



Le génie pour l'industrie

« Intégración a la red eléctrica de parques eólicos basados en el Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG): Modelado, Análisis y mitigación de la Resonancia Sub-Síncrona (RSS)»

Sergio ATAYDE, estudiante doctoral en ingeniería eléctrica.

Supervisado por: Profesor Amrish CHANDRA

-École de Technologie Supérieure (ETS), Montreal, QC, CANADA

-Groupe de Recherche en Électronique de Puissance et Commande Industrielle (GREPCI)

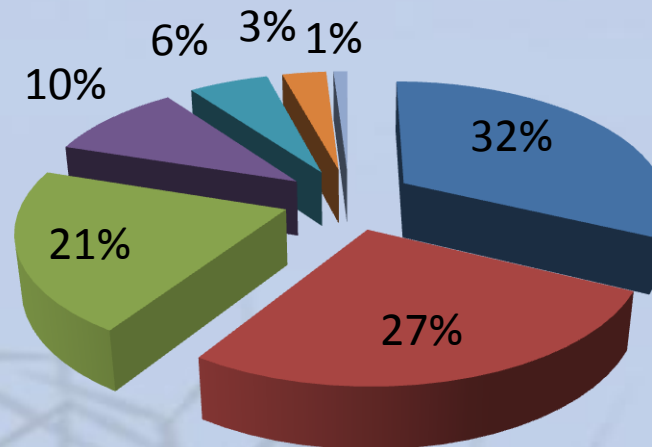


Contenido de la presentación:

- 1) Consumo de energía a nivel mundial y estado actual de las energías renovables.**
- 2) Generalidades de la Energía eólica**
 - Estado actual de desarrollo y proyecciones
 - Conceptos básicos sobre la energía eólica:
 - Tipos de tecnologías de explotación de la energía eólica
 - Curvas de potencia del viento
 - Extracción Máxima de Potencia: EMP
- 3) Parques eólicos basados en el Generador a Inducción Doblemente alimentado**
 - Configuración Scherbius
 - Líneas de investigación y trabajo efectuado
 - Resonancia Sub-sincrona

Consumo mundial de potencia y Fuentes de Energía (2010)

Consumo total de potencia : 15TW

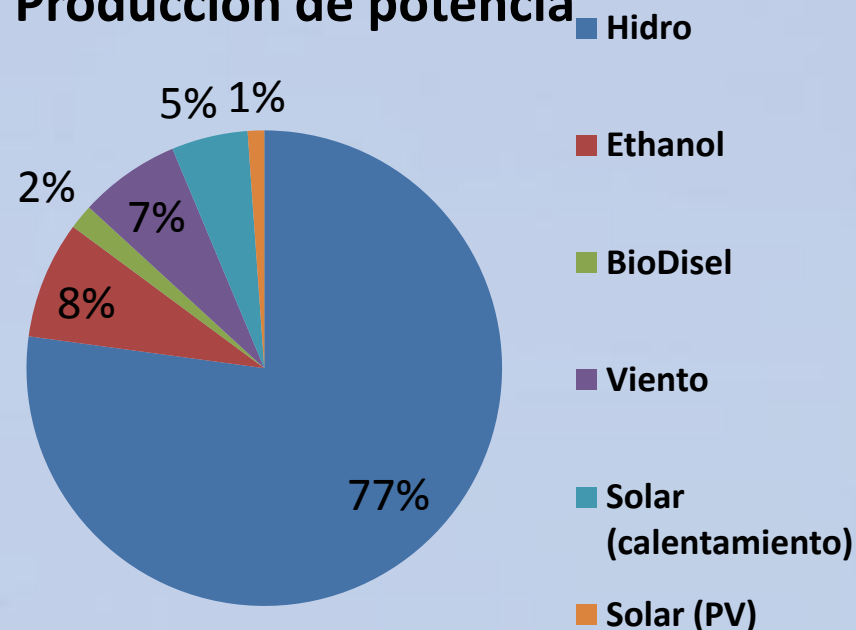


*Otras fuentes incluyen: eólica, solar, biocombustibles, geotérmica, etc.

Principales fuentes de energía renovable en 2010

Fuente	Instalado/ Producción	Factor de capacidad(típico)	Potencial efectiva
Hidro-elec.	1100 GW	0.5	550 GW
Ethanol	86 billones L	n/a	57 GW**
Bio-Disel	12 billones L	n/a	12 GW**
Viento	196 GW	0.25	49 GW
Solar (heat)	185 GW	0.2	37 GW
Solar (PV)	40 GW	0.2	8 GW

Producción de potencia



**The biomass used to produce bio-fuels requires energy to be grown, cropped, transported and processed. The ratio of the power yield by bio-fuels to the power needed to produce them is called Net Energy Gain (NEG). NEG is not reflected in this table.

Energía eólica: presente y futuro (I)



*En 2010 cuatro países europeos han alcanzado penetración eólica en su red eléctrica de 2 dígitos porcentuales

País	Penetración eólica
Dinamarca	21%
Portugal	18%
España	16%
Irlanda	14%

***2008**: capacidad instalada a nivel mundial se incrementa en **29%**, de **93.9 GW** a más de **121 GW**

***2009**: capacidad instalada a nivel mundial se incrementa en **31%**, de **121 GW** a más de **159 GW**.

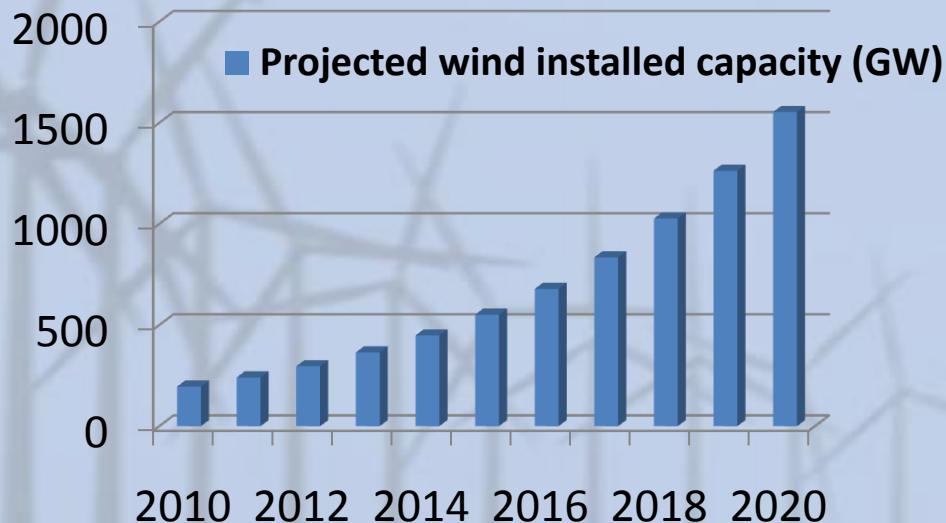
***2010**: Capacidad instalada de **196GW** (incremento del **25%**).

(Source http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_s.pdf)

Energía eólica: presente y futuro (II)

* Datos históricos de la última década muestran crecimiento anual **entre 26% y 30%**.

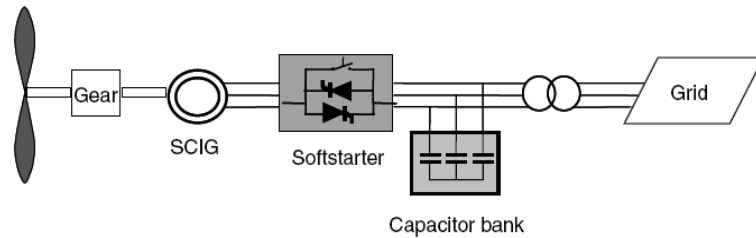
* Si se **proyecta un crecimiento sostenido de al menos 23% en la próxima década**, la capacidad instalada en **2020 podría alcanzar 1,500 GW**.



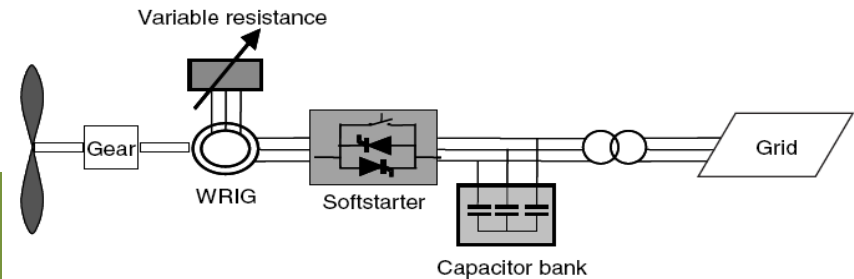
* Incluso si la demanda de electricidad aumenta en 66% en la próxima década, la capacidad proyectada podría satisfacer **12%** de la **demanda de energía eléctrica a nivel mundial!**

Principales tecnologías de explotación del viento(I)

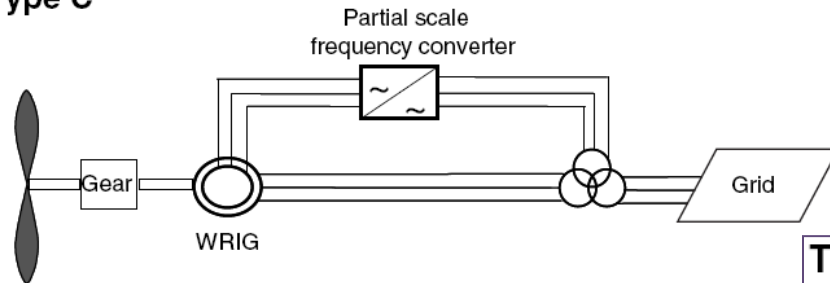
Type A



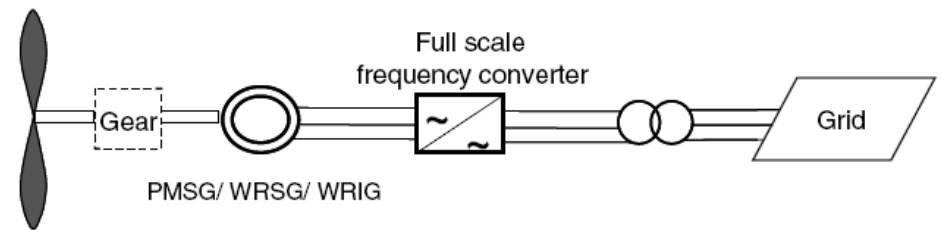
Type B



Type C



Type D

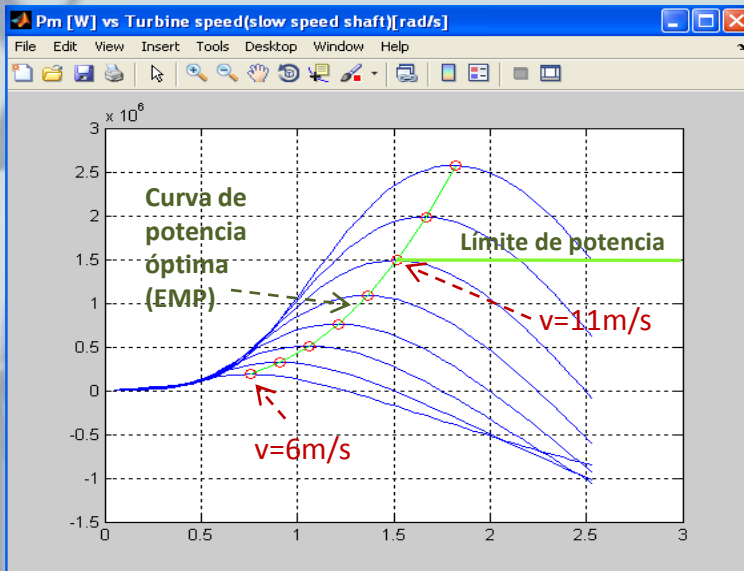


Principales tecnologías de explotación del viento (II)

Tecnología	DFIG (Tipo C)	PMSG (Tipo D)	Rotor bobinado con resistencia variable (Tipo B)	SCIG: Generador de induccion `caja de ardilla` (Type A)
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> *Vel.Variable *Convertidor de potencia reducido (20-30%) *Control activo y reactivo de potencia 	<ul style="list-style-type: none"> *Vel.Variable *Acoplamiento directo *Control activo y reactivo de potencia *Aislamiento total de la red *Excitacion propia 	<ul style="list-style-type: none"> *Variacion de velocidad reducida al variar la resistencia del rotor. 	<ul style="list-style-type: none"> *Construccion simple y robusta. * Bajo costo.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> *Engranaje *Mantenimientode anillos y escobillas 	<ul style="list-style-type: none"> Alto costo (convertidor 100%, materiales magneticos) *Demagnetizacion. 	<ul style="list-style-type: none"> *Perdidas en resistencia *Consumo de n potencia activa y reactiva. 	<ul style="list-style-type: none"> *Consumo de potencia activa y reactiva. *Sin control de velocidad

Conceptos básicos: Potencia mecánica, curvas de potencia óptima y Extracción Máxima de Potencia (EMP)

Potencia mecánica del viento



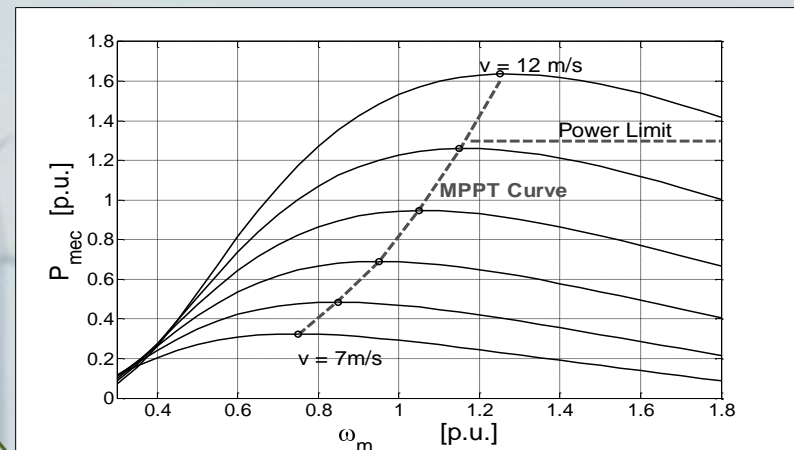
$$P_{mec} = \rho \cdot A_r \cdot C_p(\beta, \lambda) \cdot v^3 / 2$$

$$C_p(\beta, \lambda) = \frac{P_{mec}}{P_v} \approx c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda} - c_3 \cdot \beta - c_4 \right) \cdot e^{-c_5/\lambda} + c_6 \cdot \lambda$$

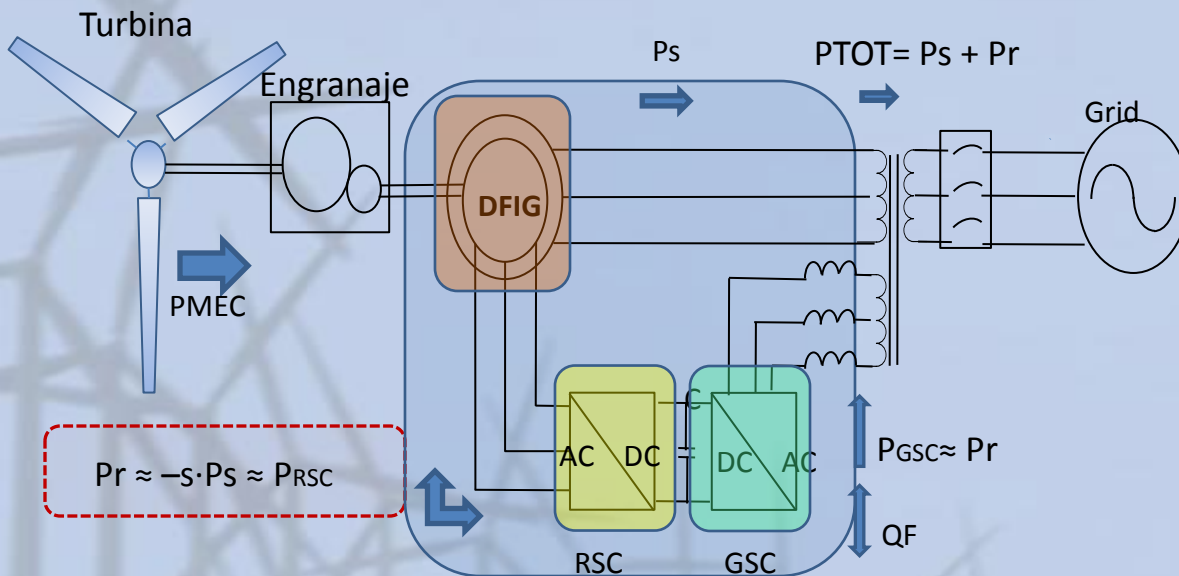
$$\lambda = \Omega_r R_r / v$$

Extracción Máxima de Potencia

La operación EMP para aerogeneradores a velocidad variable, consiste en ajustar la velocidad del generador en función de la velocidad del viento (es decir se ajusta la potencia/torque eléctrica en función de la potencia mecánica disponible)



Aerogenerador basado en DFIG: Configuration Scherbius



Manejador de Potencia tipo SCHERBIUS

***DFIG: Generador Rotor Bobinado/ Doblemente Alim.**

*Potencia fluye a través del estator y rotor.

***Convertidor del Rotor(RSC) :**
 *Control del Generador

***Convertidor de la Red(GSC)**

*Regulación del vínculo DC

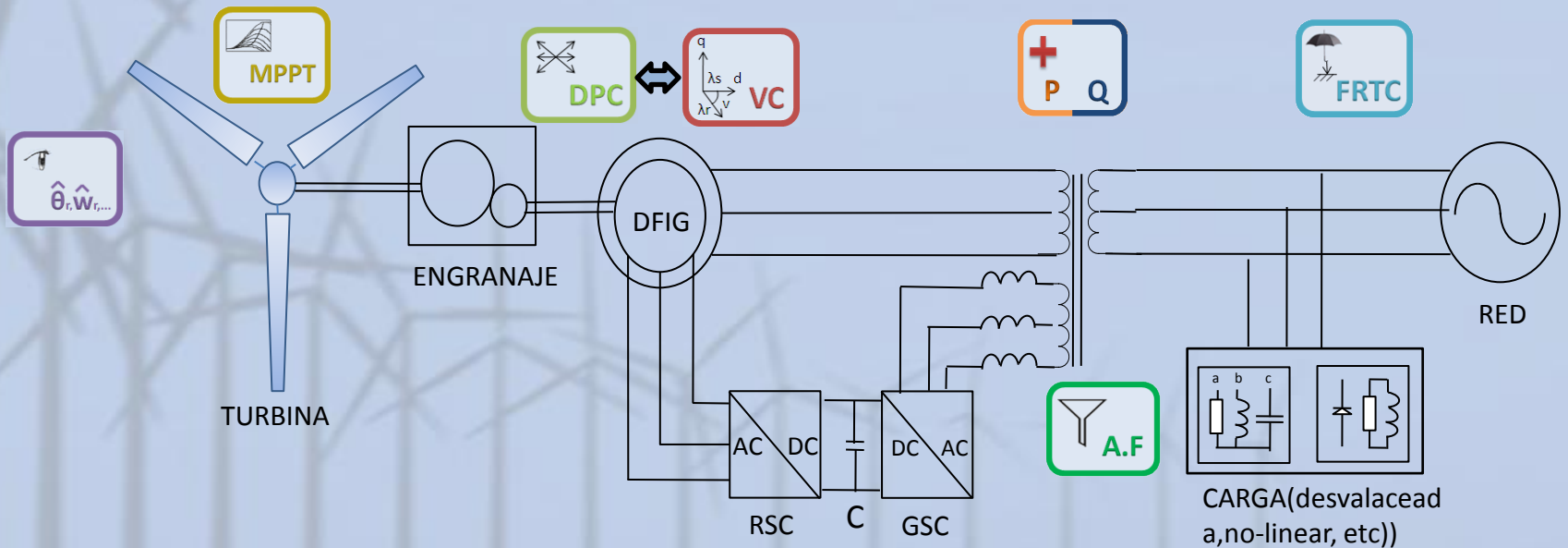
*Factor de potencia

*Filtro Activo

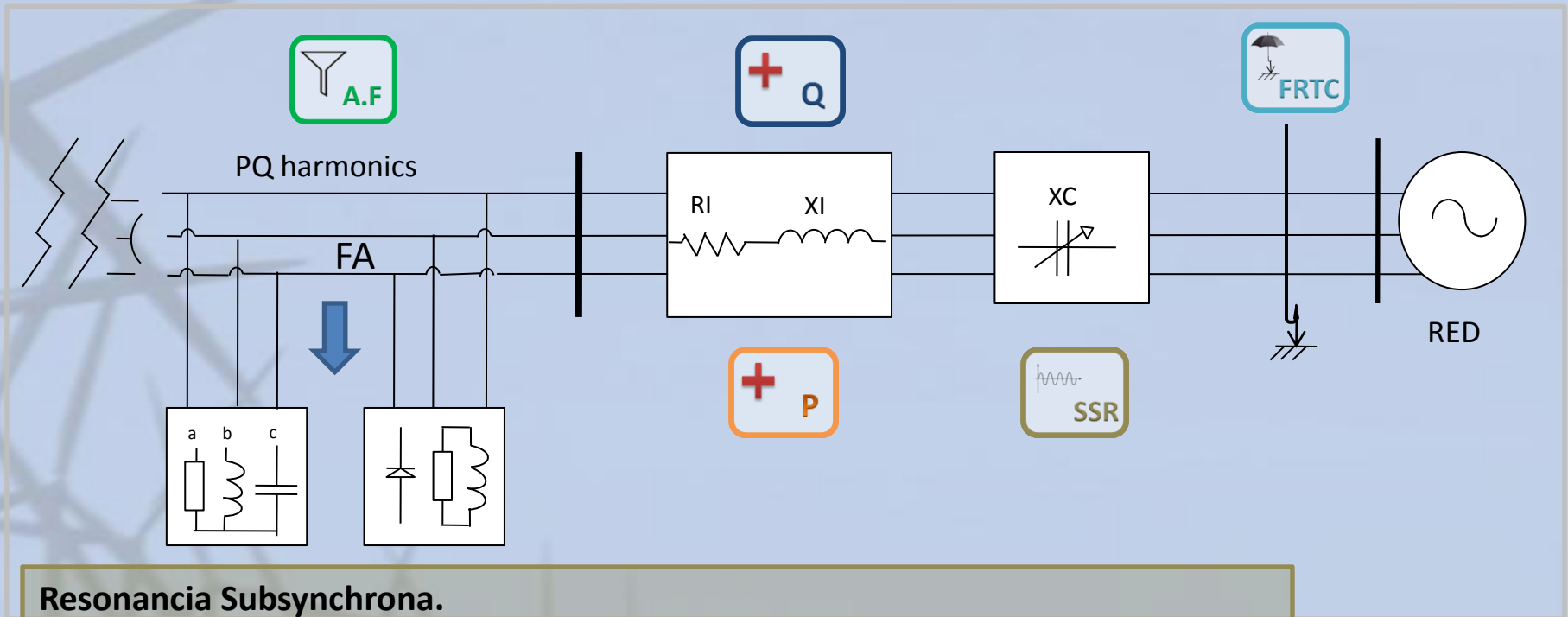
Líneas de investigación : Eficiencia, seguridad, robustez, viabilidad (I)

1) REQUERIMIENTOS DE LA ALTA PENETRACION

- *Extracción Máxima de Potencia
- * Inmunidad a fallas de la red (corto circuito, bajo voltaje).
- *Soporte en voltaje y frecuencia.
- *Operación robusta(operación libre de sensores, metodologías de control)
- *Calidad de la energía (filtrado activo, eliminación de armónicos)



Líneas de investigación : Eficiencia, seguridad, robustez, viabilidad (I)

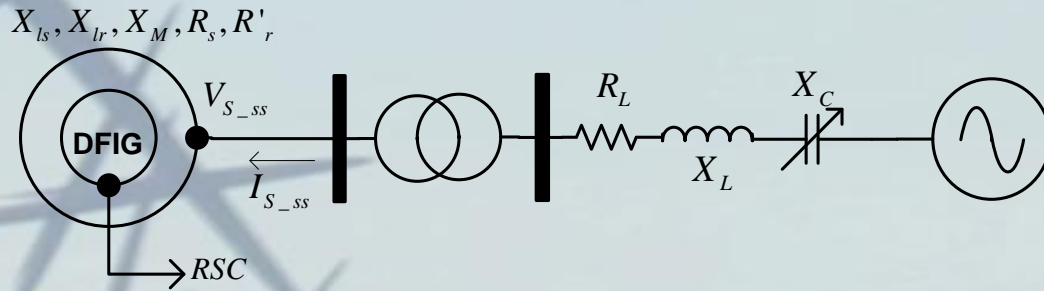


Resonancia Subsincrona.

- * Auto-excitación de las frecuencias naturales del sistema (mecánicas y eléctricas)
- * Fenómeno que afecta a las líneas de transmisión largas (150 km+) compensadas con elementos capacitivos en serie.
- * Particularmente nocivo para componentes mecánicos (reducción de la vida útil de ejes de transmisión –falla potencial-)



Fenómenos sub síncronos: Interacción Torsional, Efecto Generador, Amplificación de torque...



- Corrientes síncronas I_s and I_r interactúan con corrientes subsíncronas I_{s_ss} y I_{r_ss} .
- Se generan componentes de torque a frecuencia sub-síncrona f_{en} .
- Si el componente de torque inducido a f_{en} empata/es próximo a f_n , la respuesta selectiva del sistema a las frecuencias naturales, sostiene e incrementa las corrientes SS así como el torque. Torque y corriente interactúan e incrementan las excursiones del sistema => pérdida de control de magnitudes del sistema => colapso.

Parameter	Expression
Frecuencia eléctrica natural del sistema	$f_{er} \approx f_0 \cdot \sqrt{X_C / (X_L + X_{ls})}$
Frecuencia complementaria	$f_{en} = f_0 - f_{er}$
Frecuencia mecánica	f_n
Corrientes rotoricas y estatoricas relacionadas con magnitudes síncronas	$I_s @ f_0, I_r @ f_0 - f_r$

Resonancia Sub-síncrona en granjas eólicas con Generadores de Inducción Doblemente Alimentado

Resonancia Sub-síncrona:

- Fenómeno bien documentado para generadores síncronos propulsados por turbinas de vapor.**

- Tema de investigación reciente en parques eólicos con generadores de inducción a velocidad variable:**
 - Modelado:**
 - Elementos (turbina, generador, línea de transmisión, elemento de compensación serie, elementos de control)**
 - Integración de elementos**

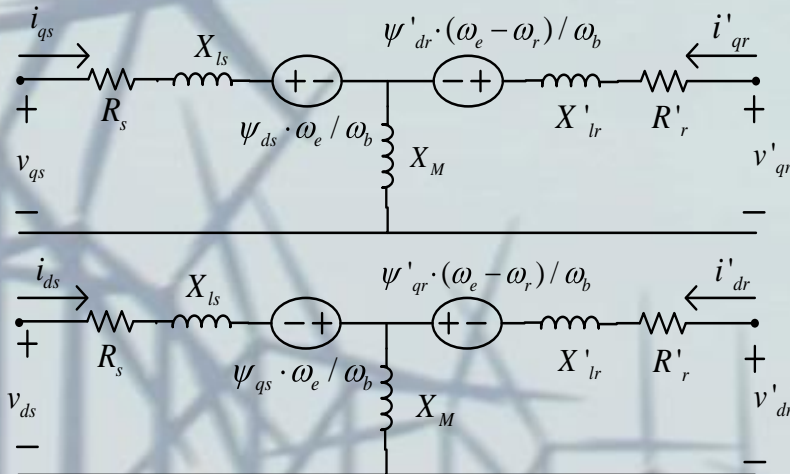
 - Desarrollo de Herramientas de análisis.**

 - Medidas de mitigación.**

 - Validación de desarrollos teóricos**

Modelo DFIG

DFIG modelo referido a un eje rotacional con velocidad angular ω_e (transformacion de coordenadas abc a dq –Transformaciones Clarke /Park -) .



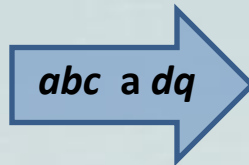
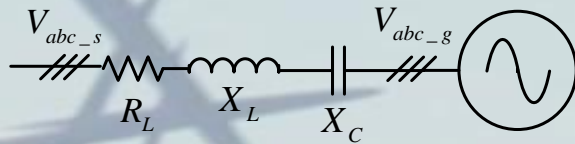
$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= R_s i_{ds} + p \cdot \psi_{ds} / \omega_b - (\omega_e - \omega_r) \cdot \psi_{qs} / \omega_b \\
 v_{qs} &= R_s i_{qs} + p \cdot \psi_{qs} / \omega_b + (\omega_e - \omega_r) \cdot \psi_{ds} / \omega_b \\
 v'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + p \cdot \psi'_{dr} / \omega_b - (\omega_e - \omega_r) \cdot \psi'_{qr} / \omega_b \\
 v'_{qr} &= R'_r \cdot i'_{qr} + p \cdot \psi'_{qr} / \omega_b + (\omega_e - \omega_r) \cdot \psi'_{dr} / \omega_b
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

donde

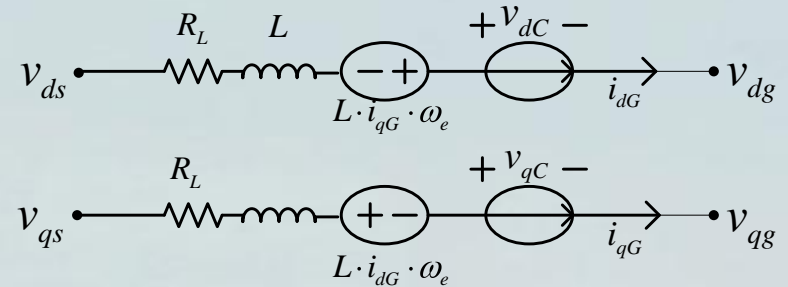
$$\begin{aligned}
 X_{ss} &= X_{ls} + X_M; X'_{rr} = X'_{lr} + X_M \\
 \psi_{qs} &= X_{ss} \cdot i_{qs} + X_M \cdot i'_{qr}; \psi_{ds} = X_{ss} \cdot i_{ds} + X_M \cdot i'_{dr} \\
 \psi'_{qr} &= X'_{rr} \cdot i'_{qr} + X_M \cdot i_{qs}; \psi'_{dr} = X'_{rr} \cdot i'_{dr} + X_M \cdot i_{ds}
 \end{aligned}$$

Modelo Linea de Transmision

Line a en coordenadas *abc* :



Linea en coordenadas *dq*:



Elemento Inductivo L:

$$v_{dL} = p(L - L_{ab}) \cdot i_{dL} - (L - L_{ab}) \cdot i_{qL} \cdot \omega_e$$

$$v_{qL} = p(L - L_{ab}) \cdot i_{qL} + (L - L_{ab}) \cdot i_{dL} \cdot \omega_e$$

Elemento Capacitivo

$$i_{dC} = p \cdot C \cdot v_{dC} + \omega_e \cdot C \cdot v_{qC}$$

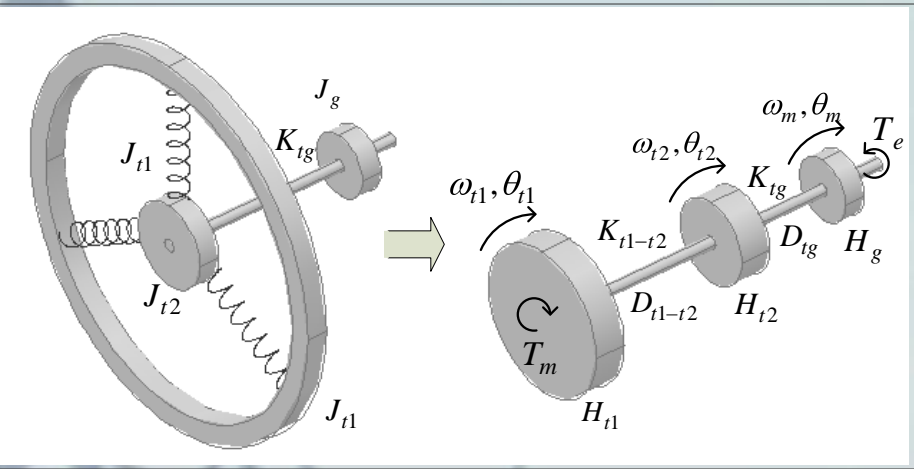
$$i_{qC} = p \cdot C \cdot v_{qC} - \omega_e \cdot C \cdot v_{dC}$$

Element Resistivo R:

$$v_{dqR} = R \cdot i_{dqR}$$

$$\begin{aligned}
 p \cdot i_{qg} &= \omega_b \left[-\frac{\omega_e}{\omega_b} i_{dg} - \frac{R_L}{X_L} i_{qg} - \frac{v_{dC}}{X_L} + \frac{v_{qs} - v_{qg}}{X_L} \right] \\
 p \cdot i_{dg} &= \omega_b \left[-\frac{R_L}{X_L} i_{dg} + \frac{\omega_e}{\omega_b} i_{qg} - \frac{v_{dC}}{X_L} + \frac{v_{ds} - v_{dg}}{X_L} \right] \\
 p \cdot v_{qC} &= \omega_b \left[X_C i_{qg} - \frac{\omega_e}{\omega_b} v_{dC} \right] \\
 p \cdot v_{dC} &= \omega_b \left[X_C i_{dg} + \frac{\omega_e}{\omega_b} v_{qC} \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

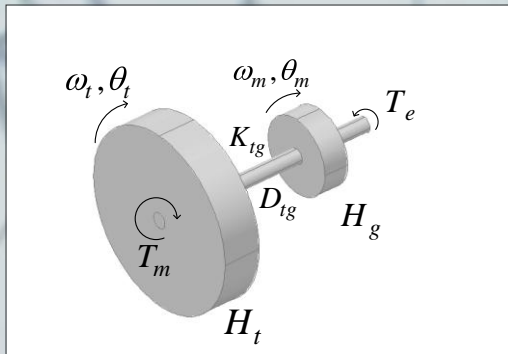
Modelo mecanico Turbina-Generator



Modelo massa-resorte (3 elementos): Rotor, Hub, Flexibilidad aspa(2 and 12Hz)

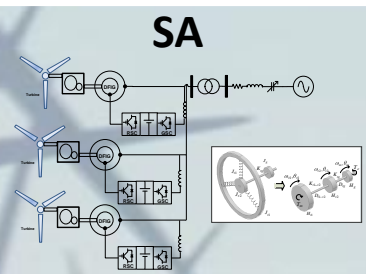
$$\begin{aligned}
 2H_{t1} \cdot p \cdot \omega_{t1} &= T_m - K_{t1t2}(\theta_{t1} - \theta_{t2}) - D_{t1t2}(\omega_{t1} - \omega_{t2}) \\
 2H_{t2} \cdot p \cdot \omega_{t2} &= K_{t1t2}(\theta_{t1} - \theta_{t2}) - K_{tg}(\theta_{t2} - \theta_m) - D_{tg}(\omega_{t2} - \omega_m) \\
 2H_g \cdot p \cdot \omega_m &= K_{tg}(\theta_{t2} - \theta_m) + D_{tg}(\omega_m - \omega_{t2}) - T_e \\
 p \cdot \theta_{t1} &= \omega_{t1} \cdot \omega_{b_mec} \\
 p \cdot \theta_{t2} &= \omega_{t2} \cdot \omega_{b_mec} \\
 p \cdot \theta_m &= \omega_m \cdot \omega_{b_mec}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Modelo massa-resorte (2 elementos): Rotor, Turbina



$$\begin{aligned}
 2H_t \cdot p \cdot \omega_t &= T_m - K_{tg}(\theta_t - \theta_m) - D_{tg}(\omega_t - \omega_m) \\
 2H_g \cdot p \cdot \omega_m &= K_{tg}(\theta_t - \theta_m) + D_{tg}(\omega_m - \omega_t) - T_e \\
 p \cdot \theta_t &= \omega_t \cdot \omega_{b_mec} \quad p \cdot \theta_m = \omega_m \cdot \omega_{b_mec} \\
 H_t &= H_{t1} + H_{t2}
 \end{aligned}$$

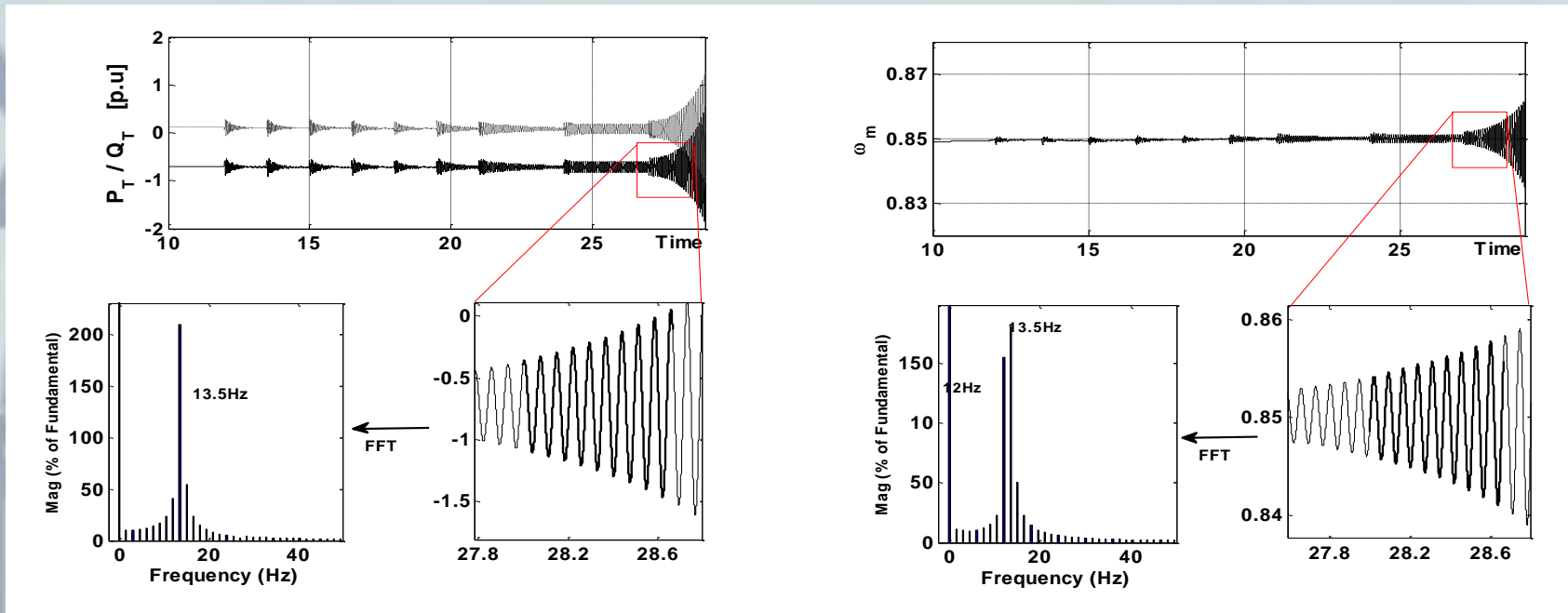
DFIG-based wind farm models

System config.	Description	Salida total	Vel. viento
<p>SA</p> 	<ul style="list-style-type: none"> *Multi generador *Turbina-generador tri-masa 	0.75 p.u. (300MW base)	8 m/s 9 m/s 10m/s
<p>SB</p> 	<ul style="list-style-type: none"> *Uni-generador *Turbina-generador tri-masa 	0.75 p.u. (300MW base)	9.2 m/s
<p>SC</p> 	<ul style="list-style-type: none"> *Uni-generador *Turbina-generador bimasa-masa 	0.75 p.u. (300MW base)	9.2m/s

Herramientas de análisis : Análisis modal y factor de participación (linearizacion, eigen-valores y vectores,etc)

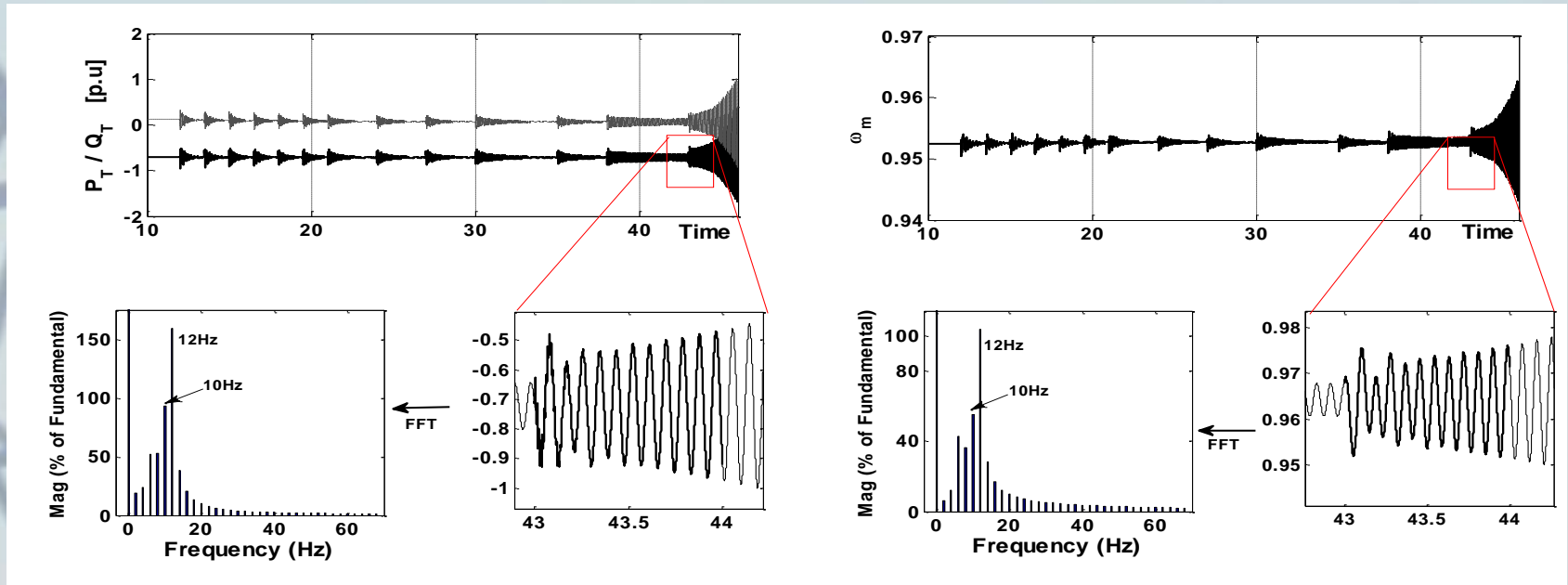
Tipo de modo	Eigenvalor	Frecuencia [Hz]	Damping (%)	Factores de Participacion (%)																																		
				V_{s0}	V_{d0}	i_{s01}	i_{d01}	i_{s02}	i_{d02}	i_{s03}	i_{d03}	i_{s04}	i_{d04}	i_{s05}	i_{d05}	i_{s06}	i_{d06}	i_{s07}	i_{d07}	i_{s08}	i_{d08}	i_{s09}	i_{d09}	i_{s10}	i_{d10}	ω_{s1}	ω_{d1}	θ_{s1}	ω_{s2}	ω_{d2}	θ_{s2}	ω_{s3}	ω_{d3}	θ_{s3}	ω_{s4}	ω_{d4}	A_{s4}	
Electric sub-synchronous	=1.02 + 86.05i	13.70	-1.19	1	1	6	5	6	5	7	7	7	7	12	12	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Electric super-synchronous	=-7.85 + 665.30i	105.89	1.18	6	6	9	9	7	7	8	8	6	6	8	8	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Torsional (generator 1)	=-0.83 + 31.51i	5.02	2.66	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	18	3	21	17	3	20	2	0	3												
Torsional (generator 2)	=-0.90 + 32.25i	5.13	2.80	0	0	7	5	7	5	4	10	4	10	2	6	2	6	7	1	7	5	1	5	3	0	3												
Torsional (generator 3)	=-0.82 + 31.46i	5.01	2.61	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	6	1	7	9	2	11	24	4	2	8											
Electrical Rotor (generator 1)	=-9.36 + 18.46i	2.94	45.23	0	0	22	22	23	23	3	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Electrical Rotor (generator 2)	=-10.24 + 19.19i	3.05	47.08	0	0	3	2	3	2	22	21	24	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Electrical Rotor (generator 3)	=-12.99 + 56.11i	8.93	22.56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	24	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Resultados de simulación: Sistema multi-generador, bi-masa



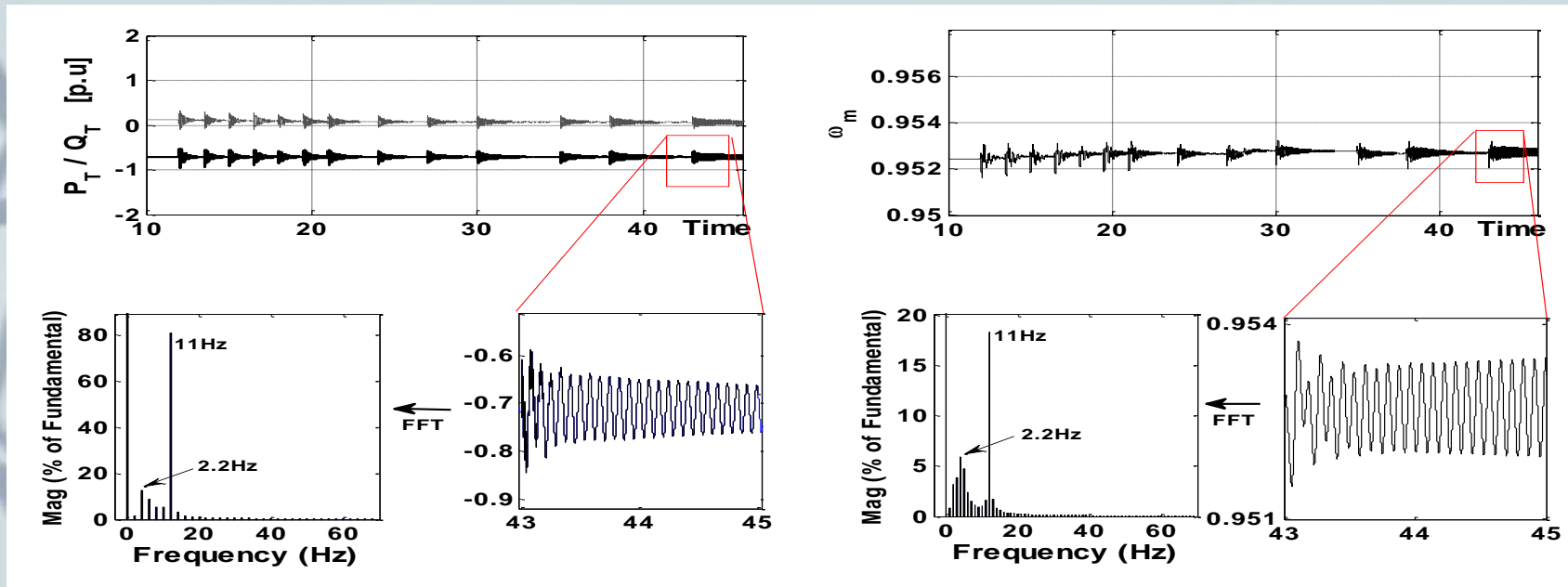
- (P_T , Q_T) y (ω_m) conforme la compensación aumenta.
- La resonancia aparece a 27s con compensación de 173%.
- La frecuencia natural de la red (13.5)Hz es próxima al modo mecánico de la turbina a 12Hz.

Resultados de simulación: Sistema multi-generador, tri-masa



- (P_T , Q_T) y (ω_m) conforme la compensación aumenta.
- La resonancia aparece a 43s con compensación de 183%.
- La frecuencia natural de la red (10)Hz es próxima al modo mecánico de la turbina a 12Hz.

Resultados de simulación: Sistema con medida de mitigación de RSS



- (P_T , Q_T) y (ω_m) conforme la compensación aumenta.
- La resonancia no aparece aun tras compensación del 83%.

Artículos publicados y en revisión

En revision:

“System modeling impact on SSR analysis for DFIG-based grid-connected wind farms in series-compensated transmission lines” S. Atayde and A. Chandra. (IEEE Transactions on Power Delivery)

“Torsional interaction countermeasures for DFIG-based wind farms grid connected to grid through series compensated long transmission lines ” S. Atayde and A. Chandra. (IEEE Transactions on Energy Conversion)

“Sub-Synchronous Resonance in Grid-Connected DFIG-based wind farms: modeling, analysis and countermeasures” S. Atayde and A. Chandra. CIGRE conference 2012, Montreal, CANADA

Publicados/ presentados:

“Multiple machine representation of DFIG based grid-connected wind farms for SSR studies”, Atayde S., Chandra, IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011 Melbourne, AUSTRALIA.

“Comparative study of control strategies for the Doubly Fed Induction Generator in Wind Energy Conversion Systems: a DSP-based implementation approach” Tremblay E., Atayde S., Chandra A. *IEEE Transactions on Sustainable Energy Conversion*, Vol. 2, No. 3, July 2011.

“Direct Power Control of a DFIG-based WECS with Active Filter Capabilities” Tremblay E., Atayde S., Chandra A. Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2009 Montreal, CANADA.

Resultados obtenidos en relación al fenómeno de RSS

- 1.- Desarrollo de modelos que representan las interacciones a frecuencias sub-síncronas entre la red de transmisión y el parque eólico basado en DFIG. Tales modelos pueden emplearse como herramienta para identificar riesgos potenciales de RSS.
- 2.- Análisis formal y mediante simulaciones los modelos propuestos, a fin de evaluar su capacidad de representar los diversos fenómenos de RSS reportados en la literatura disponible. Dicho análisis permiten estudiar las condiciones de operación que pueden conducir al sistema
- 3.- Se han propuesto medidas de mitigación del fenómeno de RSS. Tales medidas permitirán reducir el riesgo de RSS y los problemas asociados (disminución de vida útil de componentes mecánicos, colapso del sistema)

- El fenómeno de RSS se relaciona directamente con altos niveles de compensación y²⁴ bajas velocidades del generador.

Investigación en el GREPCI del ETS

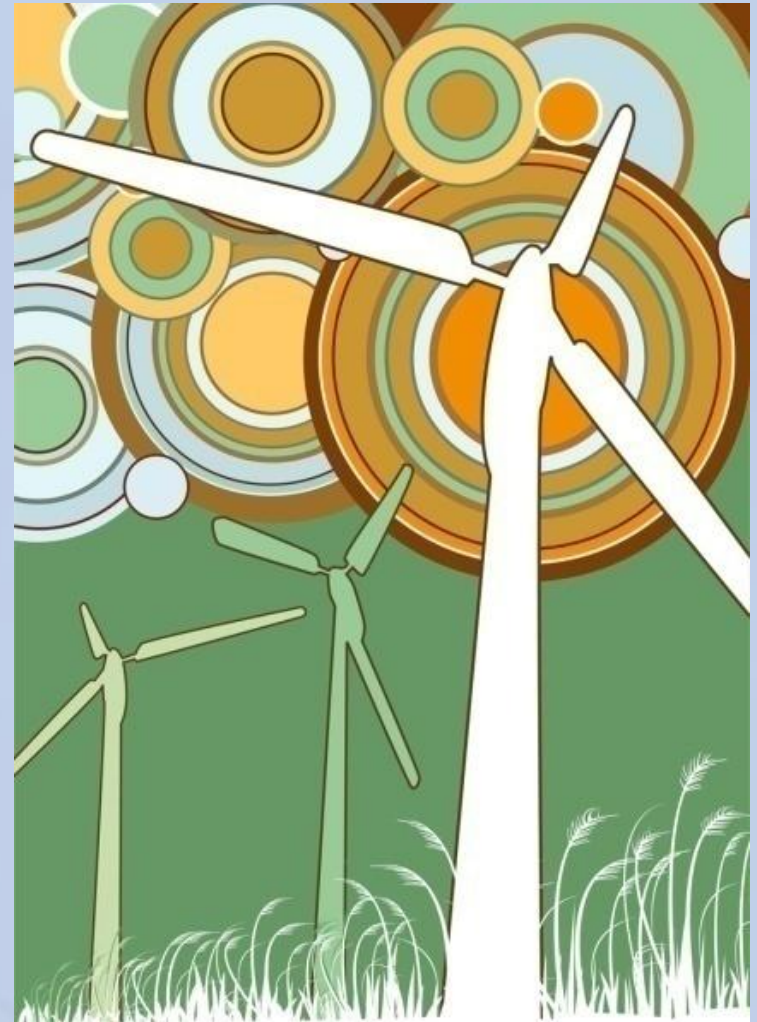
GREPCI del ETS, lleva a cabo investigación de punta con **énfasis en la aplicación industrial (transferencia de tecnología)**.

Temas de investigación del GREPCI vinculados con el desarrollo de fuentes de energía alternativas, incluyen entre otros:

- Prof. A.Chandra: Investigación sobre la **integración de granjas solares con la red eléctrica**; Sistemas eólicos híbridos; Control de aerogeneradores basados en PMSG (Maquina Síncrona a Imanes Permanentes); **Interfaces HVDC para conexión de fuentes de energía alternativa con la red eléctrica**; **Calidad de la potencia en sistemas de energía alternativa**, etc
- Prof. Luis Dessaint: Investigación sobre el **uso de la pila de hidrogeno en aplicaciones aeronáuticas y de transporte** (Bombardier Aéronautique); **Simulación de la red eléctrica en tiempo real** (Matlab *SimPower Systems* toolbox)
- Prof. K. Al-Haddad Investigación sobre eficacia energética de fuentes alternativas de energía (calidad de la energía, mitigación de la polución armónica); Integración a la red de Energías Renovables; Convertidores multinivel de alta eficacia

Gracias.

Preguntas??.....



INTRODUCTION

Leading Wind Turbine Manufactures

Manufacturer	Country	Market share in 2010 (%)	Market share in 2006
1.Vestas	Denmark	14.8	27.4
2.Sinovel	China	11.1	N/A
3.GE	USA	9.6	15.3
4.Goldwing	China	9.5	2.9
5.Enercon	Germany	7.2	14.5
6.Suzlon	India	6.9	7.5
7.Dongfang	China	6.7	N/A
8.Gamesa	Spain	6.6	15.5
9.Siemens	Den./Germ.	5.9	7.1
10. United Power	China	4.2	N/A

Table I shows how fast wind industry evolves and changes:

-Although their business volume has increased, all major traditional manufacturers (Vestas, GE, Gamesa, etc.) have lost market share.

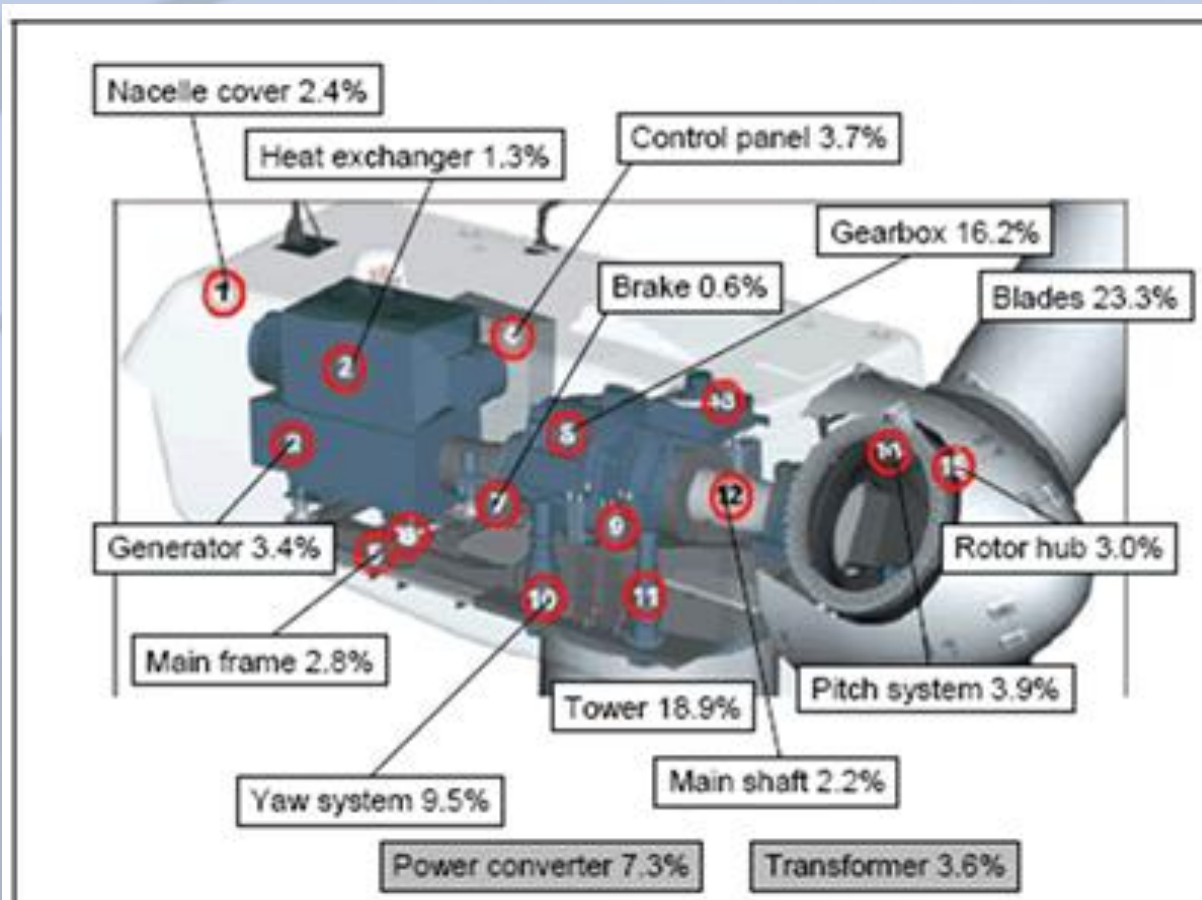
-In less than 5 years 4 Chinese companies made the top 10 of turbine manufacturers.

Table I.- Top 10 Turbine manufactures

(based on reports by BTM (<http://www.btm.dk>)

INTRODUCTION

Main components of a Wind turbine: Capital cost of components



Component	Cost(%)
Blades	23.3
Tower	18.9
Gearbox	16.2
Yaw system	9.5
Power Converter	7.3
Pitch system	3.9
Control panel	3.7
Transformer	3.6
Generator	3.4
Rotor hub	3.0

INTRODUCTION

Enercon's E-126 : largest operating wind turbine (for how long?)



Enercon's E-126 specs:

-7.5 MW rated power

-Turbine concept: Gearless/Variable speed

- Annular Generator: low-speed synchronous generator with no direct grid coupling

-Rotor diameter 126m ; Hub height 135m

-Cut-in wind speed: 3m/s

-Cut-out wind speed: up to 34m/s

-Max. Cp.: 0.48@8m/s (92.7% of Betz's coefficient!!)

(Source <http://www.enercon.de>)

INTRODUCTION

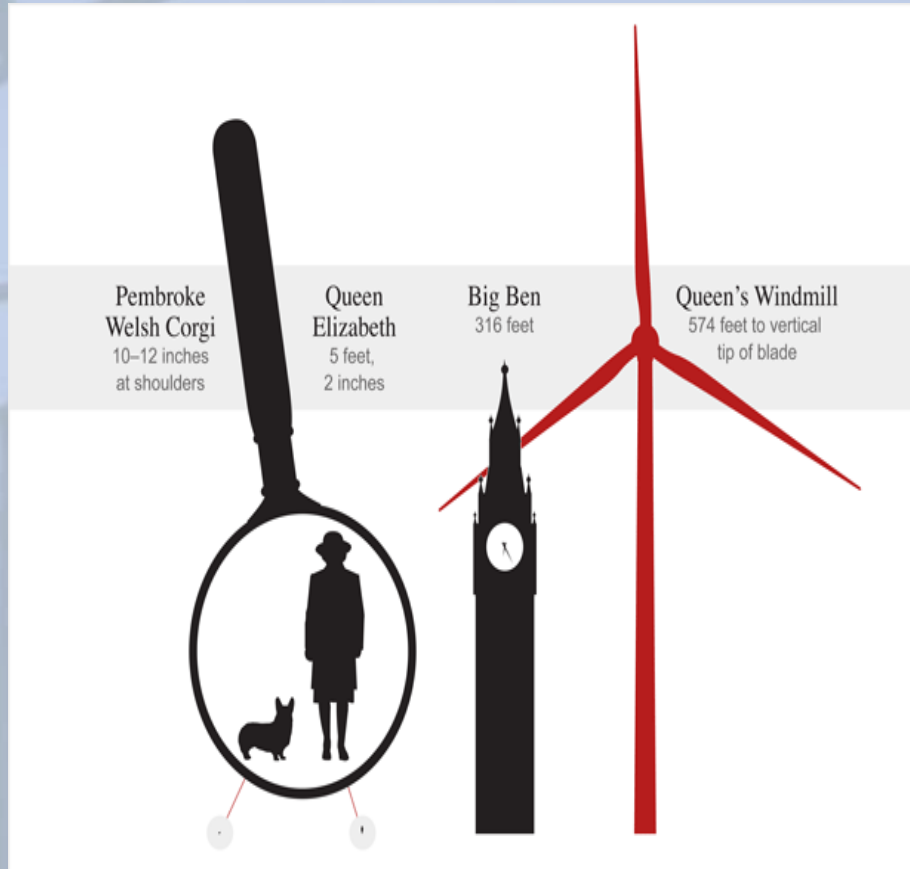
Upcoming designs: Clipper's "Britannia" 10 MW wind turbine concept

Specs:

- 10.0 MW rated power; offshore concept;
- Height 175m; Rotor diameter 155m

Interesting facts:

- Over its lifetime this turbine will offset the need to dispel 724,000 tons of CO₂ into the earth's atmosphere and displace the use of 2 million oil barrels (the world consumes 75 million barrels a day)
- Prototype Scheduled to be deployed in 2012. The Queen of England (Crown Estate) has commanded one. The Crown Estate controls the seas up to 14 miles off the British coast.



INTRODUCTION

Sinovel's SL600 : largest China Made wind turbine



Sinovel's E-126 specs:

-6.0 MW rated power

-Turbine concept: Variable speed. LVRT ready design.

- Asynchronous generator (squirrel cage)

-Rotor diameter 128m ; Hub height 130m

-Largest China made turbine

-Sinovel has replaced GE as the second largest wind turbine manufacturer

INTRODUCTION

Upcoming designs: Sway's 10 MW wind turbine concept



Specs:

-10.0 MW rated power

-Technology: Gearless/Variable speed

- Concept: Lightweight, designed for both fixed seabed and floating installations

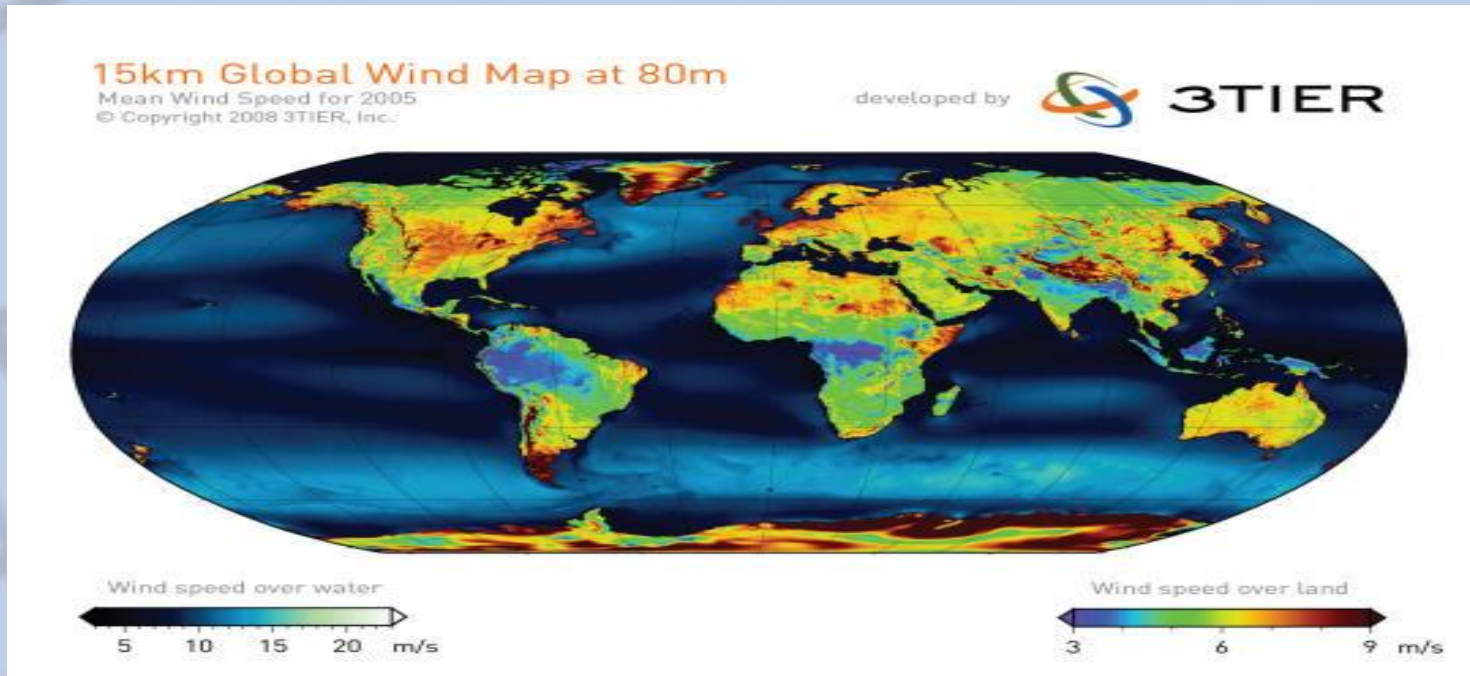
-Rotor diameter 145m

-Sway was established with the sole purpose of developing a cost effective 10 MW wind turbine.

-Prototype Scheduled to be operational before 2015

INTRODUCTION

Global Wind Map at 80m height



- Wind speed varies directly with height. Hub heights of more than 100m are customary in modern wind turbines in the MWs range.
- Wind speeds are much higher and more consistent over water. As a result energy density is larger.
- Wind prospecting tools and risk assessment methodologies are essential in the viability analysis of a wind farm project.

INTRODUCTION

Largest inland wind farm: Roscoe (TX), USA



Specs:

- 781.5 MW installed capacity (average production of 25%-30% or 195-235MW)
- Mitsubishi, Siemens and GE Turbines (ratings 1-2.3MW)
- Cost: US \$1 billion. Wind farm covers 400 square km (Up to 400 individual land owners are involved in the land lease contract)

INTRODUCTION

Largest offshore wind farm: Thanet, England



Specs:

- 300 MW installed capacity (average production of 35%-40% or 105-120MW)
- 100 Vestas' V90-3MW turbines (variable speed/DFIG-based/90m rotor diameter /independent pitch control/1:100 gearbox/15m/s rated windspeed).
- Siemens offshore (33kv/132kv) and inshore (SVC) substations/
- Cost: US \$1.2-1.4 billion. Wind farm covers 35 square km.

INTRODUCTION

Integration Of Wind Energy Exploitation and Tourism: The Eye of The Wind



- First fully functional 1.5MW wind turbine to have an observation pod (viewPOD).
- Conceived as a landmark for the city of Vancouver in CANADA.
- Its 65m tower includes an elevator to the viewPOD.

INTRODUCTION

Integration Of Wind Energy Exploitation and Architecture: Bahrain WTC



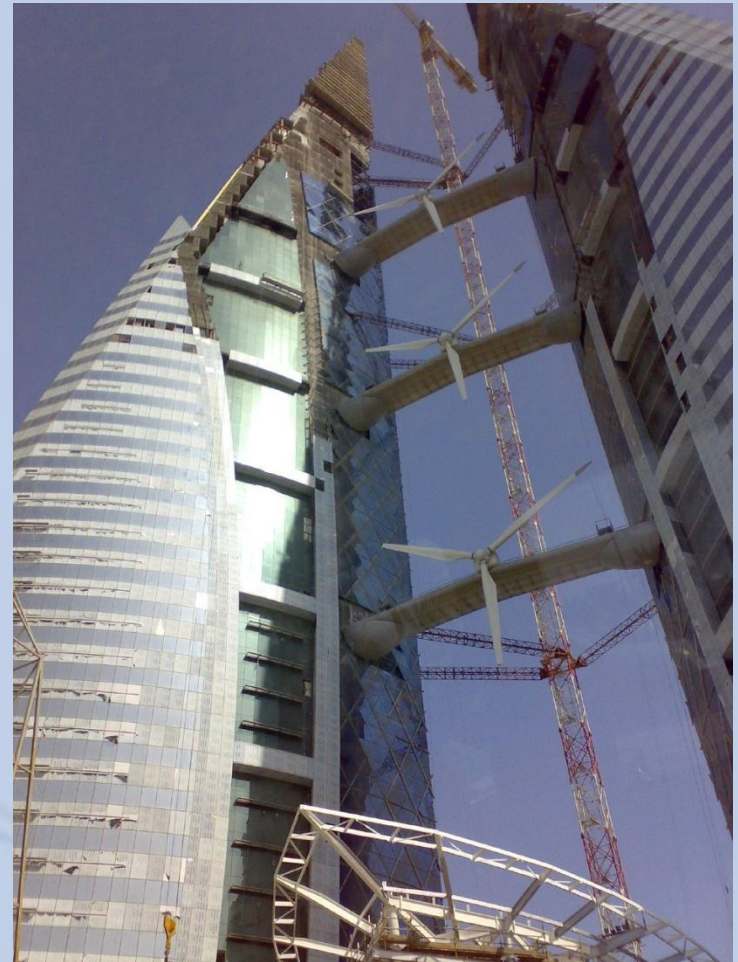
Source: <http://www.bahrainwtc.com>

Bahrain World Trade Center:

- First skyscraper to integrate large scale Wind turbines in its design. Completed in 2008
- Three 225KW wind turbines supply up to 15% of the building's power consumption.
- The two 240m-height towers have a sail-like shape that redirect airflow into the fixed wind turbines, increasing its efficiency.

INTRODUCTION

Integration Of Wind Energy Exploitation and Architecture: Bahrain WTC



Source: <http://www.bahrainwtc.com>

INTRODUCTION

Integration Of Wind Energy Exploitation and Architecture: Strata Tower (London



Strata tower:

-42 story skyscraper with 3 built-in wind turbines at the top.

-Building designed to produced up to 50 MWh or 8% of his electric consumption.

- Wind turbines design to withstand up to 35 mph winds .

INTRODUCTION

Integration Of Wind Energy Exploitation and Architecture: Strata Tower (London)

