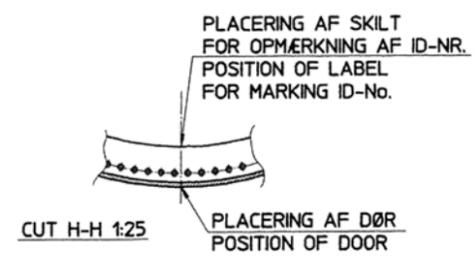
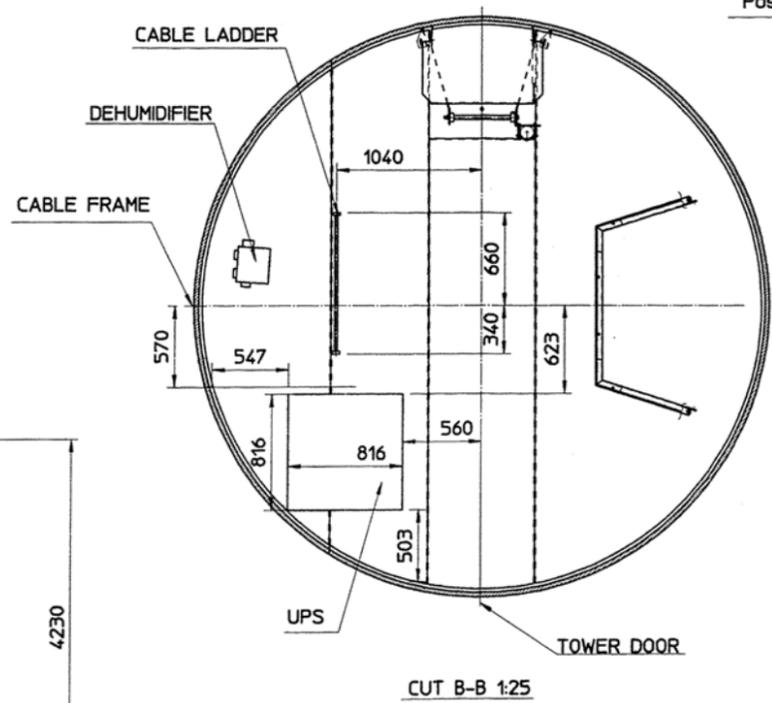
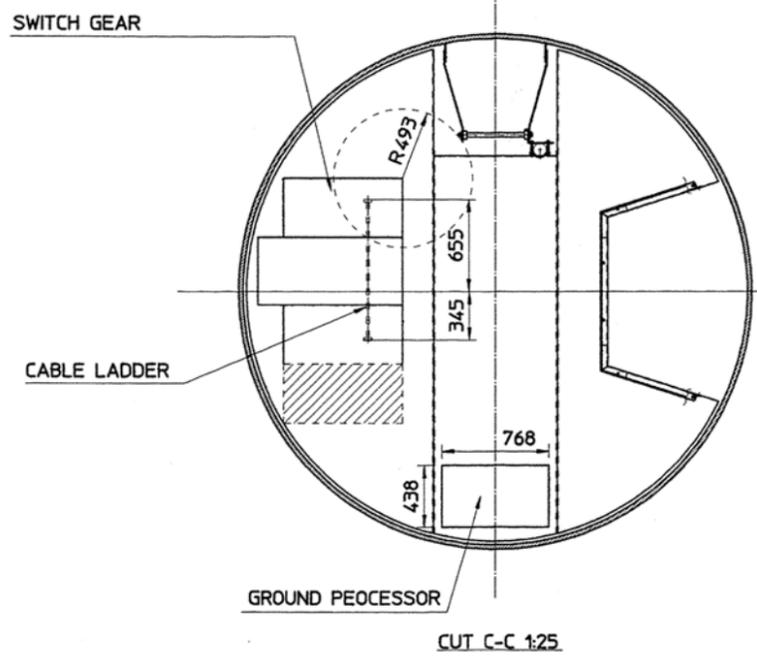
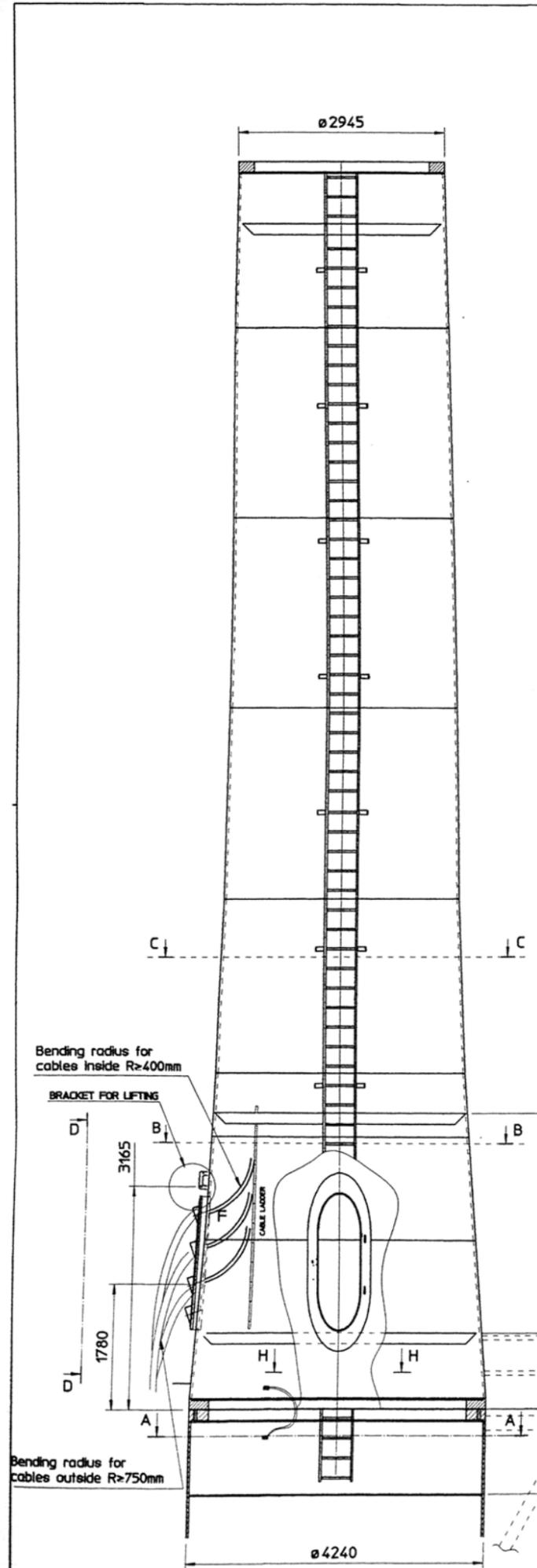
The length of the pendulum must be adjusted according to the scheme below

TURBINE No.	FREQUENCIES (Hz)	PENDULUM LENGTH (mm)
1	0.380	1840
2	0.380	1840
3	0.380	1840
4	0.380	1840
5	0.390	1710
6	0.380	1840
7	0.380	1840
8	0.380	1840
9	0.380	1840
10	0.380	1840
11	0.380	1840
12	0.380	1840
13	0.380	1840
14	0.370	1970
15	0.380	1840
16	0.380	1840
17	0.380	1840
18	0.380	1840
19	0.370	1970
20	0.370	1970
21	0.380	1840
22	0.380	1840
23	0.380	1840
24	0.360	2100
25	0.360	2100
26	0.380	1840
27	0.380	1840
28	0.380	1840
29	0.380	1840
30	0.370	1970

			PROJ	EPRE PENDULÆNGDER NORTH HOYLE	
VESTAS WIND SYSTEMS A/S SMED SØRENSENS VEJ 5, DK-6950 RINGKØBING Tlf: +45 96752575 - Fax +45 96752436			CAD / COMMENT ME10	ITEM PENDULUM LENGTH NORTH HOYLE	
MATERIAL			FORMAT A3	MASS (kg)	
LAST REV DATE 19.02.03	SIGN CHM	APPD GKY	DATE 30.09.02		
SCALE 1:10		DRAWING NO 928041		REV 1	
WARNING PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION This document and the information set forth herein (the "Information") are confidential and proprietary to Vestas Wind Systems A/S ("Vestas"), constitute trade secrets and derive independent economic value, actual or potential, from not being generally known in consideration of you receiving this document you agree (i) to keep the information secret, (ii) only to use the information for your own needs to accomplish the task(s) agreed with Vestas, (iii) not to disclose any part of the information to any third party and (iv) not to make copies or reproductions thereof by whatsoever means.					

957602.R0

3/6

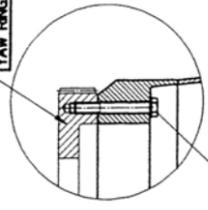


				ARRANGEMENTSTEGNING NORTH HOYLE	
VESTAS WIND SYSTEMS A/S SØNDERSØS VEJ 5, DK-8950 BIRKERØD TEL: +45 96752575 - FAX: +45 96752536		CAD / COMMENT ME40		ITEM ARRANGEMENT DRAWING NORTH HOYLE	
MATERIAL A1		MASS (kg)		DRAWING NO. 928240	
LAST REV. DATE 03.10.02	SKR. CHM	APPR. GKY	SCALE 1:40	REV. 1	
DATE 24.09.02	SKR. KRL	APPR. GKY			

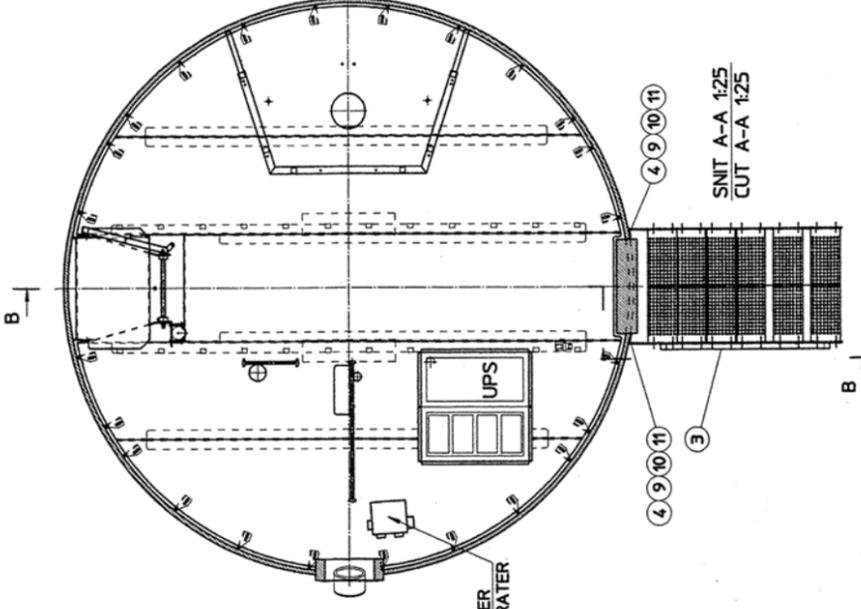
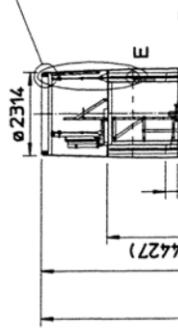
WARNING: PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. This document and the information set forth herein (the "Information") are confidential and proprietary to Vestas Wind Systems A/S ("Vestas") constitute trade secrets and derive independent economic value, actual or potential, from not being generally known in consideration of your receiving this document you agree to keep the information secret, to only use the information for your own needs to accomplish the tasks agreed with Vestas, to not to disclose any part of the information to any third party and to not to make copies or reproductions thereof by whatsoever means.



TANKRANS, NAGELLE
YAM RING, NAGELLE

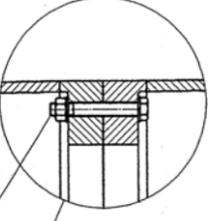


14 67030 M30 SKIVE/WASHER 90 STK
ISO7446 TZN HV200
62529 M30x270 BOLT 90 STK/PCS.
ISO4014 10.9TZN

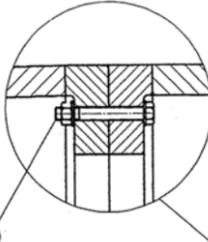


PLACERING AF AFFLUGTER
PLACEMENT OF DEHYDRATER

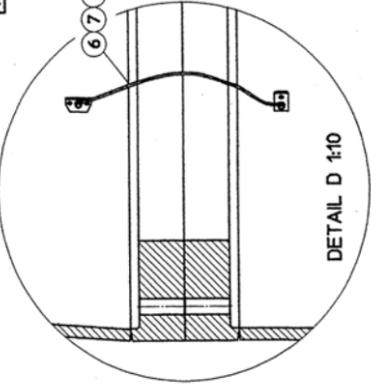
152543 BOLT SET DN 694/15/16 10.9TZN
M36x35 BOLT 116 STK/PCS
M36 MØTRIK/NUT 116 STK/PCS
M36 SKIVE/WASHER 232 STK/PCS



152543 BOLT SET DN 694/15/16 10.9TZN
M36x35 BOLT 116 STK/PCS
M36 MØTRIK/NUT 116 STK/PCS
M36 SKIVE/WASHER 232 STK/PCS

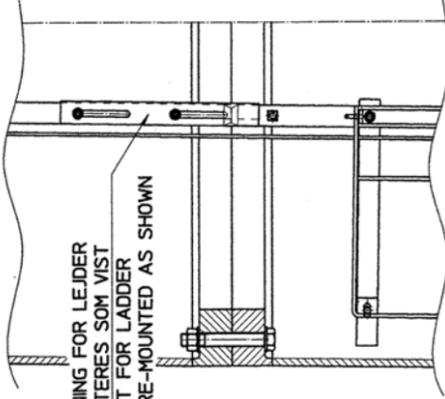
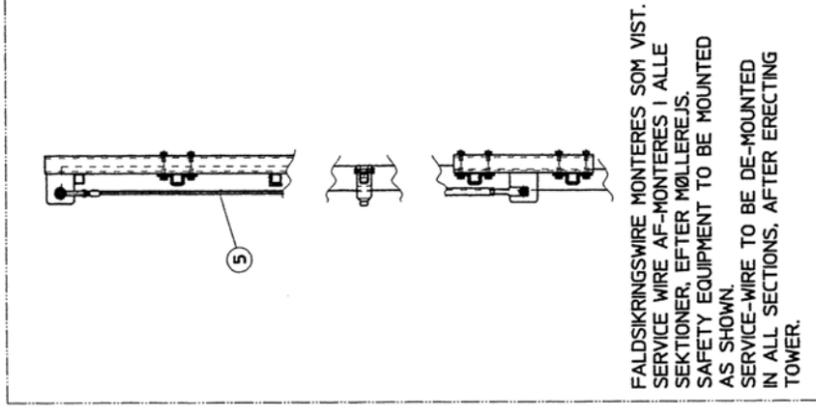


LEIDER DEMONTERES FRA
POSITION UNDER PLATFORM
MONTERES SOM VIST.
LADDER TO BE DEMOUNTED
FROM POSITION BELOW
PLATFORM.
TO BE MOUNTED AS SHOWN.



DETAIL D 1:10

SNIT B-B 1:25
CUT B-B 1:25



SNIT C-C 1:10
CUT C-C 1:10

POS. 17, 18, 19, 20 & 21 ER IKKE VIST PÅ TEGNING
POS. 17, 18, 19, 20 & 21 IS NOT SHOWN AT DRWG.

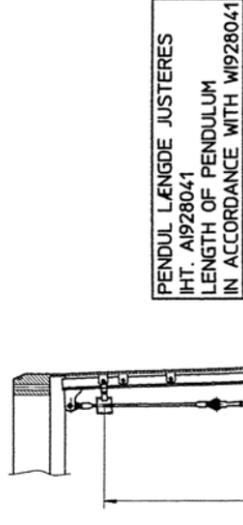
POS.	QTY	TEXT	ITEM	MATR./CERT.	NETTO	BRUTTO
21	1	MARINEARMATUR 2 X 10W	193917			
20	7	RØRKABEL SKO	094404	KRT 50MM2 Ø10		
19	7	KRYMPE FLEX L=40MM	094651	Ø10 1650/07		
18	1	SPRØY FLEX TEGN/HEAVY DUTY RUST GUARD	149053			
17	1	FUGELM S40 HVD PATRON SEALING ADHESIVE S40 WHITE	149752			
16	400	OLE FOR SVINGDEPPER OIL FOR OSCILLDAMPER	149116	WAY LUBRICANT X320	359	
15	2	ØRØKABEL 1500 MFG L=2000MM	768402		0.4	
14	1	GRØNDBARBE 3530 TZN L=3500MM	745972	ISO 40M7416	108	
13	1	FLBOLTE M36 X 335 (116 STK)	745995	DN 694/15/16	822	
12	1	FLBOLTE M36 X 315 (132 STK)	745994	DN 694/15/16	873	
11	7	M36 LØSERNØK	157729	DN 980 FZV		
10	14	M36 PLANSKIVE HV200	157016	ISO7089 TZN		
9	4	M16x70 6 KT GEVIND SKRUE	155142	ISO4007 8.8TZN		
8	26	M16x70 HEX HD. SCREW	157727	DN 980 FZV		
7	52	HVD LÅSEHØTRK HV200	157010	ISO7089 TZN		
6	11	M16x30 6 KT GEVIND SKRUE	153397	ISO4007 8.8TZN		
5	1	FALDSKRINGSWIRE L=39635 SAFETY EQUIPMENT L=39635	449541	GALV.	10.5	
4	2	MELLENLÆG TRØKNSØL RUBBER GASKET E-STEPS	736581	NEOPRENE		
3	1	TRAPPEVANDS ALU KØMPLÆT	449526	ALU	32	
2	1	V80 20M TOPSEK. NORTH HOYLE	459304	MALET/MONTERET DRWG	53942	
1	1	V80 20M SEK1 NORTH HOYLE	459300	MALET/MONTERET DRWG	53942	

LAST	MEIO	FORM	SCALE	DATE	SCALE	DATE	SCALE	DATE	SCALE
05.02.03	CHM	BO	1:100	08.11.02	CHM	BO	1:100		

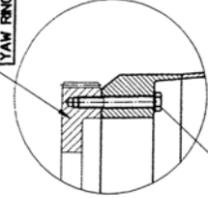
MATERIAL: V80 2.0MW NORTH HOYLE SITE
 V80 2.0MW NORTH HOYLE SITE
 QUANTITY: 459000
 NETTO: 459000
 BRUTTO: 2

ALLE IKKE TOLERANSESATTE MÅL #5
ALL DIMENSIONS WITHOUT TOLERANCES #5

WARNING: PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. The document set forth herein (the "Information") are confidential and intended for the use of the recipient only. It is not to be distributed, copied, reproduced, or otherwise disclosed to any third party without the prior written consent of the sender. The recipient shall be responsible for keeping the Information confidential and for returning it to the sender upon request. If you are not the intended recipient, you should not disseminate, distribute or copy this e-mail. If you have received this e-mail by mistake, please notify the sender immediately by e-mail. If you are not the intended recipient, you should not disseminate, distribute or copy this e-mail. If you have received this e-mail by mistake, please notify the sender immediately by e-mail. If you are not the intended recipient, you should not disseminate, distribute or copy this e-mail. If you have received this e-mail by mistake, please notify the sender immediately by e-mail.



TANDEGRANS, NACELLE / YAM RINGE, NACELLE



157030 M30 SKIVE/MASHER 90 STK / ISO7416 TZN HV200
152529 M30x270 BOLT 90 STK/PCS / ISO4014 10.91TZN

14

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298