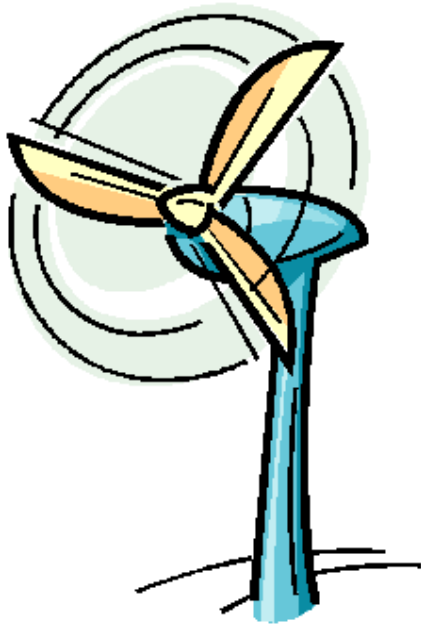


# Extrayendo energía del viento: Energía eólica a pequeña y a gran escala



Dr. Oliver Probst  
Tecnológico de Monterrey  
[oprobst@itesm.mx](mailto:oprobst@itesm.mx)



Mérida, Yucatán,  
15 de Marzo de 2012



# La energía eólica en México

Presidente Felipe Calderón Hinojosa en la inauguración de los parques eólicos Oaxaca II, III y IV, ubicados en la región de La Ventosa. La capacidad combinada de las tres plantas es de **306 MW**.



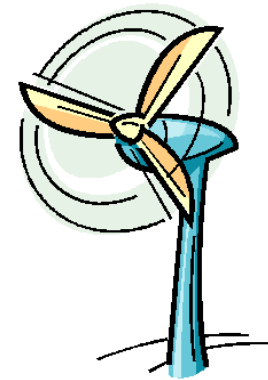
# La energía eólica en México

Parque “Eólica de Arriaga” (16 turbinas Vestas 1.8MW = 28.8MW)  
inaugurado este miércoles 14 de Marzo de 2012 por Ricardo Salinas  
Pliego y el gobernador Juan Sabines de Chiapas.



# Agenda

1. Introducción e historia de la energía eólica
2. “Plantando turbinas”: ¿Cómo desarrollar un parque eólico?
3. “Armando turbinas”: ¿Cómo construir o mejorar aerogeneradores?
4. Posgrados en energía eólica en el Tecnológico de Monterrey



# Contribuciones

- **Ing. Roberto Chávez (estudiante doctoral, DCI-ITESM)**
- **Dr. Diego Cárdenas (egresado DCI-ITESM)**
- Ing. José Francisco Herbert (estudiante doctoral)
- Dr. Alejandro Escárpita (egresado DCI-ITESM)
- **M.C. Herbé Gómez (egresado MIE-ITESM)**
- **M.C. Oswaldo Monroy (egresado MIE-ITESM)**
- Ing. Salomón Castro (estudiante de Maestría, MIE-ITESM)
- M.C. Alejandro Romo (profesionista)
- M.C. Jorge Elizondo (Aeroluz)
- M.C. Jaime Martínez (Aeroluz)
- Dr. Hugo Elizalde (ITESM-Ciudad de México)
- Dr. Piergiovanni Marzocca (Clarkson University)

# Alianzas

- American Shoreline / AmShore Wind LLC, Corpus Christi, TX
  - Recurso eólico
- Diseño Eólico y Solar S. de R.L. / Aeroluz, Monterrey, N.L.
  - Tecnología de pequeños aerogeneradores
- Clarkson University, N.Y., EE.UU.
  - Propiedades mecánicas de aspas
- Universidad de Texas en Brownsville
  - Mecánica de fluidos
- Gamesa Wind US, Philadelphia, EEUU
  - Capacitación de especialistas en energía eólica
  - (Concluido)



# Introducción e historia

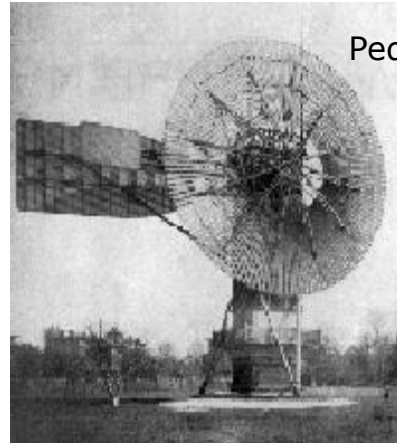
1



# Introducción e historia (1)

## Inicio de la tecnología moderna

- La tecnología moderna de los aerogeneradores nace paralelamente en Norteamérica (EE.UU.) y en Europa (Dinamarca, Alemania, Rusia) y está enfocada a la generación de electricidad.
- Avanzó con pocos fondos gracias al entusiasmo de sus promotores.



Pequeño aerogenerador de los hermanos Jacobs en EE.UU. (años 1930)



El aerogenerador de Brush en Cleveland, Ohio (1888). El primero en generar electricidad con el viento.

La turbina Gedser (diám. 34m, 200kW)  
Dinamarca 1956. Remozada en 1977.  
Nótese los refuerzos mecánicos.

La turbina Hütter-Allgaier (diám. 34m, 100kW)  
Alemania 1973. Contaba ya con muchos elementos tecnológicos usados comercialmente hoy en día.





# Introducción e historia (2)

El primer aerogenerador de una compañía eléctrica

- La turbina Smith-Putnam fue el primer aerogenerador con una capacidad de > 1MW; además el primero en haber sido construido y operado por una compañía eléctrica (Morgan Smith, Pensilvania).
- Operó de 1941 a 1945 con algunas interrupciones.



Durante la construcción



En operación sobre la colina "Granpa's knob" en Vermont.

# Introducción e historia (3)

## Aerogeneradores modernos

- Existen dos enfoques globales: Aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) o eje vertical (VAWT).
- Casi todos los aerogeneradores comerciales operando hoy en día son de eje horizontal y cuentan con tres aspas.



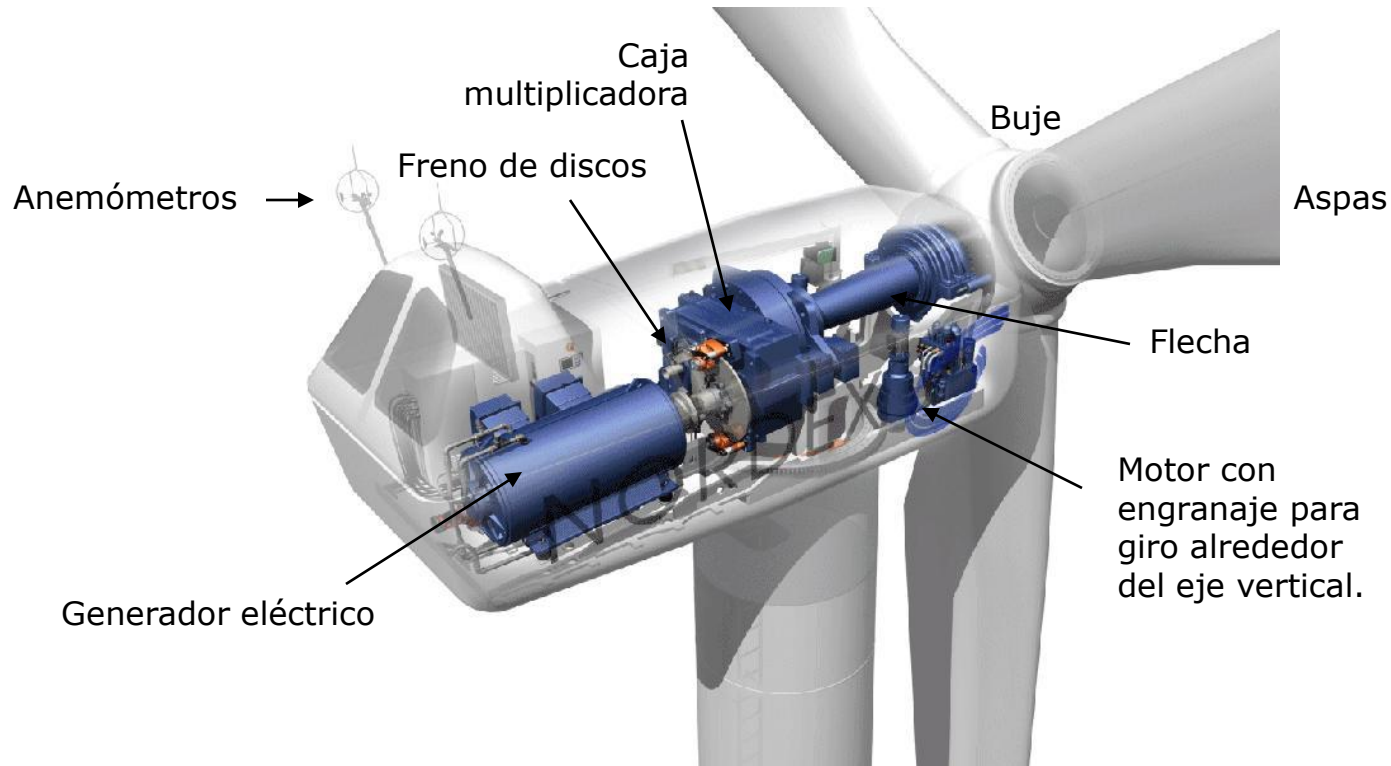
Parque eólico comercial.



La "eóle" en Canadá de 4MW. Hasta hace poco la aeroturbina más grande del mundo. Opera ahora con una potencia reducida de 2.5MW.

# Introducción e historia (4)

Ejemplo de un aerogenerador comercial de 1.3MW (diám. 60m) con control por entrada en pérdidas ("stall"). (*Descontinuado*). Fabricante: Nordex



# “Plantando turbinas”: El desarrollo de parques eólicos



# 2



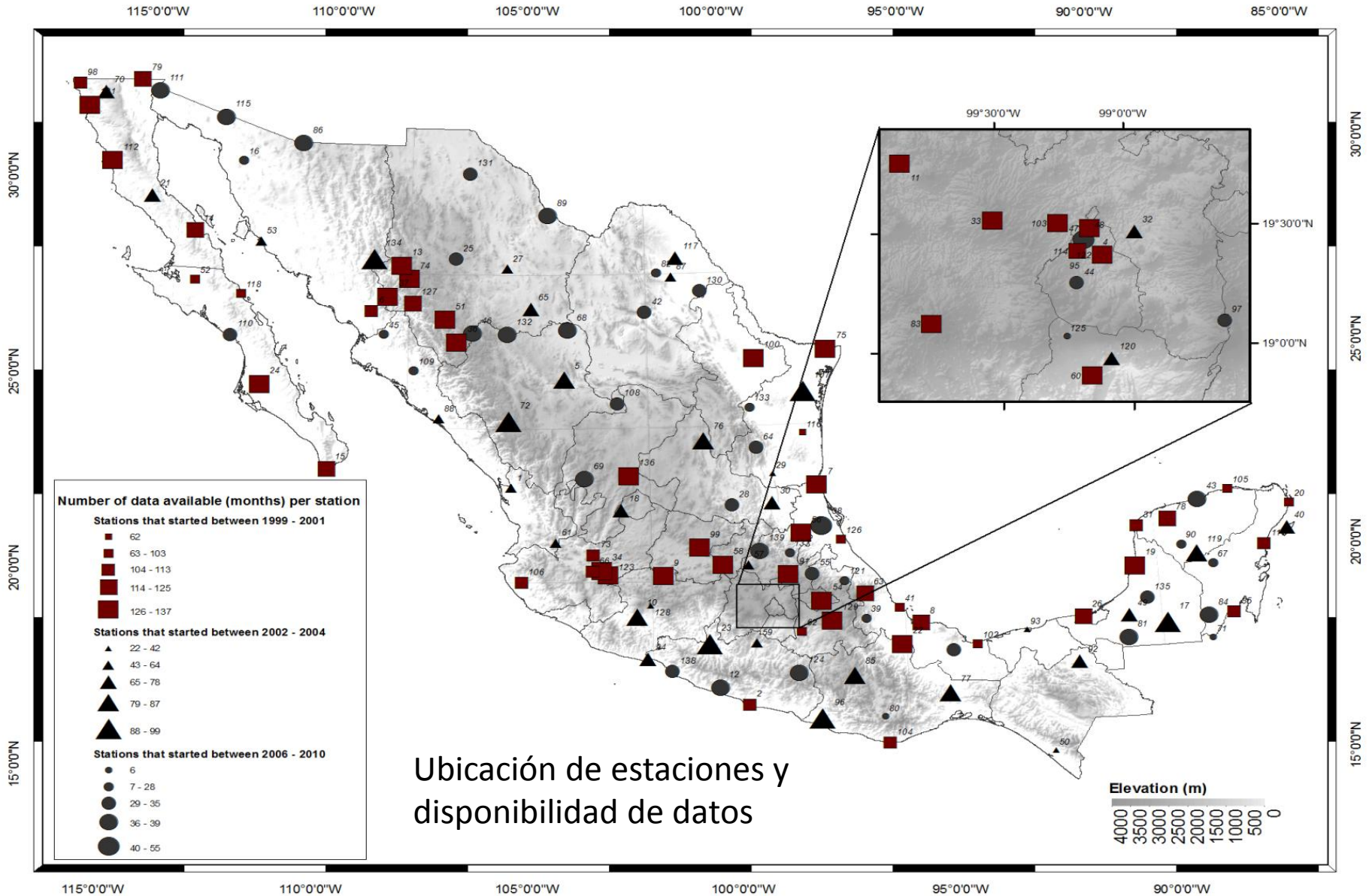
Proyecto “Peñascal” (Texas, 408 MW, fases 1 + 2), Iberdrola Renewables. Desarrollado por American Shoreline, Corpus Christi.

# ¿Qué se necesita para plantar turbinas?

## Pasos en el desarrollo de un parque eólico

- **Encontrar un sitio ventoso (prospección temprana)**
- Amarrar los terrenos del sitio (comprar o arrendar)
- **Medir el viento en el sitio y demostrar la factibilidad (evaluación del recurso eólico)**
- Conseguir clientes interesados en consumir y pagar energía verde y barata (PPAs)
- Estudiar y mitigar el impacto ambiental (MIA, ETJ, estudios de aves)
- Negociar con la compañía eléctrica (CFE) la interconexión a su red eléctrica
- Estudiar la regulación aplicable y aplicarla al estudio de la factibilidad económica del proyecto
- Financiar el proyecto
- Construir y operar

# Análisis de calidad sistemático de la estaciones superficiales (EMAs) del Servicio Meteorológico Nacional



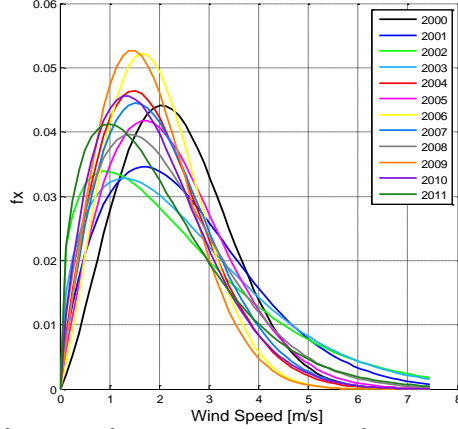
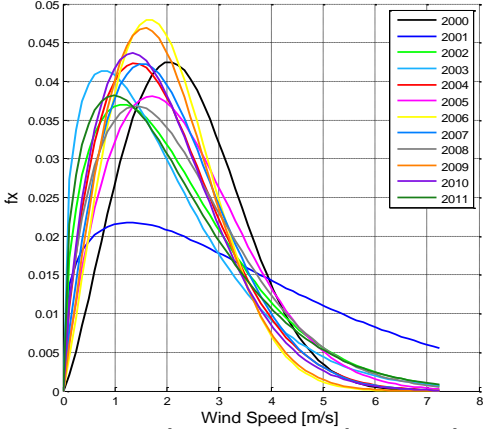
# Resultados de los procesos de control de calidad

**Antes**

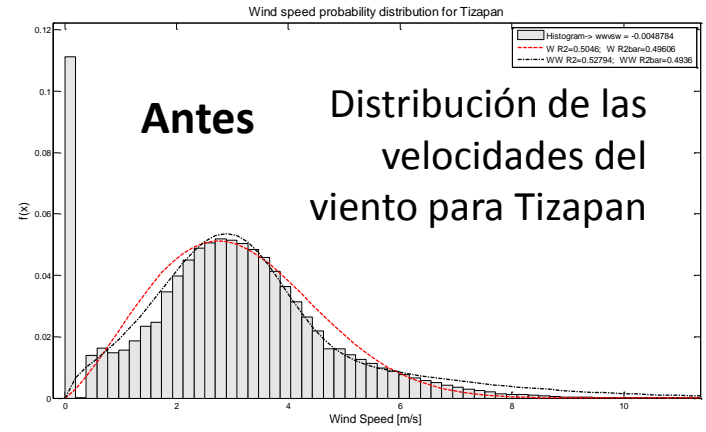
**Después**

Weibull curves for each year : Acapulco

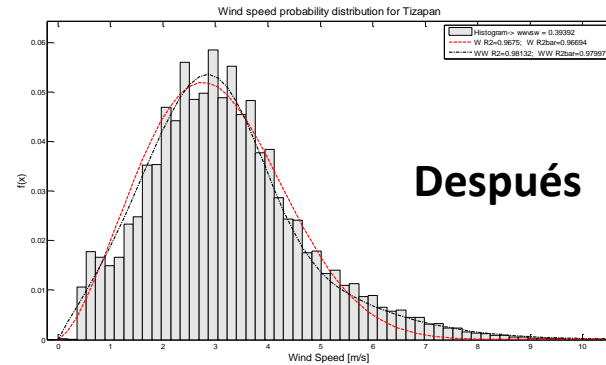
Weibull curves for each year : Acapulco



Distribuciones de Weibull anuales para Acapulco



Distribución de las velocidades del viento para Tizapan



**Después**

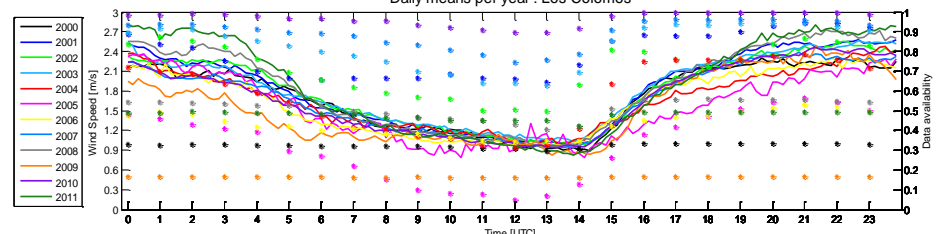
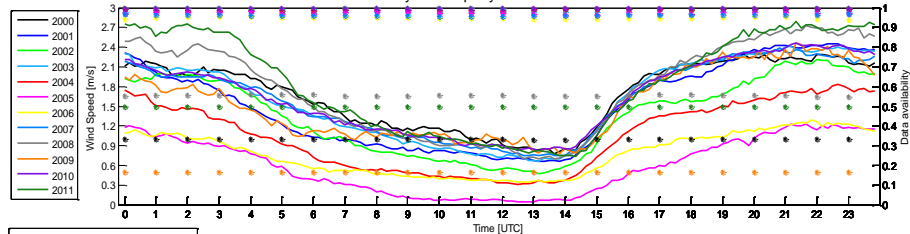
Perfiles diarios en Los Colomos

**Antes**

**Después**

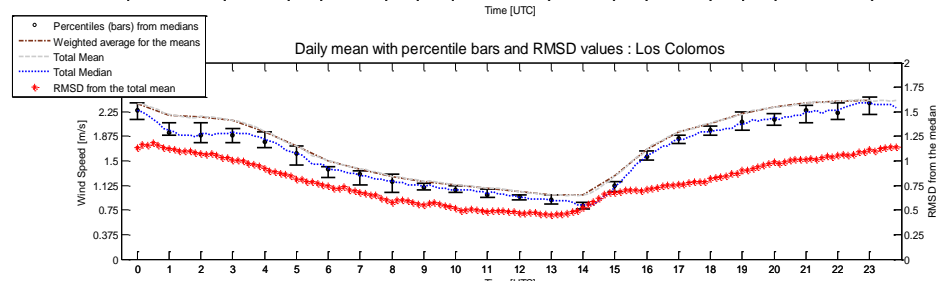
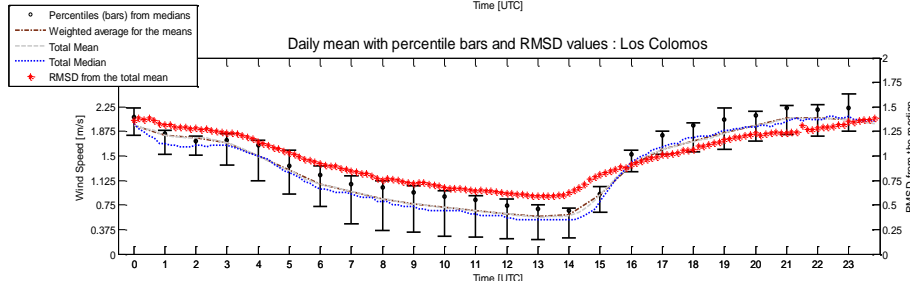
Daily means per year : Los Colomos

Daily means per year : Los Colomos



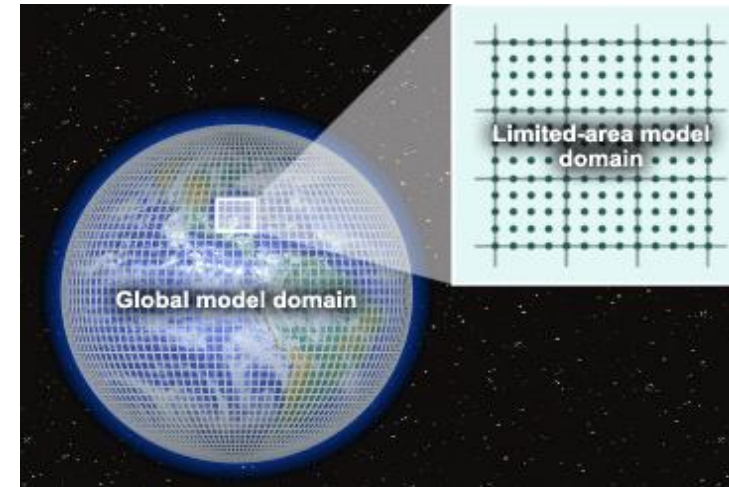
Daily mean with percentile bars and RMSD values : Los Colomos

Daily mean with percentile bars and RMSD values : Los Colomos

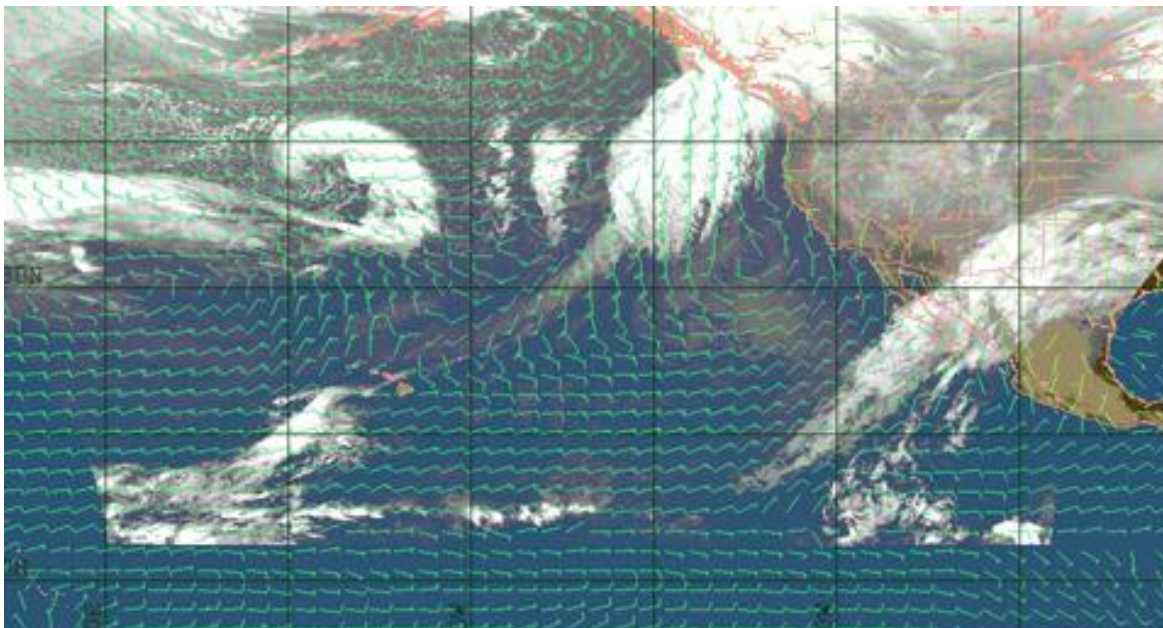


# Modelación numérica de predicción del tiempo (NWP)

Modelos numéricos de predicción del viento resuelven las **ecuaciones físicas básicas de la atmósfera** (momentum, energía, continuidad etc.) de manera explícita sobre ciertas **escalas temporales y espaciales**. Procesos más cortos o más pequeños tienen que ser modelados / parametrizados.



Modelos de circulación global y regional (COMET, 2006)

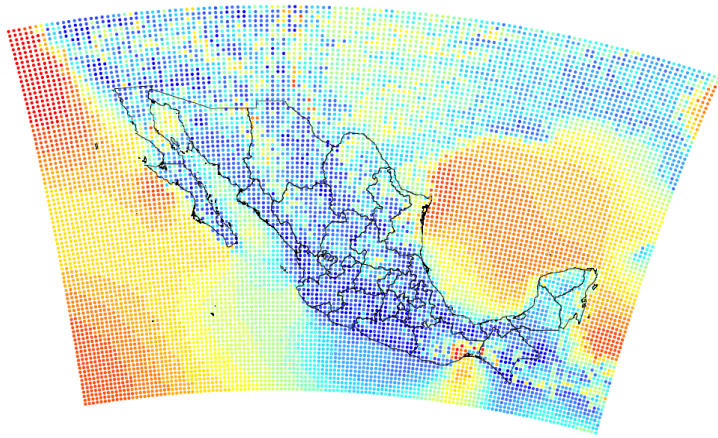


Velocidad de viento annual a escala global (COMET, 2006)



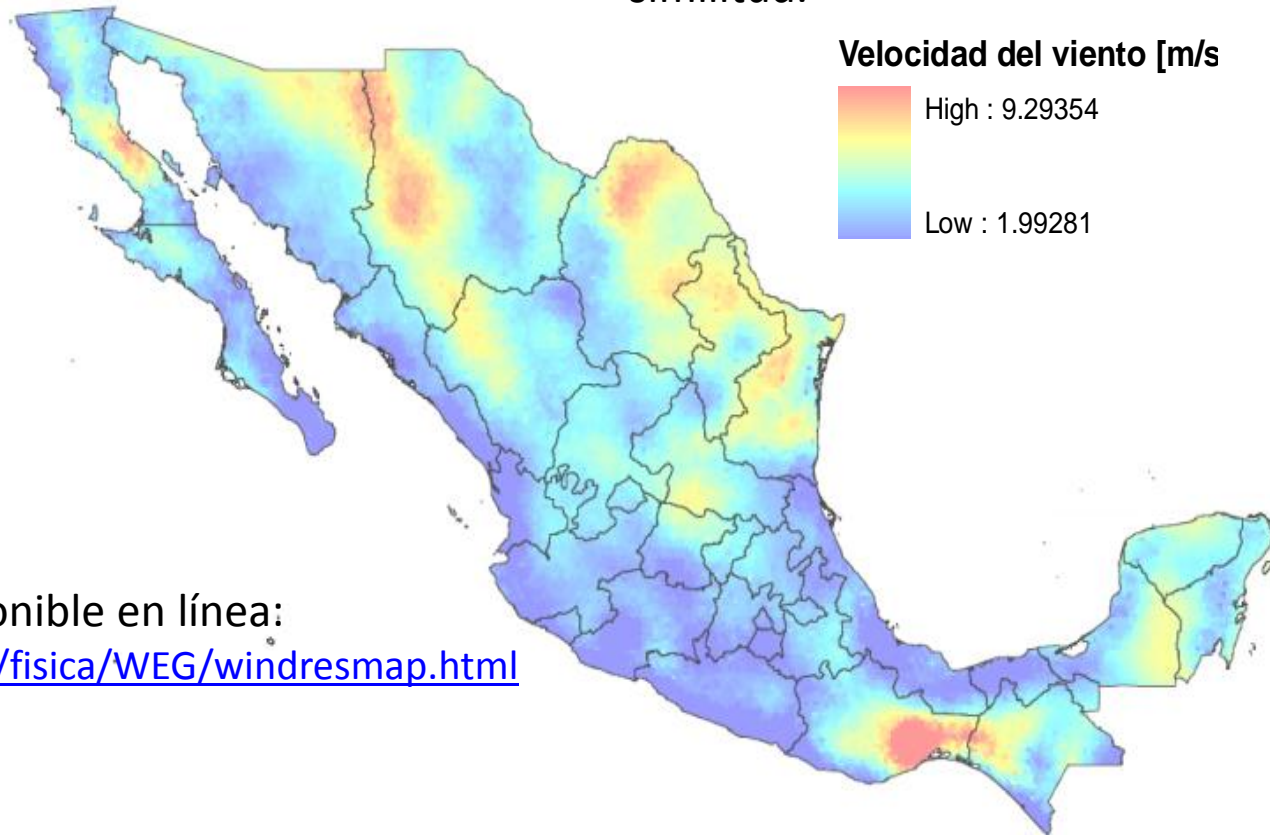
# Aprovechamiento de **bases de datos meteorológicas** para la creación de **mapas de viento**

*Ejemplo: NARR*



Mapa de viento (promedios de 20 años a 10m de altura) extraído de la base de datos NARR (**North American Regional Reanalysis**)

Mapa de viento (20 años) construido para 80m y una resolución lateral de 3km usando interpolación geoespecial y extrapolación vertical mediante teoría de similitud.

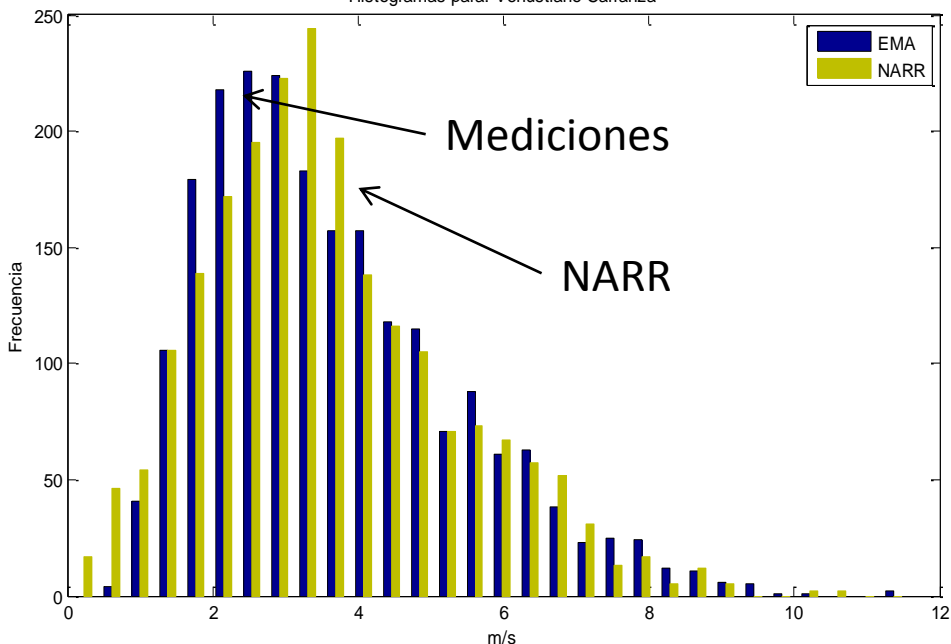


Mapa disponible en línea:

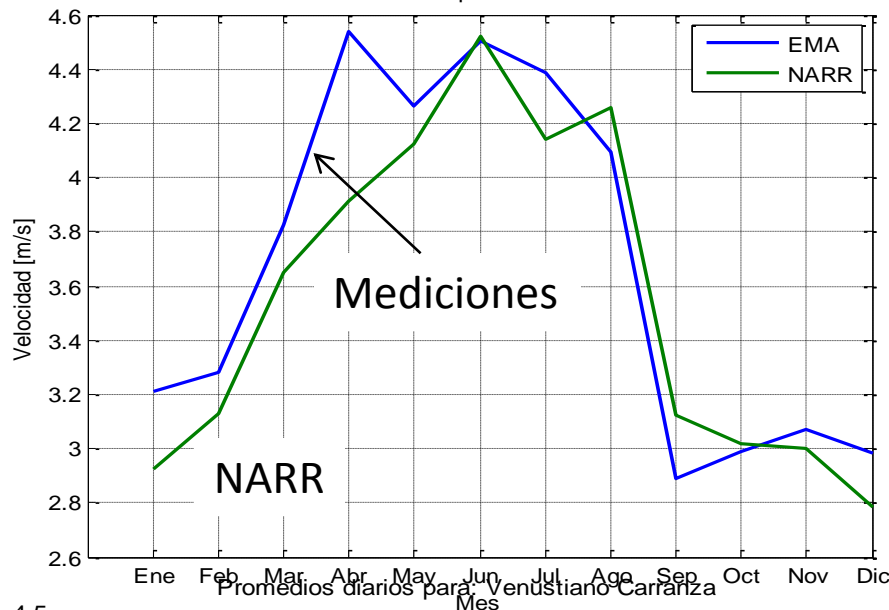
<http://fisica.mty.itesm.mx/fisica/WEG/windresmap.html>

# Validación de NARR vs. mediciones

Histogramas para: Venustiano Carranza



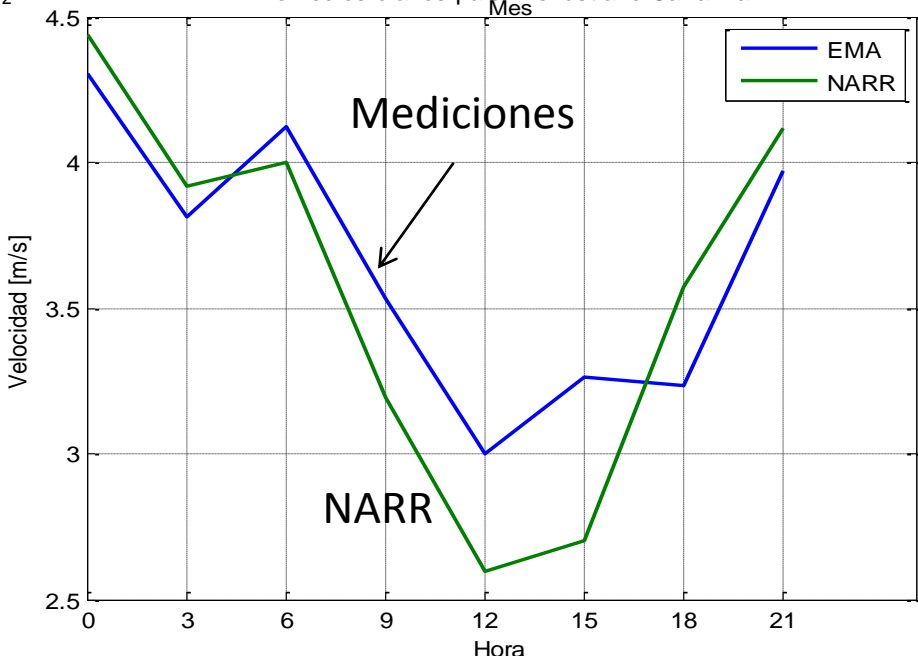
Promedios mensuales para: Venustiano Carranza



*Ejemplo:* Estación Venustiano Carranza

Para la validación los resultados del mapa fueron interpolados a la posición de la estación meteorológica mediante un procedimiento de interpolación geoestadístico (Kriging)

Promedios diarios para: Venustiano Carranza

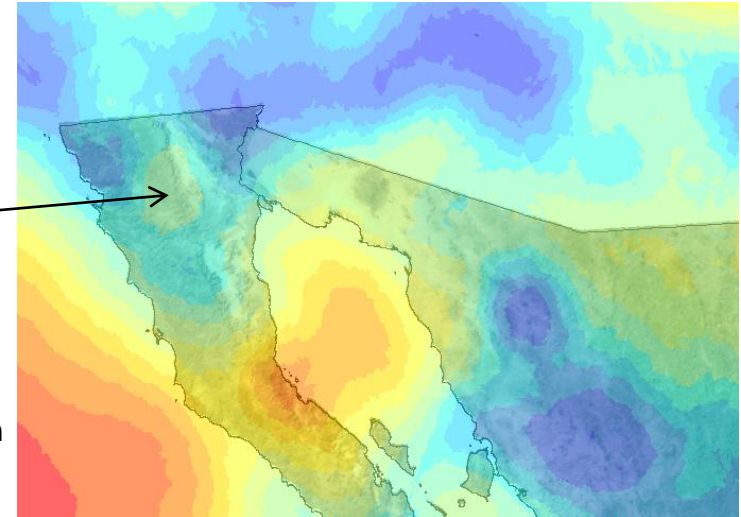


# Dependencia con respecto a las condiciones de frontera / inicialización

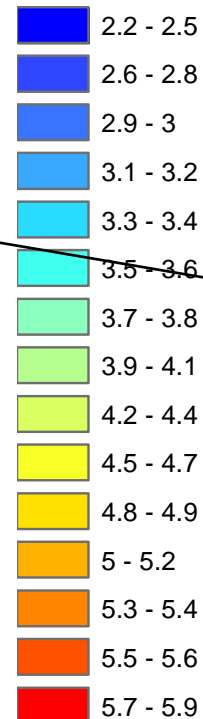
Comparación de estudios WRF-ARW con diferentes bases de datos para la temperatura superficial del mar.

No se detecta la región de "La Rumorosa" en el sistema NARR

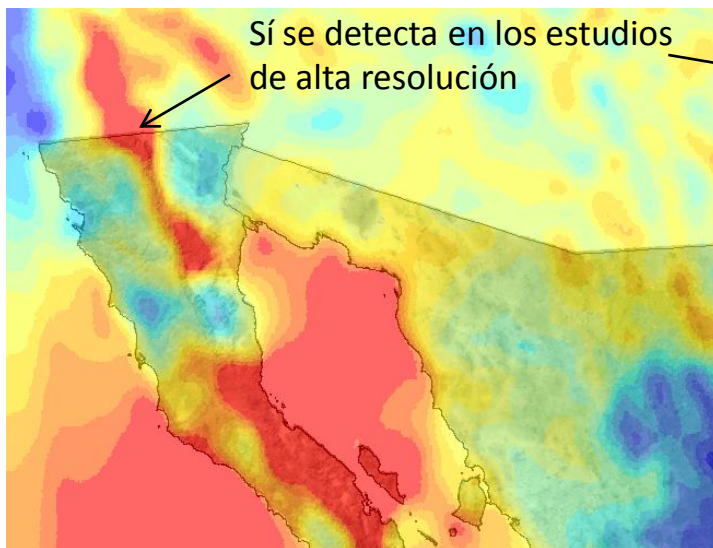
NARR



wind speed @ 10m

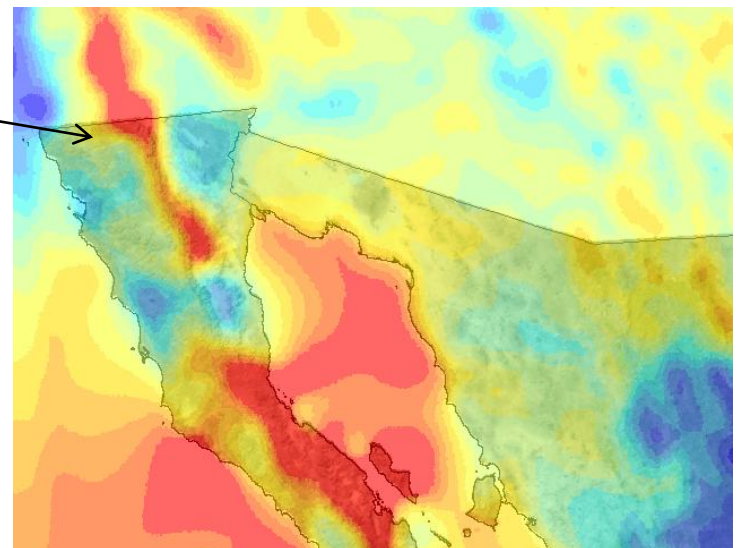


WRF- ARW with NARR\_SST



Sí se detecta en los estudios de alta resolución

WRF- ARW with HR\_SST



# SODAR

Sistema comercial (ART) armado sobre remolque y equipado con sistema FV y telemetría (3G)



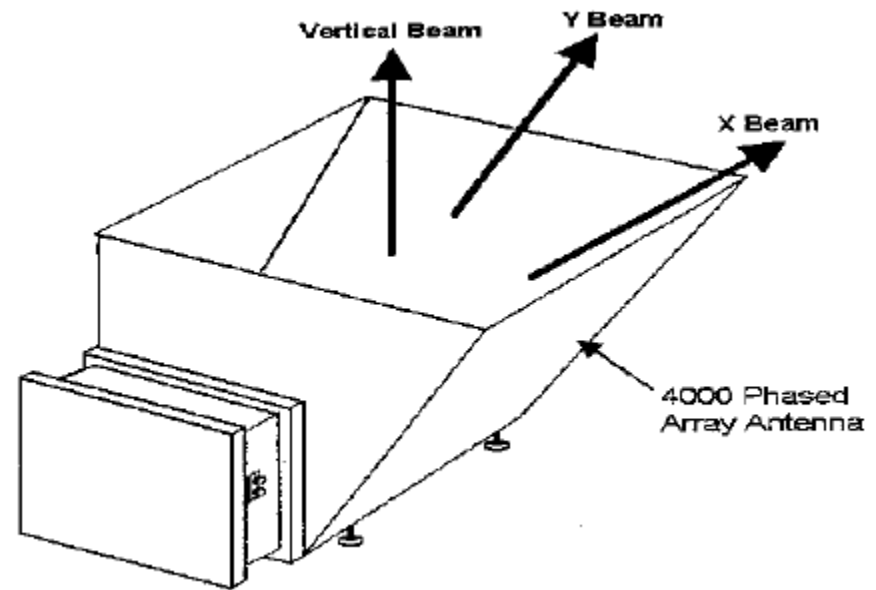
# Sodar: Principios básicos (1)

$$w = \frac{-\Delta f S}{2f_0} \quad \text{Vertical component (z)}$$

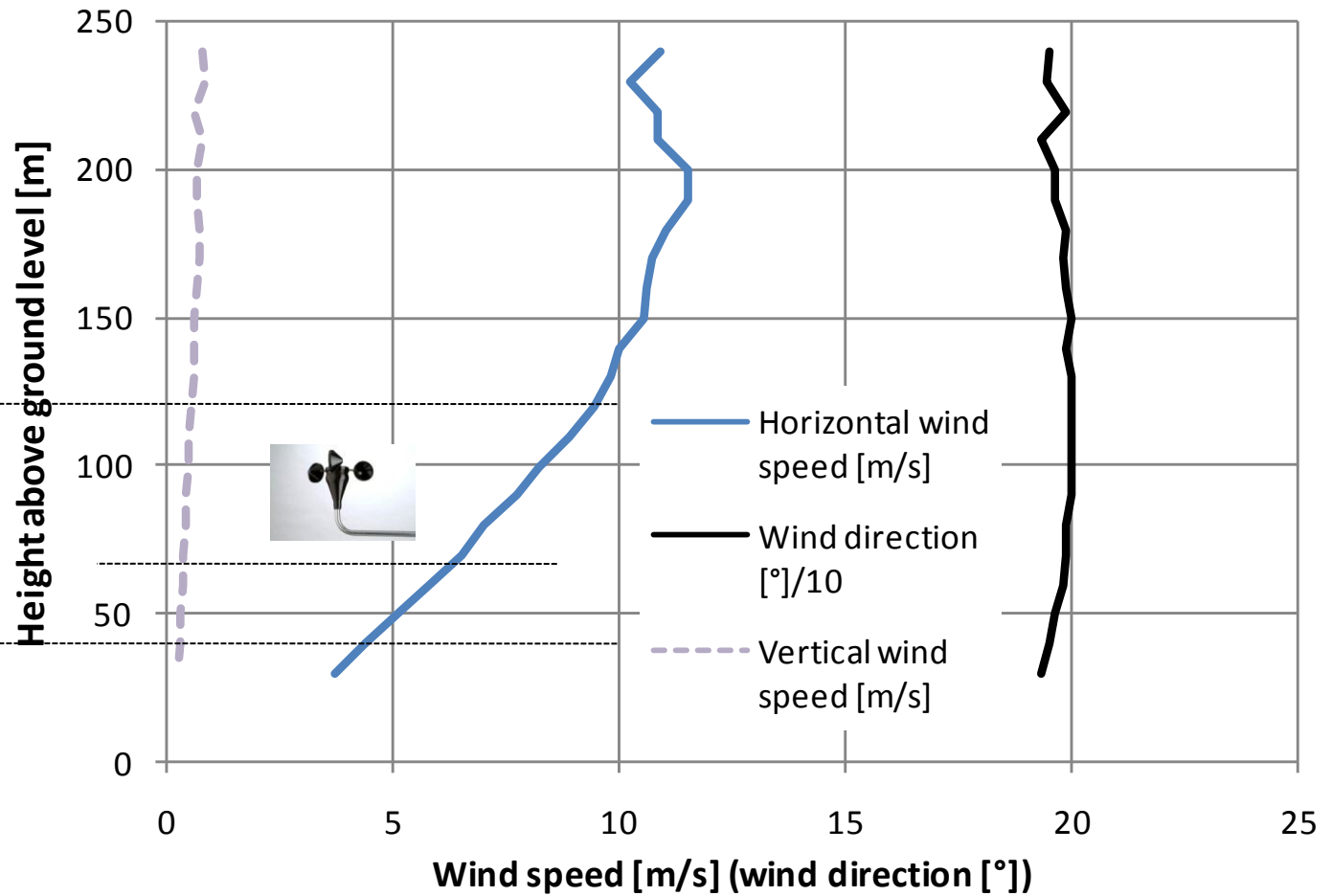
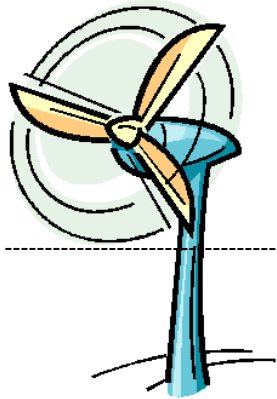
Horizontal components (x,y)

$$v = \frac{-\Delta f S}{2f_0 \sin \theta_y} - \frac{w}{\tan \theta_y}$$

$$u = \frac{-\Delta f S}{2f_0 \sin \theta_x} - \frac{w}{\tan \theta_x}$$

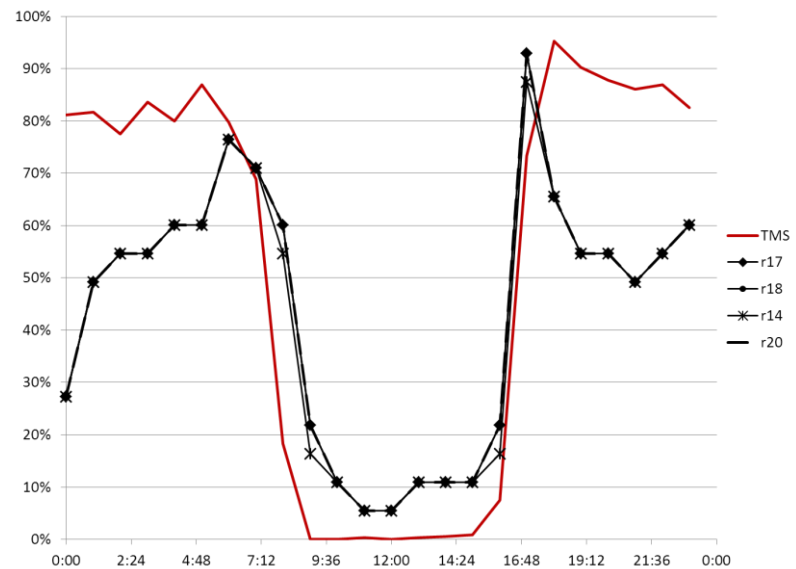
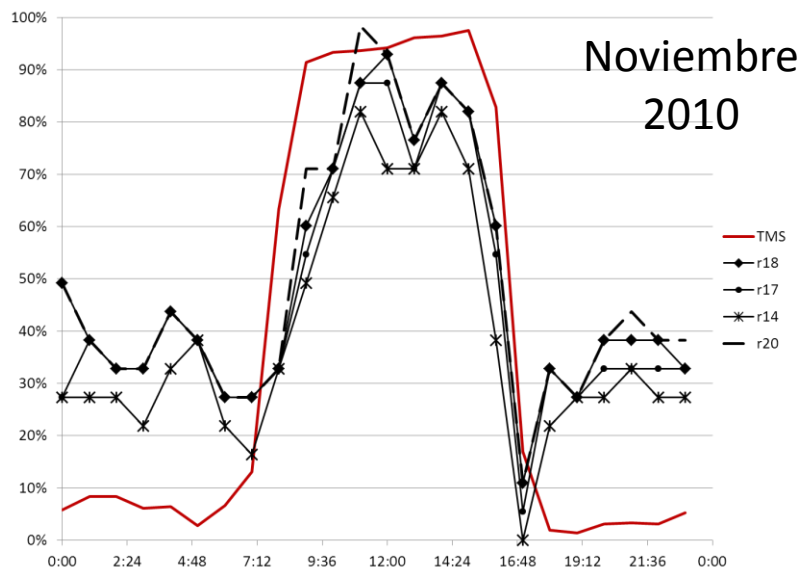
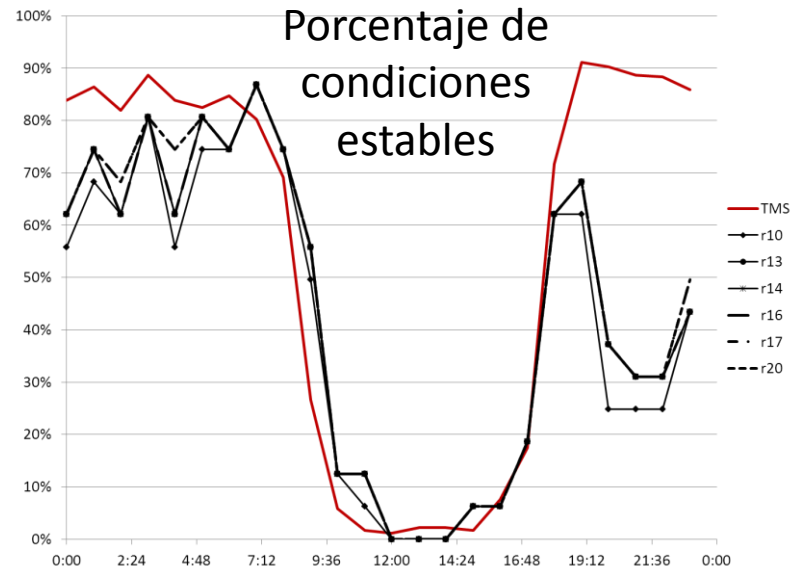
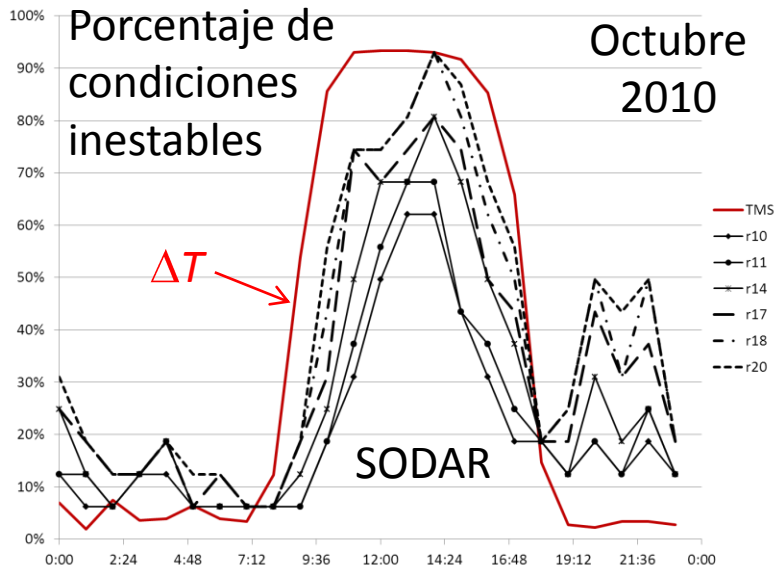


# Sodar: Resultados típicos



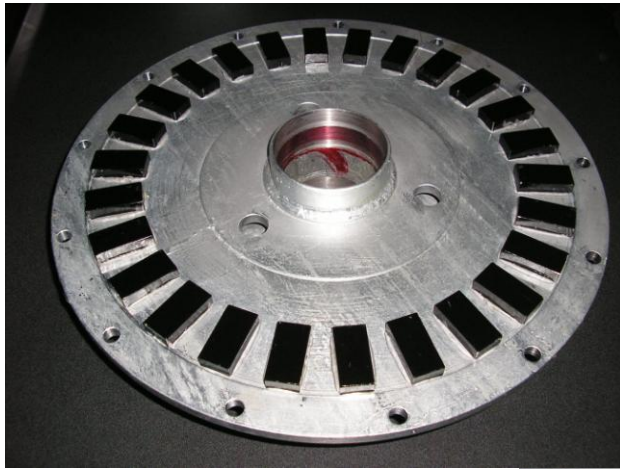
# Sodar y estabilidad atmosférica:

## Calibración contra mediciones de diferencias de temperatura

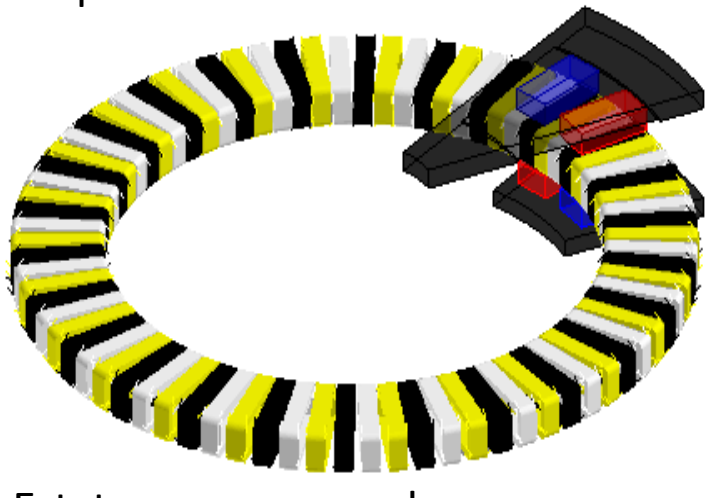


# Construyendo mejores turbinas

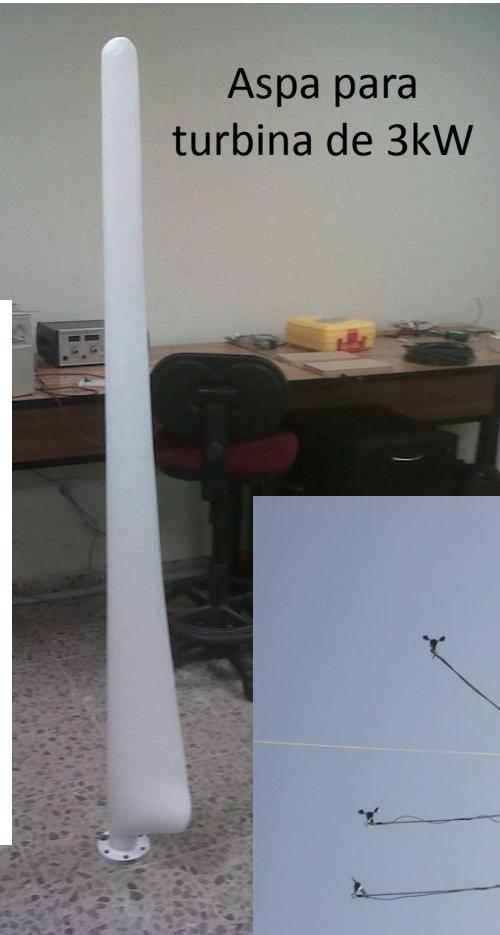
# 3



Rotor con imanes permanentes



Estator para generador de flujo toroidal



Aspa para turbina de 3kW



Prueba de campo de turbina de 1.4kW



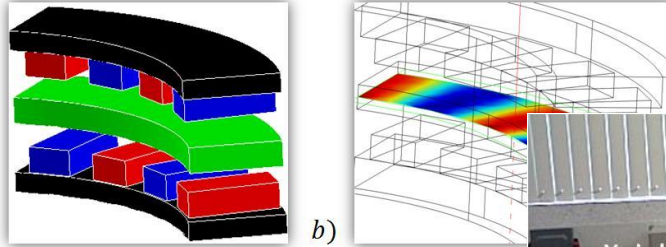
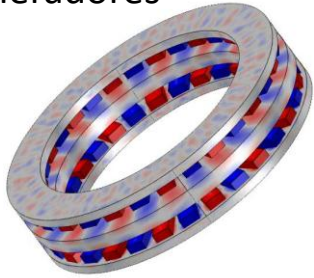
# ¿Qué se necesita para construir turbinas?

## Elementos de ciencia y tecnología

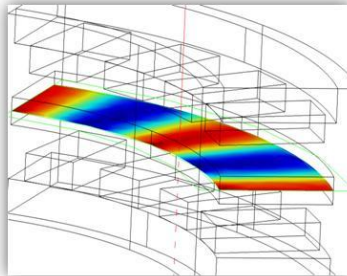
- Diseño aerodinámico y optimización de aspas/rotores
- Diseño y análisis estructural de aspas y turbinas
- **Diseño, modelación y caracterización de generadores eléctricos**
- **Modelación de propagación de daño en aspas**
- Sistemas de control aerodinámicos
- Electrónica de potencia y control electrónico
- Evaluación del desempeño
- Etc.

# Diseño y construcción de generadores para turbinas de pequeña escala (3kW, 10kW)

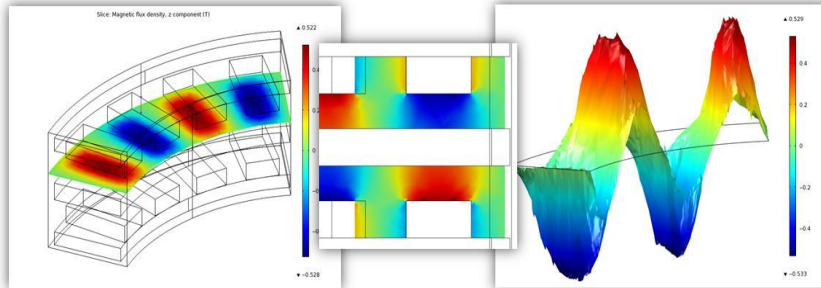
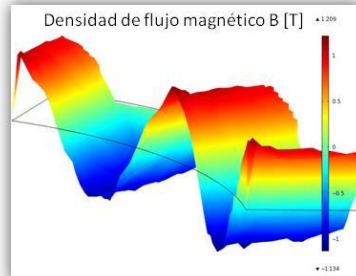
Topología de generadores



Sección a simular del generador

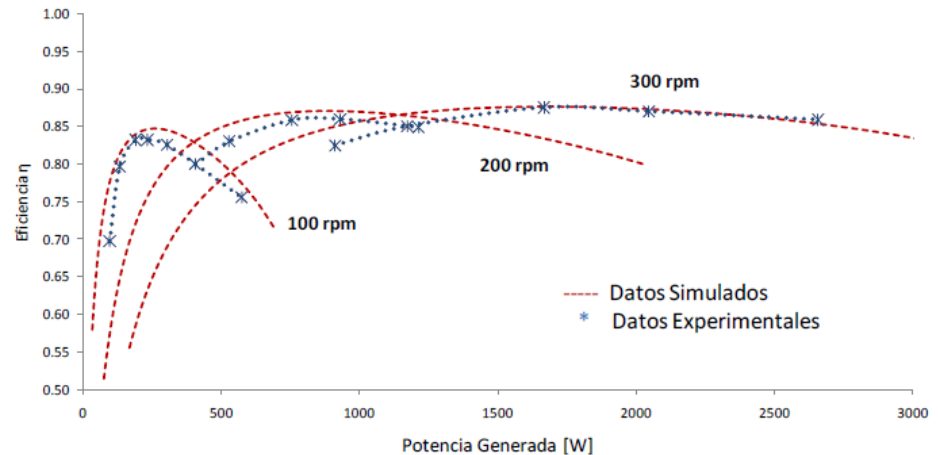
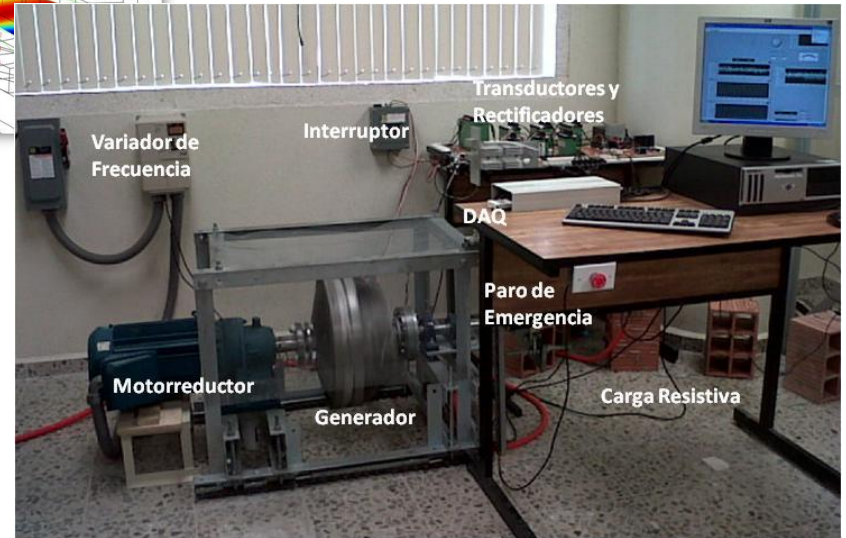


Densidad del campo magnético en el núcleo



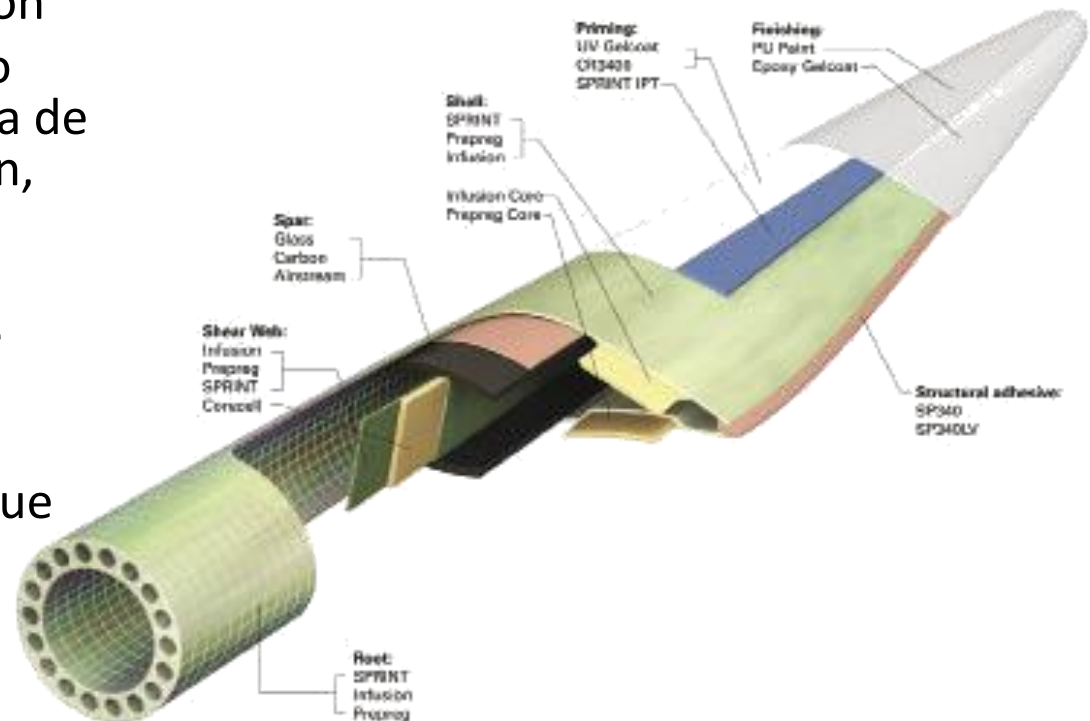
Densidad del campo magnético en la brecha de aire

Banco de pruebas

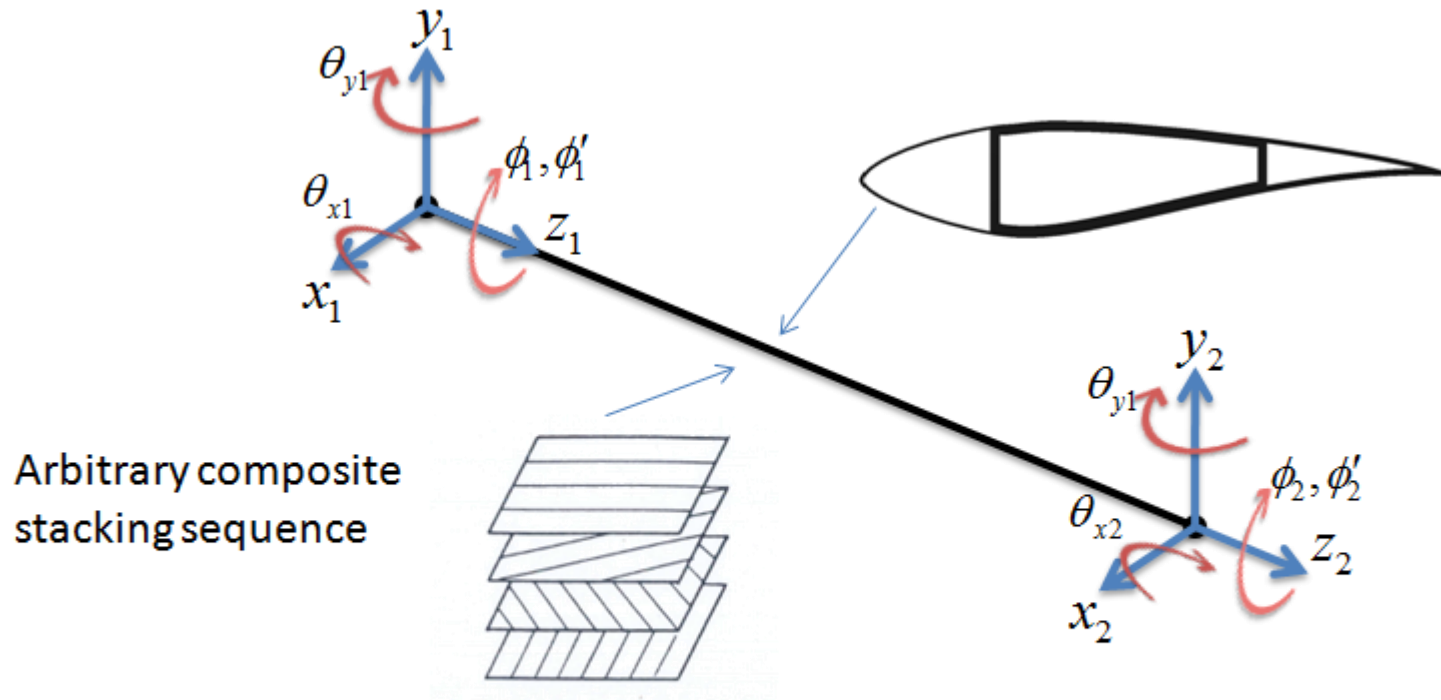


# Modelos de pared delgada (thin-walled beam = TWB)

- Secciones huecas de pared delgada con refuerzos internos
- Espesor variable a lo largo del perímetro de la sección
- Secuencia de apilamiento variable, donde cada capa de material tiene orientación, espesor y propiedades materiales arbitrarios
- Tratamiento detallado de alabeo
- Deformación en corto a través de la pared (enfoque de Timoshenko)



# TWB – Modelación de orden reducido



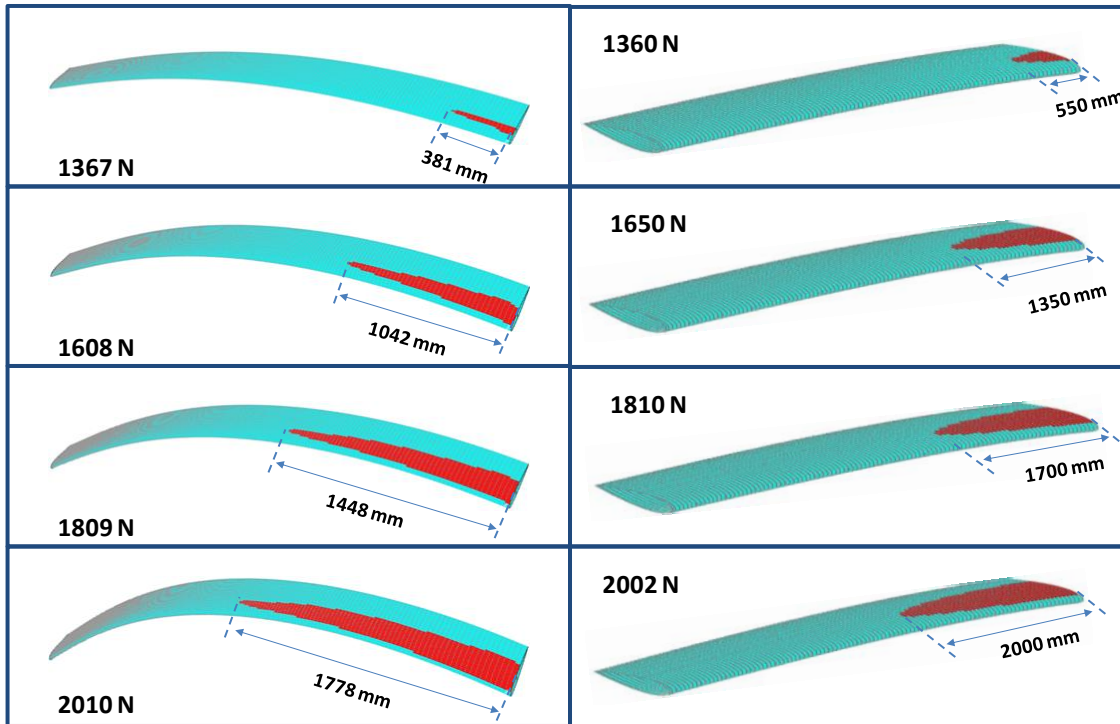
$\phi'$  ( $d\phi/dz$ ) indicates rate of change of the torsional angle, which might not be constant along the beam length.

# Progresión de daño para carga estática: Comparaciones topológicas

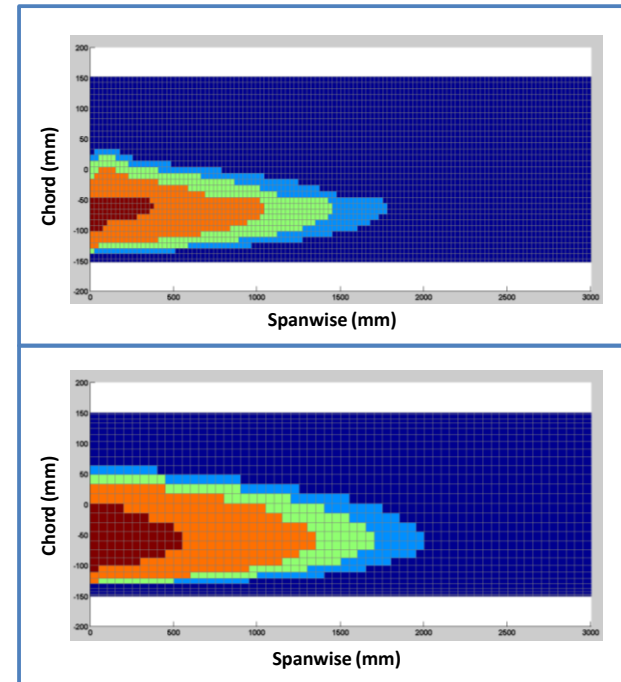
Shell Webbed  
Layer 4: 90°

TWB  
Layer 4: 90°

Mapas  
proyectados



Modelo tridimensional del aspa



Shell Webbed  
Layer 4: 90°  
1367 N  
1608 N  
1809 N  
2010 N

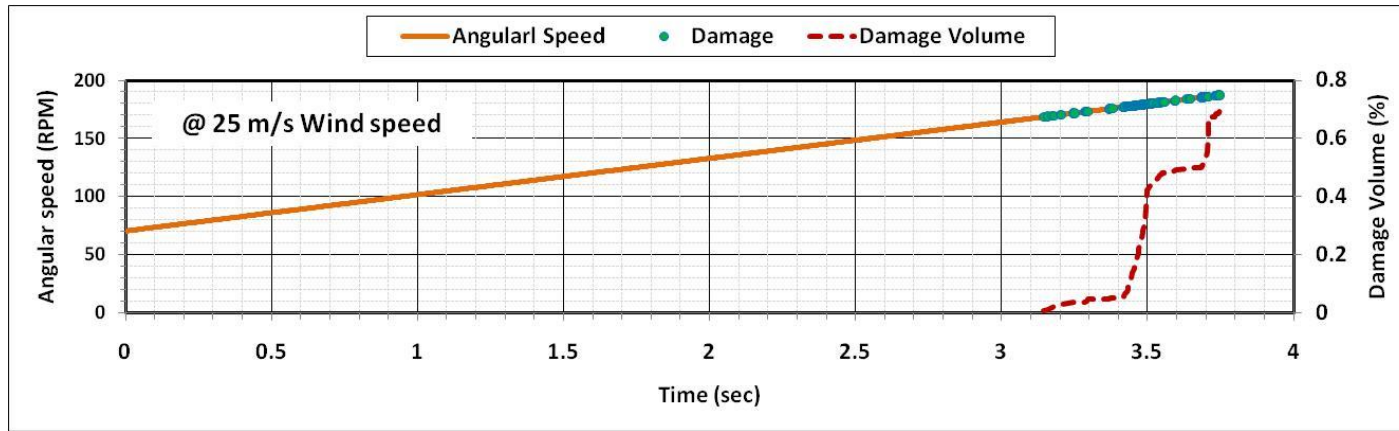
TWB  
Layer 4: 90°  
1360 N  
1650 N  
1810 N  
2002 N

Modelo tridimensional  
del aspa

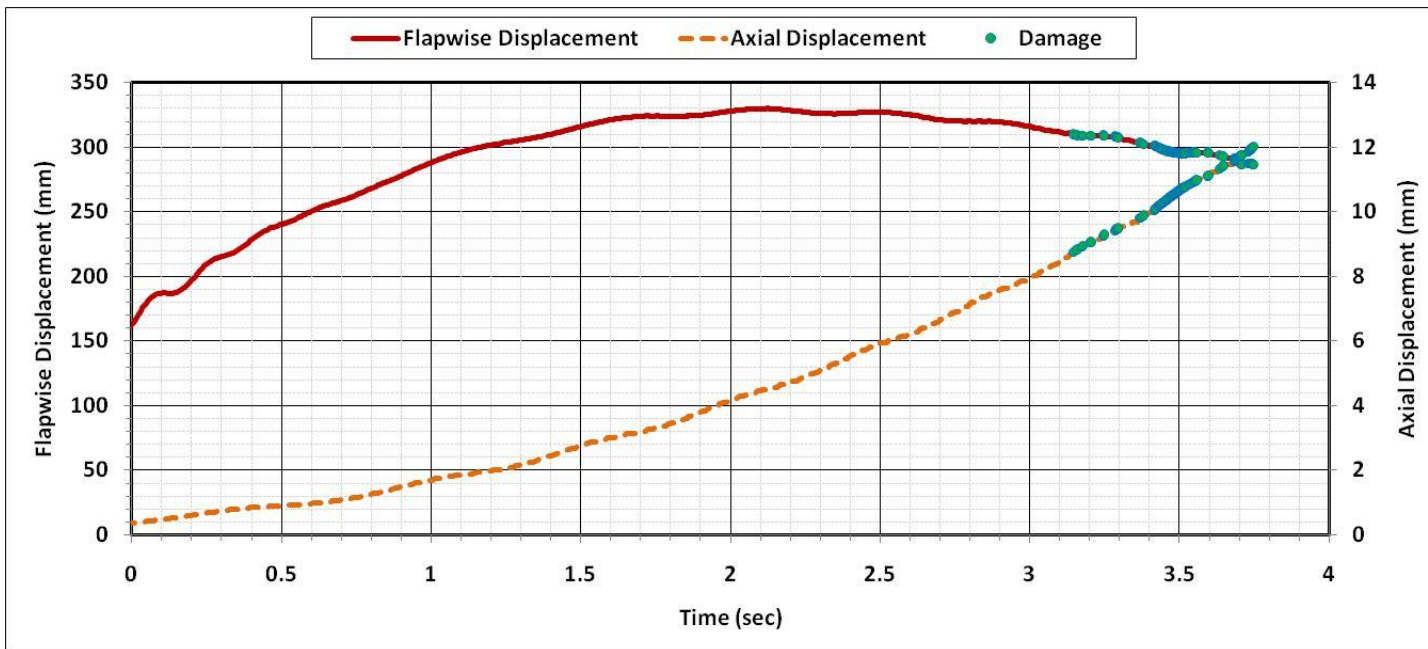
Modelo unidimensional  
equivalente

Modelo unidimensional  
equivalente

# Análisis de progresión de daño en condiciones dinámicas e interacción con el viento



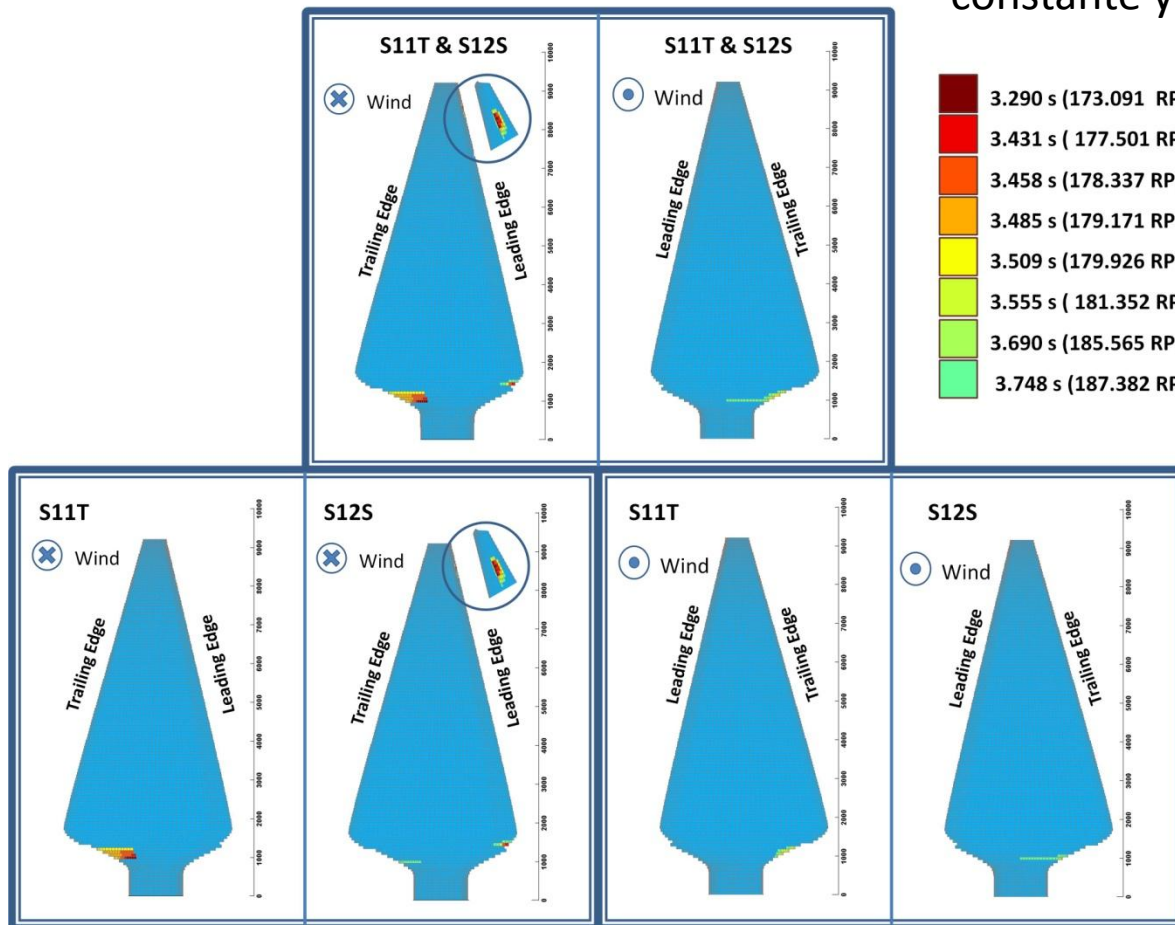
**Caso 3:** Velocidad de viento constante y pérdida de carga



# Análisis de progresión de daño en condiciones dinámicas e interacción con el viento

## PFA Layer 6 (Balsa)

**Caso 3:** Velocidad de viento constante y pérdida de carga



# ¡Muchas gracias!

## Contacto

- [oprobst@itesm.mx](mailto:oprobst@itesm.mx)
- [oliver.probst@gmail.com](mailto:oliver.probst@gmail.com)

## Programas de posgrado en el Tecnológico de Monterrey

- Maestría en Ingeniería Energética (MIE)
- Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI)



## Reviews

- State of the art and trends in wind resource assessment (*acceso libre*)
- Small wind turbine technology (*acceso libre*)