

# Pronósticos Operativos de Energía Eólica y Solar.

Congreso Internacional de Energía 14 Diciembre 2021 – U.N.I.  
Alejandro Gutiérrez Arce [aguti@fing.edu.uy](mailto:aguti@fing.edu.uy)



# Contenido

- 1 Transición energética y tecnológica.
- 2 Escalas de tiempo - Variabilidad.
- 3 Gestión del Sistema Eléctrico.

# Fuentes Renovables transiciones y escalas de tiempo.



ISS013E78960

# Centrales hidráulicas y térmicas. Sistemas eléctricos convencionales.

En las centrales térmicas podemos decidir cuando ponerlas en funcionamiento.

Las centrales hidroeléctricas podemos acumular energía dependiendo del embalse por días / semanas / meses.



# Las escalas de tiempo para gestionar los sistemas convencionales

La variabilidad más relevante en el corto plazo es la de la Demanda.



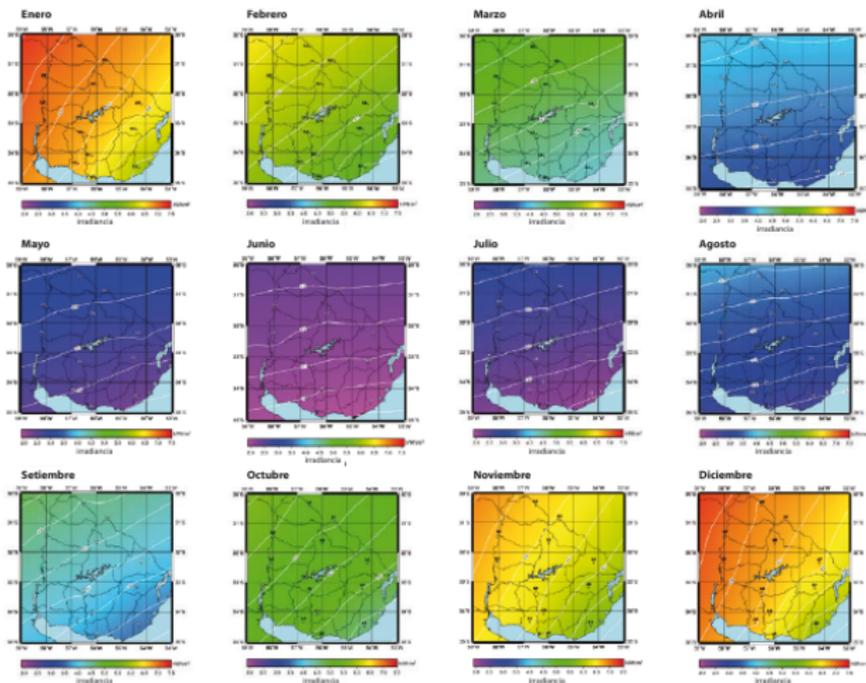
# Los sistemas en la región están pasando por transiciones.



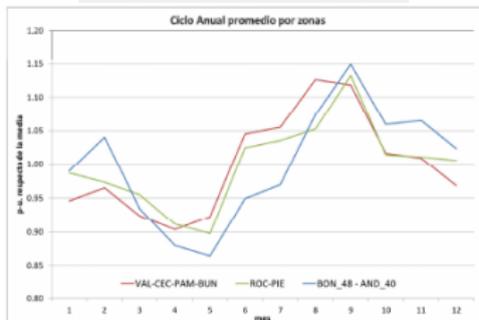
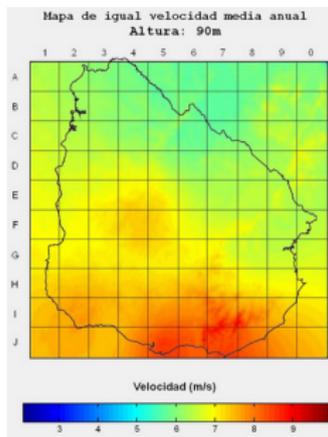
# Los sistemas en la región están pasando por transiciones.



# Recurso solar estacionalidad.



# Recurso Eólico estacionalidad.



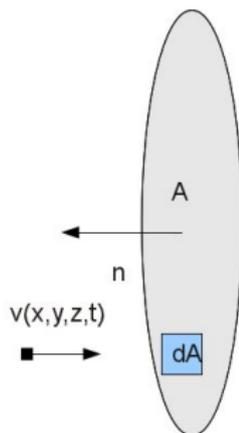
# Flujo de energía cinética $\longleftrightarrow$ Energía Eólica

$$dP = \frac{1}{2} \rho v^2 (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (1)$$

$$P = \int_A \frac{1}{2} \rho v^2 (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2)$$

$$E = \int_{\Delta t} \int_A \frac{1}{2} \rho v^2 (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA dt \quad (3)$$

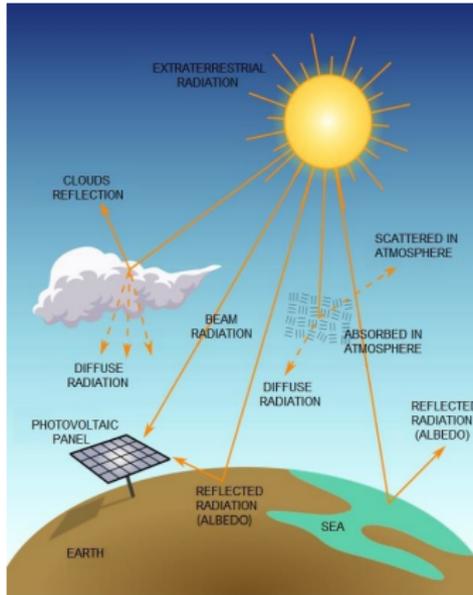
$$P_d = \frac{1}{2} \rho A \overline{\langle v^3 \rangle} \quad (4)$$



# Potencia instalada por fuente en Uruguay.

	Potencia Instalada
<b>TODAS LAS FUENTES</b>	
TOTAL EN SERVICIO:	4273.43 MW
TOTAL EN PRUEBAS:	180 MW
TOTAL EN DESARROLLO:	0.16 MW
<b>EOLICO</b>	
TOTAL EN SERVICIO:	1432.58 MW
<b>SOLAR</b>	
TOTAL EN SERVICIO:	237.74 MW
TOTAL EN DESARROLLO:	0.16 MW
<b>HIDRÁULICA</b>	
TOTAL EN SERVICIO:	1538 MW
<b>TÉRMICA / FÓSIL</b>	
TOTAL EN SERVICIO:	651.77 MW
TOTAL EN PRUEBAS:	180 MW
<b>BIOMASA</b>	
TOTAL EN SERVICIO:	413.34 MW

# Radiación Solar $\longleftrightarrow$ Energía Fotovoltaica.

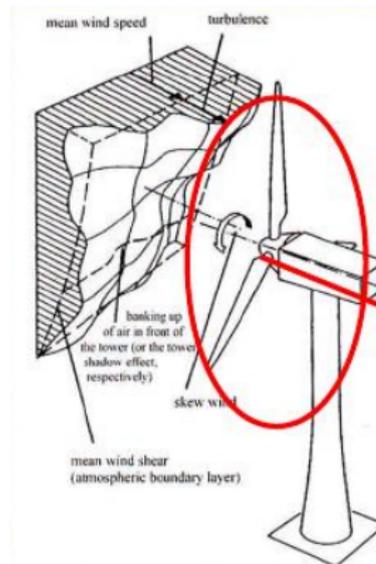


# CLA → Energía Eólica

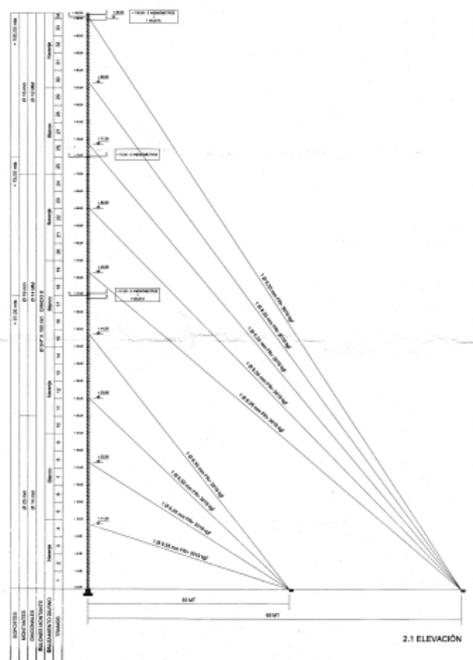
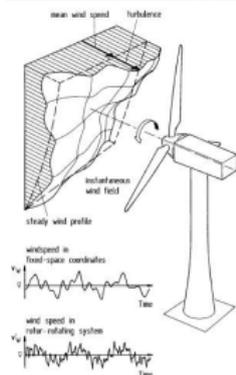
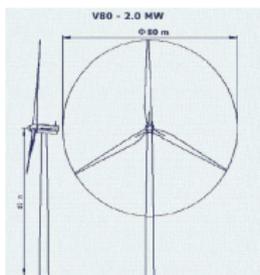
Importa describir el ciclo diario del perfil de velocidades en el area de barrido de palas de los aerogeneradores

Viento

$$\vec{V}(x, y, z, t), \text{ Estabilidad } \frac{\partial \theta}{\partial z}, \vec{V}^T(x, y, z, t), IT(t)$$

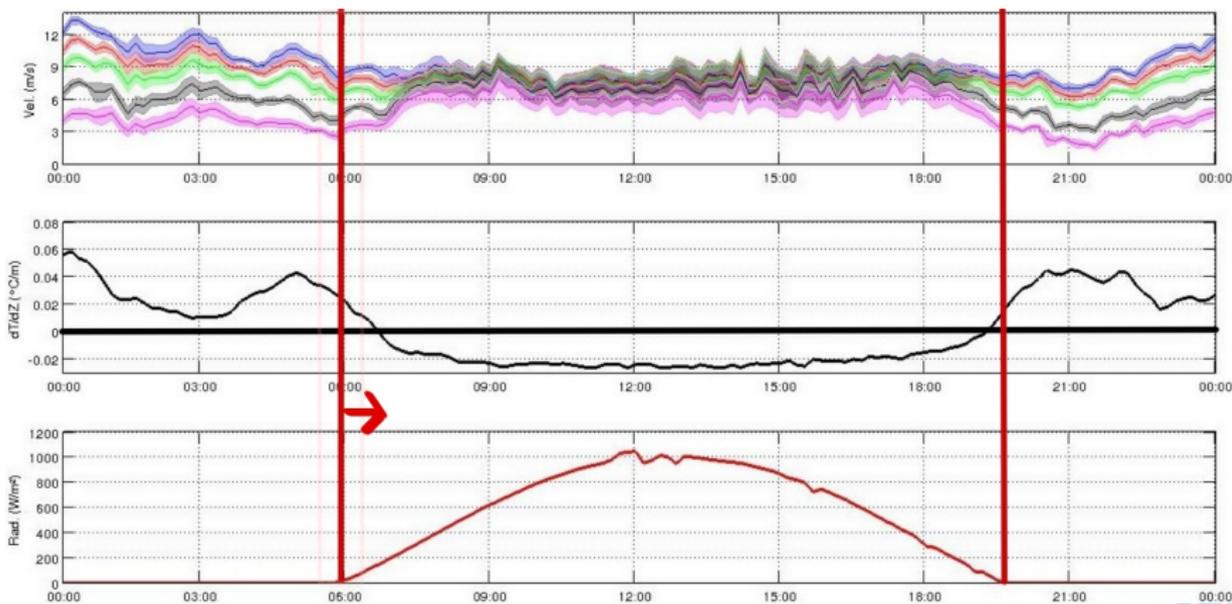


# Perfil de velocidades en altura ciclo diario

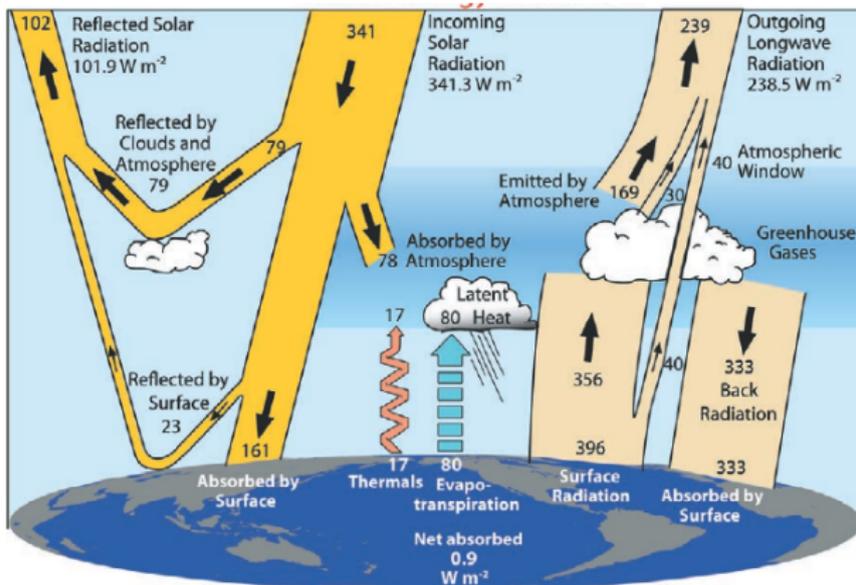


- Anemómetros: 101.8 m - 81.8 m - 60.8 m - 25.7 m - 10.1 m
- Termómetros: 100.8 m 3.4 m

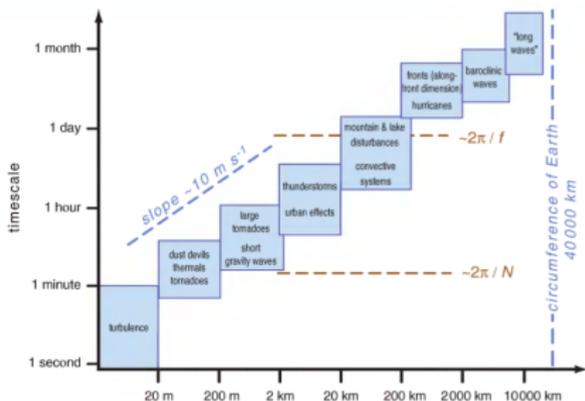
En el ciclo diario la energía Solar y Eólica se complementan.



# Atmósfera $\longleftrightarrow$ Modelos Numéricos



# Escalas. Espaciales - Temporales.



Orlanski (1975) micro  $\gamma$  scale | micro  $\beta$  scale | micro  $\alpha$  scale | meso  $\gamma$  scale | meso  $\beta$  scale | meso  $\alpha$  scale | macro  $\beta$  scale | macro  $\alpha$  scale

Fujita (1981) meso  $\alpha$  scale | meso  $\beta$  scale | meso  $\alpha$  scale | meso  $\beta$  scale | meso  $\alpha$  scale | meso  $\beta$  scale | meso  $\alpha$  scale

$$T = T_V + T_T; T_V = -\rho l + 2\mu D.$$

$$T_T = -\rho \begin{pmatrix} \frac{u' u'}{w' u'} & \frac{u' v'}{w' v'} & \frac{u' w'}{w' w'} \\ \frac{v' u'}{w' u'} & \frac{v' v'}{w' v'} & \frac{v' w'}{w' w'} \\ \frac{w' u'}{w' u'} & \frac{w' v'}{w' v'} & \frac{w' w'}{w' w'} \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \nabla T + \rho \vec{g} - 2(\vec{\Omega} \wedge \vec{V}) = \rho \frac{d\vec{V}}{dt}$$

- Componente vertical  $\bar{w} \approx 0$

$$\frac{d(w')}{dt} = \frac{\partial'_v}{\partial'_v} g - \frac{1}{\bar{p}} \frac{\partial p'}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2(w')}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2(w')}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2(w')}{\partial^2 z} \right)$$

- Componente horizontal:

$$U_g = -\frac{1}{f_C \bar{p}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y}; V_g = \frac{1}{f_C \bar{p}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = f_C (\bar{v} - V_g) - \frac{\partial (u' w')}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -f_C (\bar{u} - U_g) - \frac{\partial (v' w')}{\partial z}$$

$$f = 2\Omega \sin(\text{Lat}) = 2(2\pi / (24 * 3600)) \sin(33) = 7,9 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

Frecuencia de Brunt-Väisälä

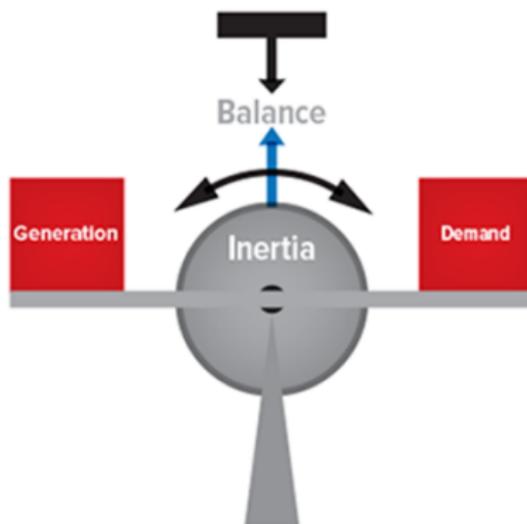
$$N = \left( \frac{g}{\Theta_v} \frac{d\Theta_v}{dz} \right)^{1/2} = \left( \frac{g}{\Theta_v} \frac{d\Theta_v}{dz} \right)^{1/2} = \left( \frac{9,8}{293} \frac{5}{100} \right)^{1/2} =$$

$$0,04 \text{ rad/s}$$

# Escalas de tiempo para la operación con información confiable cambian.

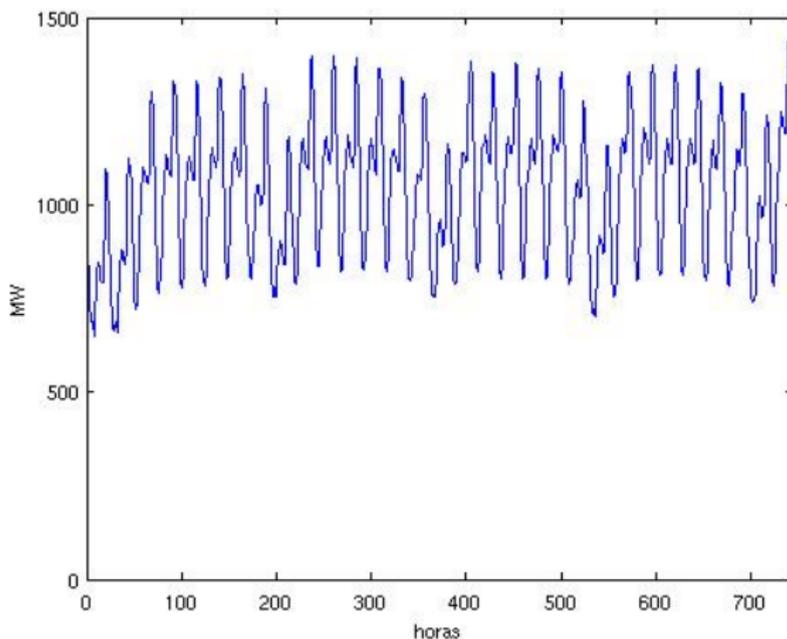


# Gestión del Sistema Eléctrico. → Necesario Equilibrio.



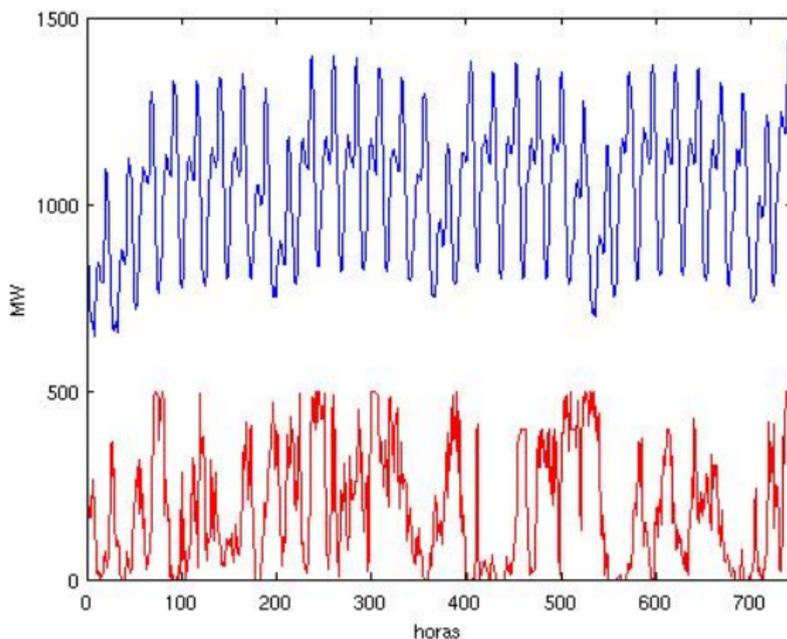
# Variación de la demanda

$$D(t) = P(t)$$

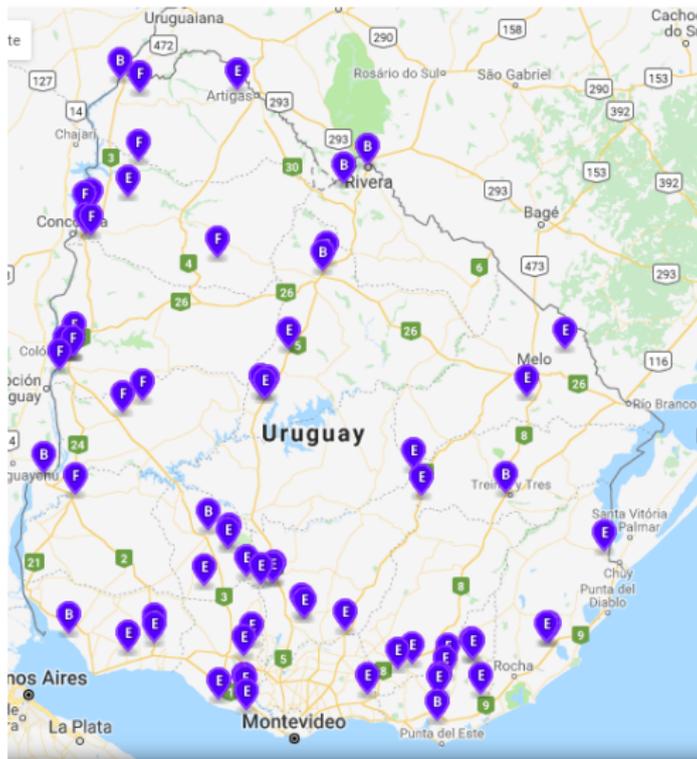


# Variación de la demanda y la producción eólica

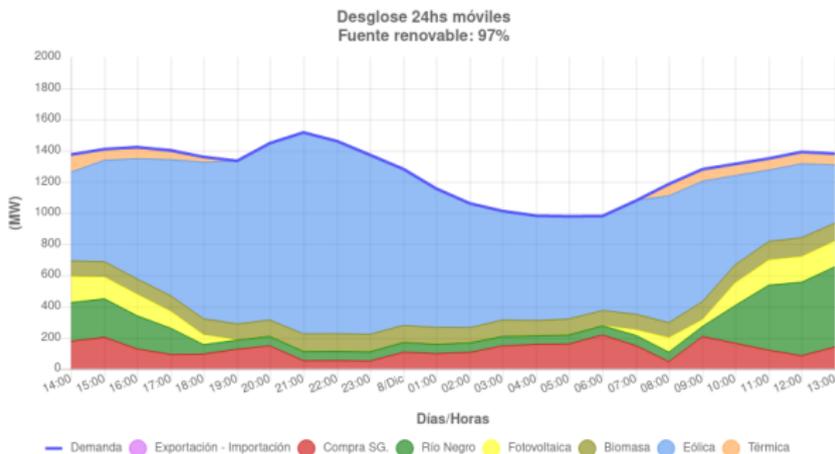
$$D(t) = P(t)$$



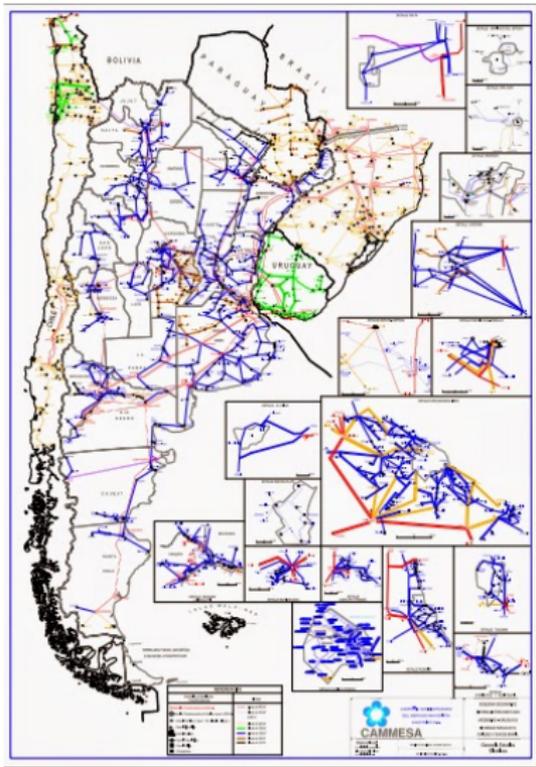
# Energías Renovables en Uruguay



# 8 Diciembre 2021 en Uruguay



# Energía eólica en el sistema eléctrico

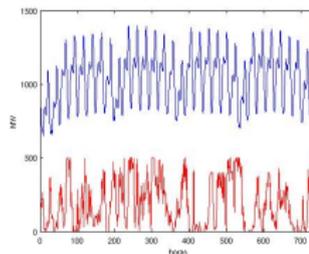


- Planificación de largo plazo asociada a decisiones de optimización de costos y seguridad de suministro.
- Planificación semestral
- Planificación semanal.
- Planificación diaria.
- Operación.

$$\zeta_{nominal} = \frac{C_{eolica}}{C_{total}} \quad (5)$$

$$\zeta_{instantanea} = \frac{p(t)_{eolica}}{p(t)_{total}} \quad (6)$$

$$\zeta_{energia} = \frac{E([t_j, t_f])_{eolica}}{E([t_j, t_f])_{total}} \quad (7)$$



$$\sigma_{neta}^2 = \sigma_{demanda}^2 + \sigma_{eolica}^2$$

OBJETIVO:  $\Downarrow \sigma_{eolica}$

# Herramientas de Pronóstico

## **Variables energéticas, velocidad, potencia.**

- Energía estacional (horizonte temporal de meses).
- **Despacho de Potencia (horizonte temporal de días).**
- **Operación del sistema eléctrico (horizonte temporal de horas).**
- Control de aerogenerador (escala de minutos).

# Formulación del problema de predicción

La predicción de una variable  $x$  realizada en un instante  $t$ , para un horizonte temporal de predicción  $k$ , se nota  $\hat{x}_{t+k|t}$  en el caso de que la variable de interés sea la potencia

$$\hat{p}_{t+k|t}.$$

El error en cada instante de tiempo  $t$  para cada horizonte temporal de predicción  $k$

$$e_t = p_{t+k} - \hat{p}_{t+k|t}$$

Los datos históricos, se usan para el entrenamiento, y pueden ser utilizados los mas cercanos en el tiempo para el pronóstico operativo

$$p_t, p_{t-1}, p_{t-2}, \dots, p_{t-m}, x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-m}$$

$$\hat{p}_{t+k|t} = f(p_t, p_{t-1}, p_{t-2}, \dots, p_{t-m}, x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-m}, \hat{x}_{t+k|t})$$



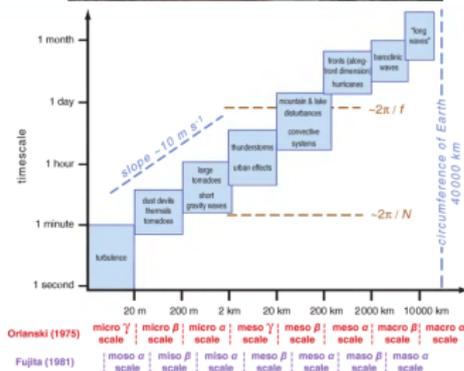
# Formulación del problema de predicción

- ¿Qué grado de precisión se necesita?
- ¿Cuál es el horizonte temporal que interesa?
- ¿Qué nivel de costo de la herramienta es admitido por el caso de análisis y de aplicación?
- ¿Qué información se tiene disponible?



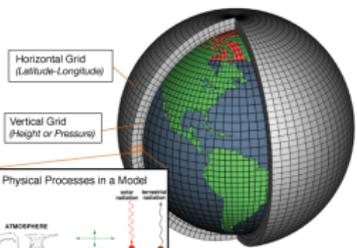
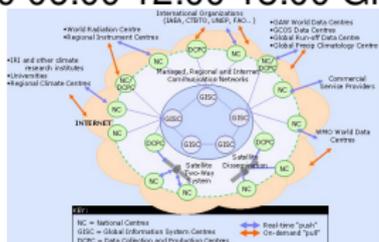
# Formulación de modelos de predicción

- De muy corta duración. Estadísticos, Inteligencia Artificial, Downcasting, imágenes satelitales, radar. **Operación del sistema eléctrico, horizonte temporal de horas**
- De corta duración. Se basan en la resolución numérica de los procesos físicos, modelos GCM y modelos de mesoescala, en el postprocesamiento Inteligencia Artificial. **Despacho de Potencia, horizonte temporal de días.**



# Pronósticos basados en modelos Numéricos de Mesoescala.

00:00 06:00 12:00 18:00 GMT

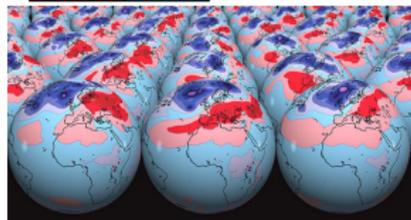
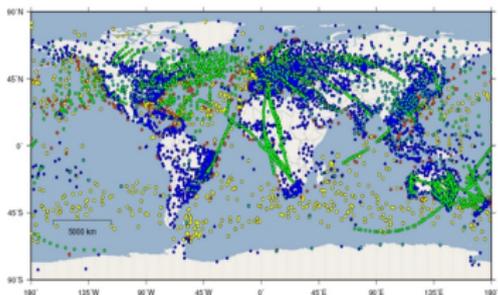


**DADOS CONVENCIONAIS ASSIMILADOS - CPTEC/INPE**

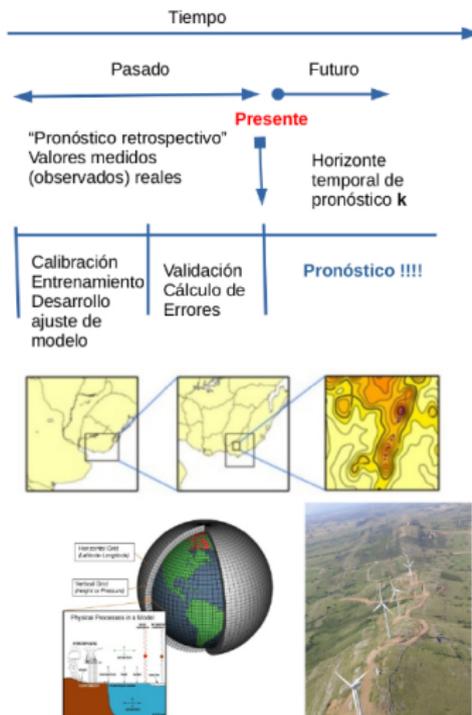
Data: 2011031500

Total de Observações = 20436

● OBS. DE RADIOSONDA = 15965	● NAVICS - ALT. GEOPOTENCIAL = 487	● AVIÕES - VENTO = 292
● SYNOP - ALT. GEOPOTENCIAL = 3169	● BÓIAS - ALT. GEOPOTENCIAL = 193	● TOTAL = 20436



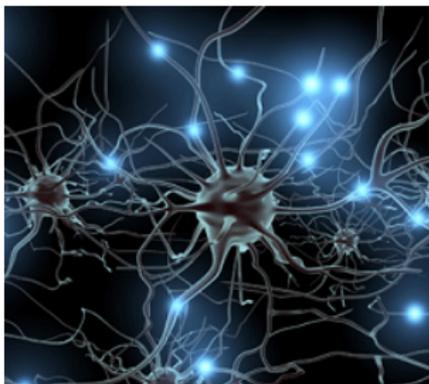
# Entrena/Calibrar Modelos para luego pronósticar.



# Redes Neuronales Artificiales

- Las RNA están inspiradas en las redes neuronales biológicas.
- Para la aplicación de las RNA se debe contar con datos de alta calidad, las RNA se entrenan con los datos históricos

$p_t, p_{t-1}, p_{t-2}, \dots, p_{t-m}, X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-m}$



# Redes Neuronales Artificiales

- $x_j$  son las variables de entrada
- $w_{kj}$  son los pesos que se ajustan durante el entrenamiento, para cada neurona  $k$  y variable  $j$

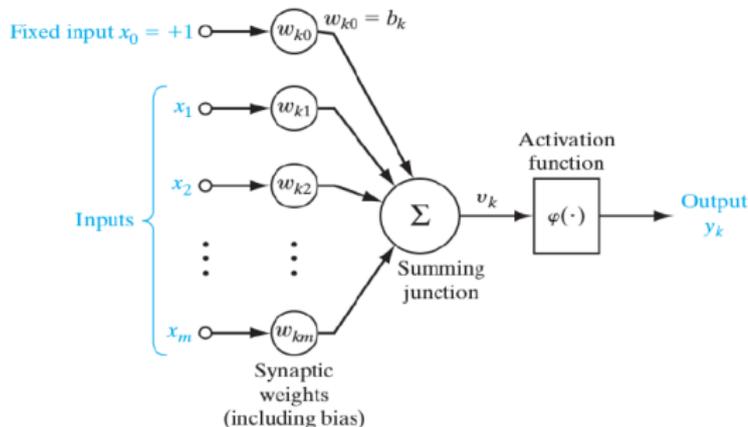
- para cada neurona  $k$  se hace la suma del peso de cada variable de entrada

$$u_k = \sum_{j=1}^{j=m} x_j w_{kj}$$

- se agrega en cada neurona una corrección del bias,

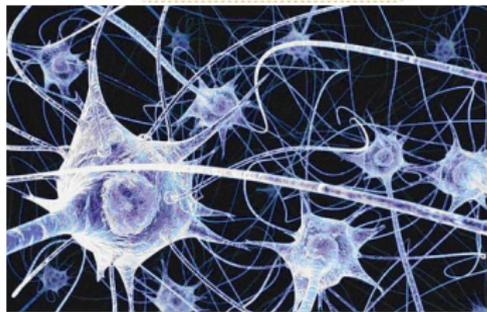
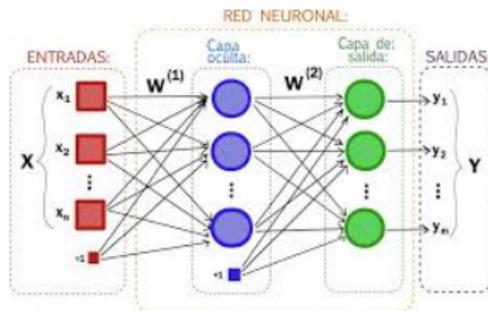
$$v_k = u_k + b_k$$

- a  $v_k$  se le aplica la función de activación  $\varphi(v_k)$

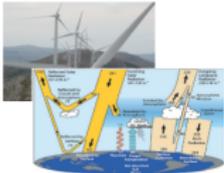
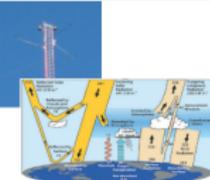
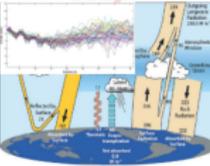
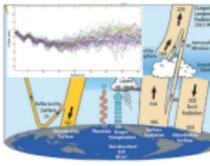


# Redes Neuronales Artificiales

- Ejemplo de una red multicapa
- Durante el entrenamiento el algoritmo que generalmente se utiliza es el algoritmo de retropropagación.
- Los datos deben ser de alta calidad, las RNA se entrenan con los datos históricos  $p_t, \dots, p_{t-m}, x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-m}$ , tanto de las variables de salida como de las variables de entrada.



# Pronósticos y horizontes de tiempo.

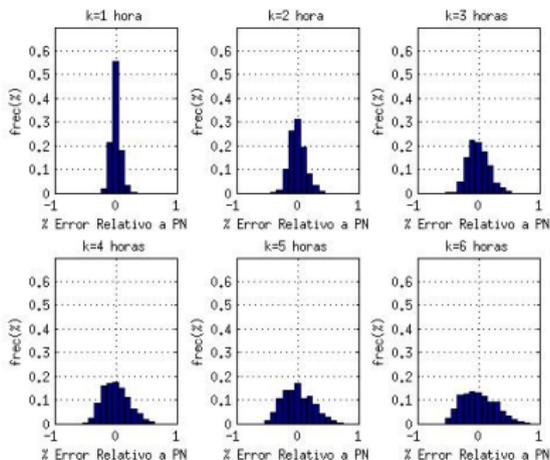
Horizonte de tiempo del pronóstico	Hasta 6 horas $k=[1, 6]$	Hasta 12 horas $k=[7, 12]$	Hasta 72 horas $k=[13, 72]$	Hasta 240 horas $k=[73, 240]$
Herramienta	Medidas de potencia real asimiladas en modelos de circulación atmosférica de mesoescala	Velocidad en torres asimilada combinada con modelos de circulación atmosférica de mesoescala	Modelos de circulación atmosférica de mesoescala	Modelos de circulación atmosférica de mesoescala
Frecuencia de disponibilidad posible	Cada una hora	Cada 6 horas	Cada 6 horas	Una vez al día aunque es posible cada 6 horas
Calidad / Complejidad / Incertidumbre	Calidad alta si las potencias se transmiten en tiempo real sin errores. Algoritmo simple. Incertidumbre aprox 1 al 5 %	Calidad alta si las velocidades de viento se transmiten en tiempo real sin errores. Algoritmo más complejo. Incertidumbre aprox 5 %	Calidad alta incide fuertemente una corrida o múltiples corridas. Se necesita aplicar la técnica de nudging $\rightarrow$ escalas sinópticas. Los modelos de post-porcaramiento pueden ser basados en fundamentos físicos o puramente estadísticos (ej redes neuronales). Incertidumbre aprox 10 a 20 %	Calidad baja incide fuertemente una corrida o múltiples corridas. Se necesita aplicar la técnica de nudging $\rightarrow$ escalas sinópticas. Los modelos de post-porcaramiento pueden ser basados en fundamentos físicos o puramente estadísticos (ej redes neuronales). Incertidumbre aprox 20 a 60 %
				

# Modelos de muy corta duración -> Modelo de Persistencia

Donde  $\hat{P}(t + k|t)$  es la potencia que se pronostica se inyectara en el instante  $t + k$ , siendo  $P(t)$  la potencia que se esta inyectando en el instante  $t$ .

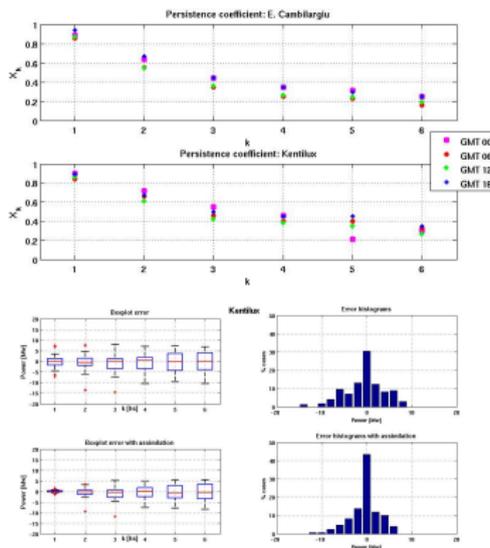
$$\hat{P}(t + k|t) = P(t) \quad (8)$$

Producción eólica inyectada a la rojo en Uruguay correspondiente a 652 MW durante enero de 2016.

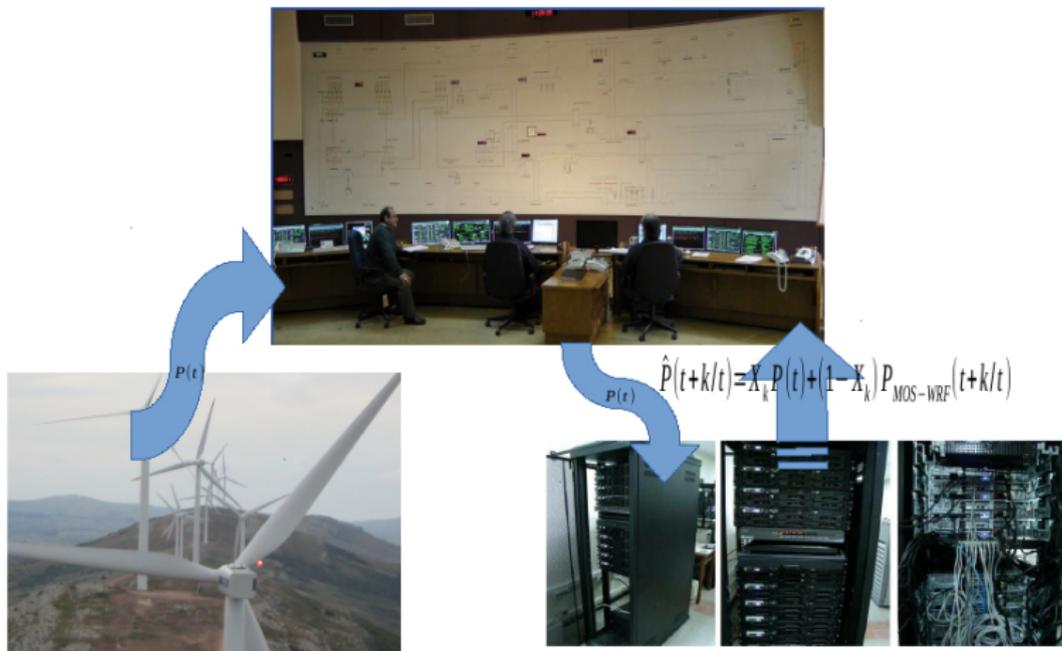


# Horizonte de pronóstico hasta 6 horas.

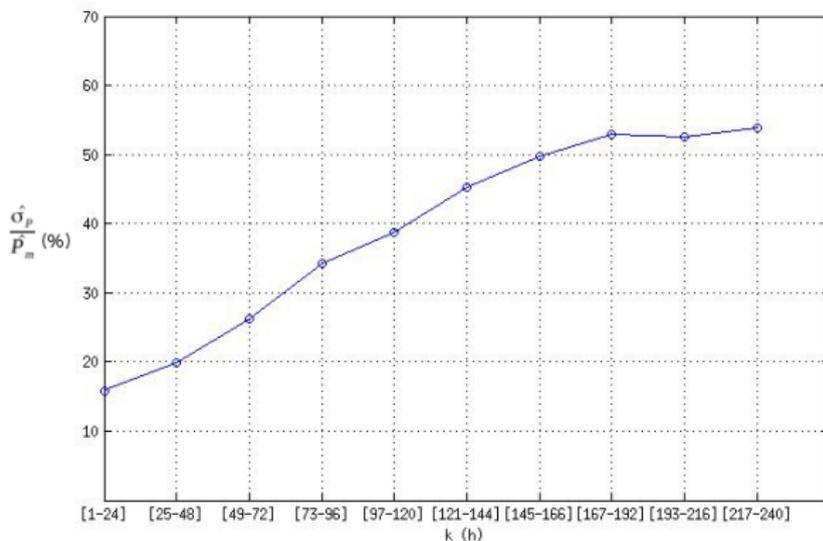
$$\hat{P}(t + k|t) = X_k P(t) + (1 - X_k) P_{num-atmos}(t + k|t)$$



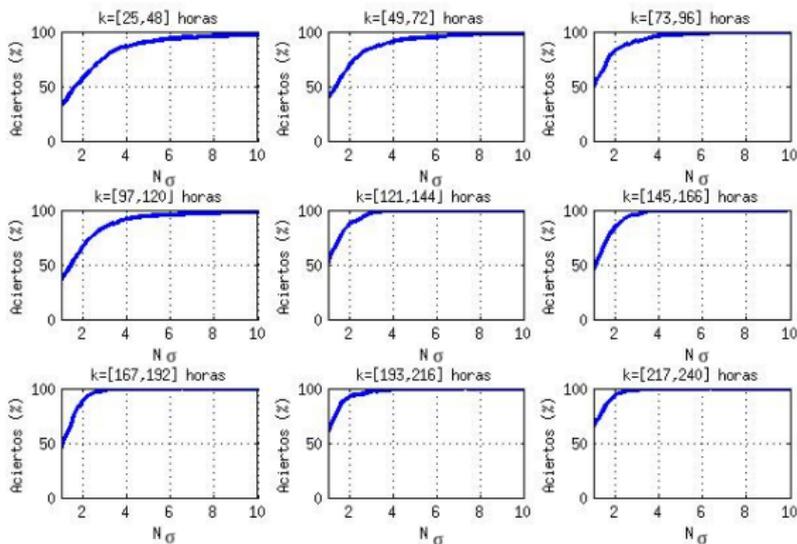
Horizonte de pronóstico hasta 6 horas, considerar la potencia real  $P(t)$ .



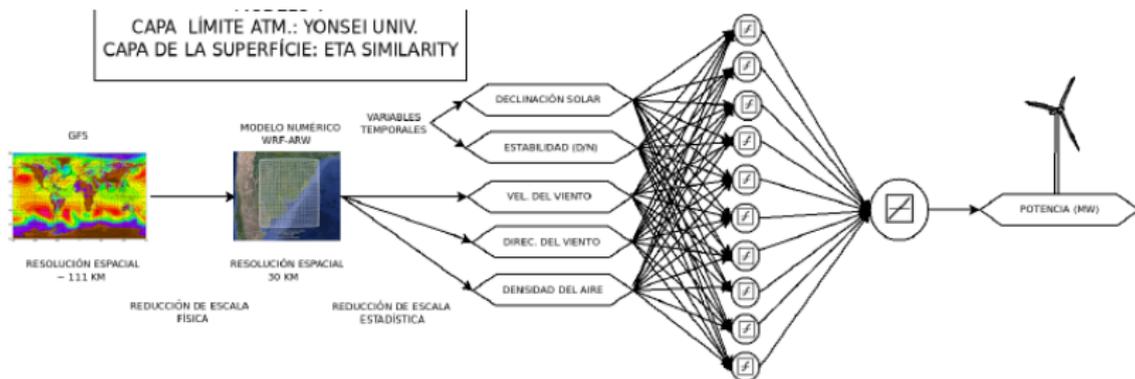
# Dispersión entre corridas Vs horizonte de tiempo



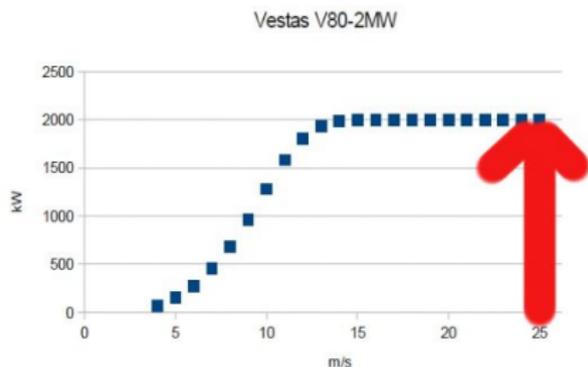
# Metodología - Intervalos de confianza $\implies N_{\sigma}$ .



# Modelo en base a RNA (de Almeida).

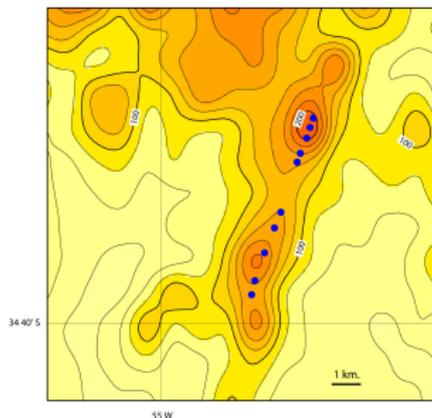


# Eventos de desconexión por velocidad de corte velocidad CUT-OUT



# Emanuelle Cambilargiu.

Emanuelle Cambilargiu 20 MW —» 10 Vestas V80, 2MW



# Características de los eventos

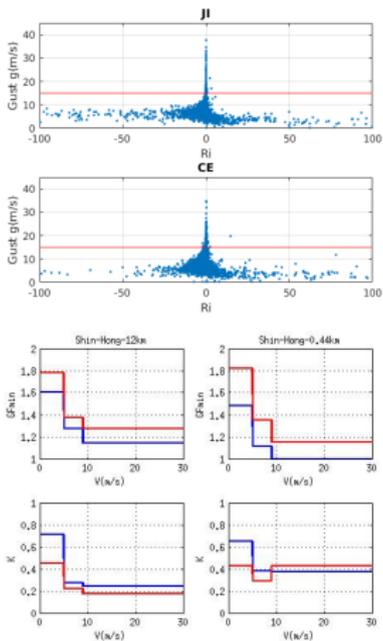
Emanuelle Cambilargiu 20 MW → 10 Vestas V80, 2MW

Unit	Detected	Device acknowledged	Reset/Run	Duration	Event
AG07	07/12/2012 00:22	07/12/2012 02:04	07/12/2012 02:04	1:41:46	event 014
AG10	07/12/2012 00:37	07/12/2012 01:54	07/12/2012 01:54	1:17:41	event 014
AG09	07/12/2012 00:40	07/12/2012 00:40	07/12/2012 01:59	1:19:14	event 014
AG01	07/12/2012 00:48	07/12/2012 02:18	07/12/2012 02:18	1:29:19	event 014
AG04	07/12/2012 00:51	07/12/2012 02:16	07/12/2012 02:16	1:24:13	event 014
AG08	07/12/2012 00:53	07/12/2012 02:02	07/12/2012 02:02	1:09:00	event 014
AG02	07/12/2012 01:01	07/12/2012 02:16	07/12/2012 02:16	1:15:11	event 014
AG03	07/12/2012 01:11	07/12/2012 02:05	07/12/2012 02:05	0:53:55	event 014
AG05	07/12/2012 01:14	07/12/2012 02:00	07/12/2012 02:00	0:46:34	event 014
AG02	16/12/2012 15:51	16/12/2012 16:00	16/12/2012 16:00	0:09:14	event 015
AG10	25/12/2012 04:56	25/12/2012 05:01	25/12/2012 05:02	0:05:11	event 016
AG10	25/12/2012 05:20	25/12/2012 05:25	25/12/2012 05:25	0:05:35	event 016
AG04	31/12/2012 16:33	31/12/2012 16:49	31/12/2012 16:49	0:16:26	event 017
AG03	31/12/2012 16:33	31/12/2012 16:51	31/12/2012 16:51	0:17:08	event 017
AG02	31/12/2012 16:34	31/12/2012 16:51	31/12/2012 16:51	0:17:04	event 017
AG10	31/12/2012 16:34	31/12/2012 16:55	31/12/2012 16:55	0:21:15	event 017
AG09	31/12/2012 16:34	31/12/2012 16:56	31/12/2012 16:57	0:23:33	event 017
AG01	31/12/2012 16:34	31/12/2012 16:51	31/12/2012 16:51	0:17:31	event 017
AG06	31/12/2012 16:34	31/12/2012 16:35	31/12/2012 16:53	0:19:12	event 017
AG08	31/12/2012 16:34	31/12/2012 16:52	31/12/2012 16:53	0:18:37	event 017
AG07	31/12/2012 16:34	31/12/2012 16:35	31/12/2012 16:49	0:14:46	event 017
AG05	31/12/2012 16:34	31/12/2012 16:49	31/12/2012 16:50	0:15:30	event 017
AG06	31/12/2012 16:35	31/12/2012 16:53	31/12/2012 16:53	0:18:04	event 017
AG07	31/12/2012 16:35	31/12/2012 16:49	31/12/2012 16:49	0:13:35	event 017



# Parametrización de ráfagas ✓

(Gutiérrez y Fovell 2018) el modelo es una parametrización de ráfagas con un enfoque general, la ráfaga calculada en cada paso del tiempo en el experimento numérico.

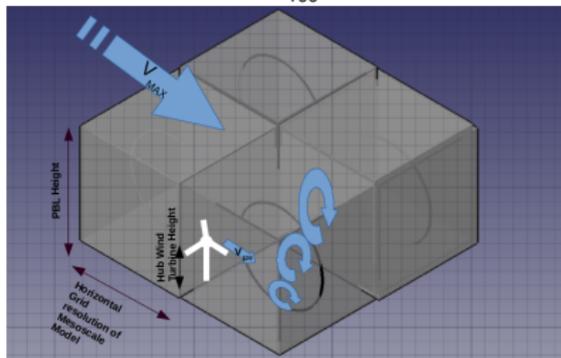


$$\Delta V^{Top} = \max(0, (V_{MAX} - V_{100}))$$

$$GF = GF_{min} + K \frac{\Delta V^{Top}}{V_{100}}$$

If  $(GF_{min} V_{100} + K \Delta V^{Top}) > 11,5 \text{ m/s}$  and  $(-0,5 < Ri < 0,5)$

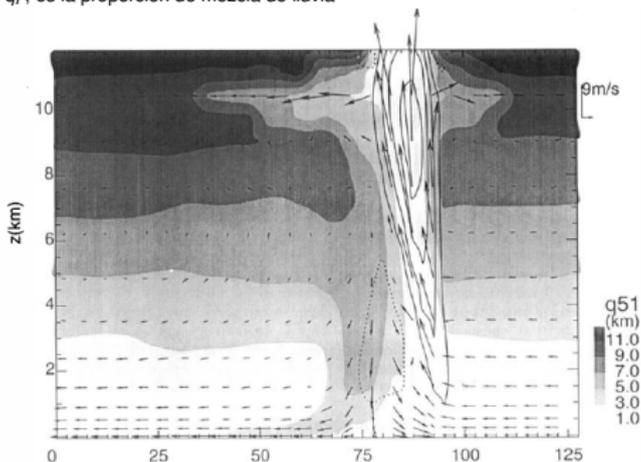
$$GF = S_{Ri} (GF_{min} + K \frac{\Delta V^{Top}}{V_{100}})$$



# (Nakamura et al., 1996) Ráfagas tormentas convectivas

$$V_{gust} = \sqrt{\alpha \int_0^H 2g \left( \frac{\theta}{\theta} + q_r \right) dz + \beta V(H)^2}$$

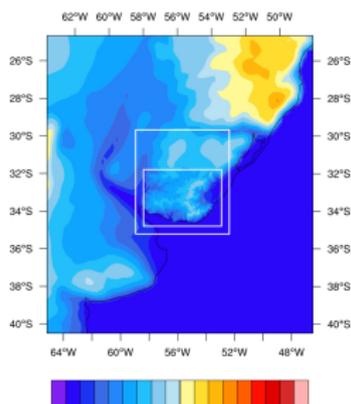
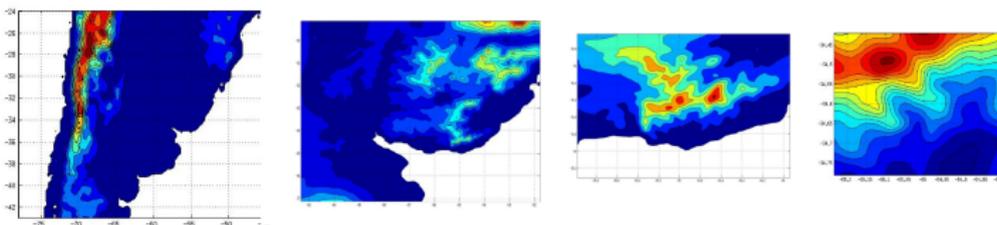
Modelo de ráfagas para tormentas por convección, una masa  $m$  a una altura  $H$  que está a punto de formar parte de una corriente descendente convectiva. La masa se moverá horizontalmente con la velocidad  $V(H)$ , con una energía cinética inicial  $\frac{1}{2} mV(H)^2$ . La precipitación que cae en la parcela puede evaporarse (o derretirse), haciendo que la parcela se enfríe, y esto junto con el efecto de carga de la precipitación en sí misma le da flotabilidad negativa a la parcela, haciendo que se acelere hacia abajo. Dada la fuerza descendente en el esquema es  $mg\Delta\theta/\theta + mgq_r$ , donde  $\Delta\theta$  es el déficit de temperatura potencial en la corriente descendente,  $\theta$  es la temperatura potencial de los alrededores, y  $q_r$ , es la proporción de mezcla de lluvia



# WRF-Ráfaga—> Pronóstico de Desconexión

A medida que aumenta la resolución aumenta el costo computacional.

WRF » 4 dominios d01 30 km, d02 10 km, d03 3.3 km, d04 1.1 km.



# Aguyje UNI

