

Tecnologías emergentes para Energías Renovables

Eólica Urbana

José Cataldo

24 de junio y 26 de julio

Proyecto presentado al Fondo Sectorial de Energía de la ANII

Integración del grupo de trabajo

Facultad de Ingeniería

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental

Instituto de Ingeniería Eléctrica

Facultad de Arquitectura

Taller Perdomo

Instituto de la Construcción

Explotación del recurso eólico



Elevada Velocidad del viento
Elevado recurso energético

Baja turbulencia
Bajas solicitaciones
Elevados rendimientos

Disponibilidad de espacio
Localización
Potencia instalada

Parques Eólicos



Ambientes rurales
Condiciones similares

Localización
Dimensionamiento





Tecnologías semejantes



Explotación en ambientes urbanos



Recurso en ambientes urbanos

Baja velocidad de viento

Bajo recurso

Elevada turbulencia

Elevadas solicitaciones

Bajos rendimientos

Instalación en un sitio dado

Interferencia de edificios

Afectación del entorno

Emisiones acústicas

Sombras

Impacto visual

Desafíos

Evaluar el recurso

Herramientas – Descripción de flujos turbulentos

Evaluar la viabilidad

Instalación en un sitio dado

Interacciones

Personas

Edificios

Tecnología

Desarrollo

¿Escalamiento?

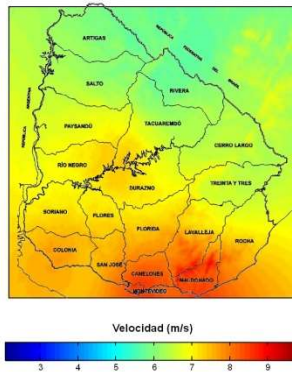
Evaluar calidad

Ensayos - condiciones

Factibilidad

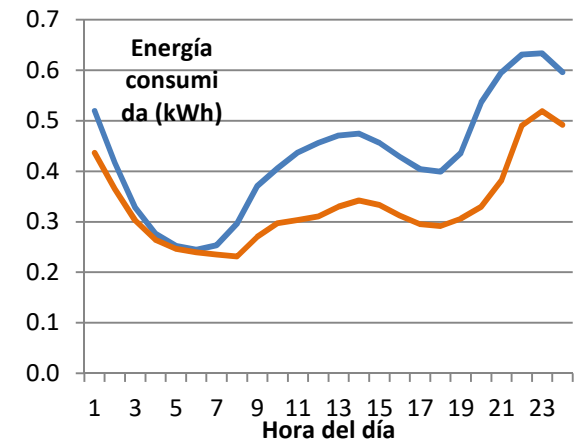
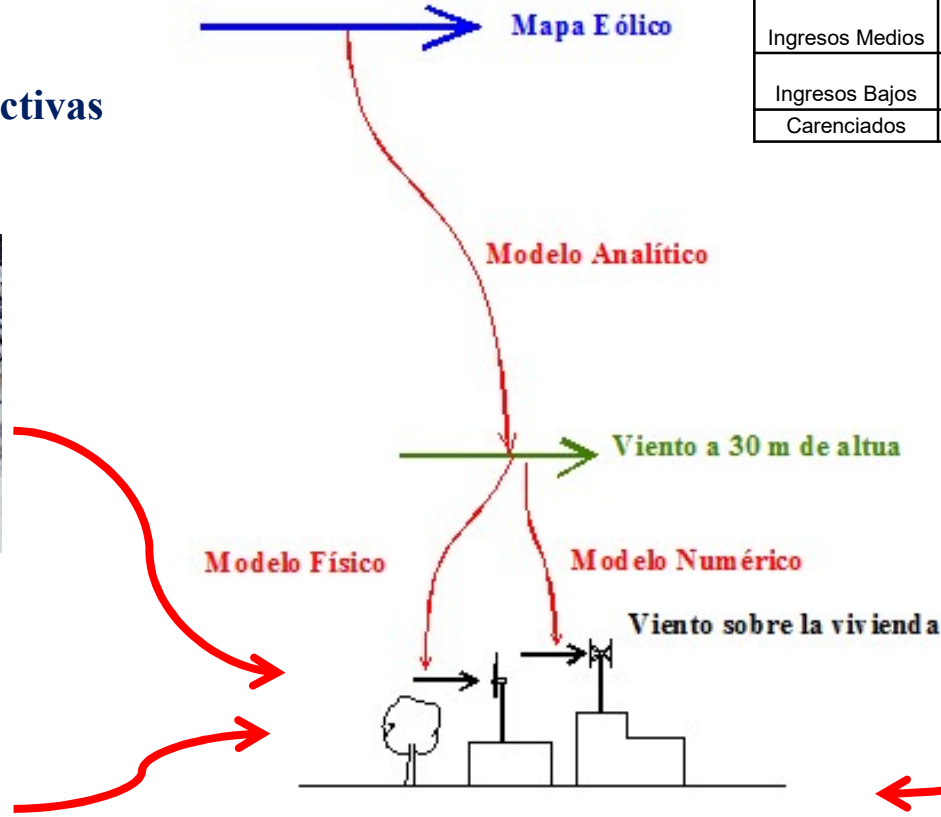
Regulación

Costos

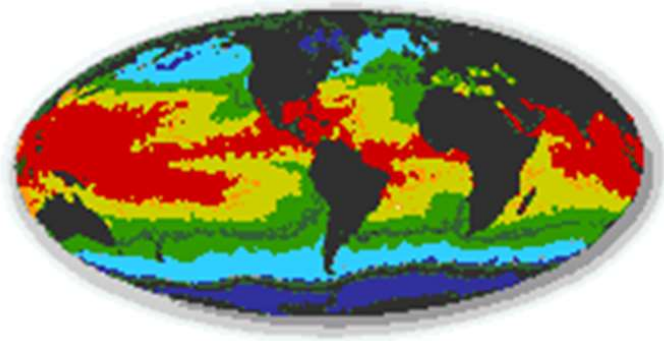


Estrato	Leña (tep/hogar)	E. Eléctrica (tep/hogar)	Supergas (tep/hogar)	GNL (tep/hogar)
Ingresos Altos	0,255	0,666	0,121	0,175
Ingresos Medios	0,106	0,285	0,089	0,02
Ingresos Bajos	0,164	0,142	0,065	0
Carenciados	0,22	0,248	0,07	0

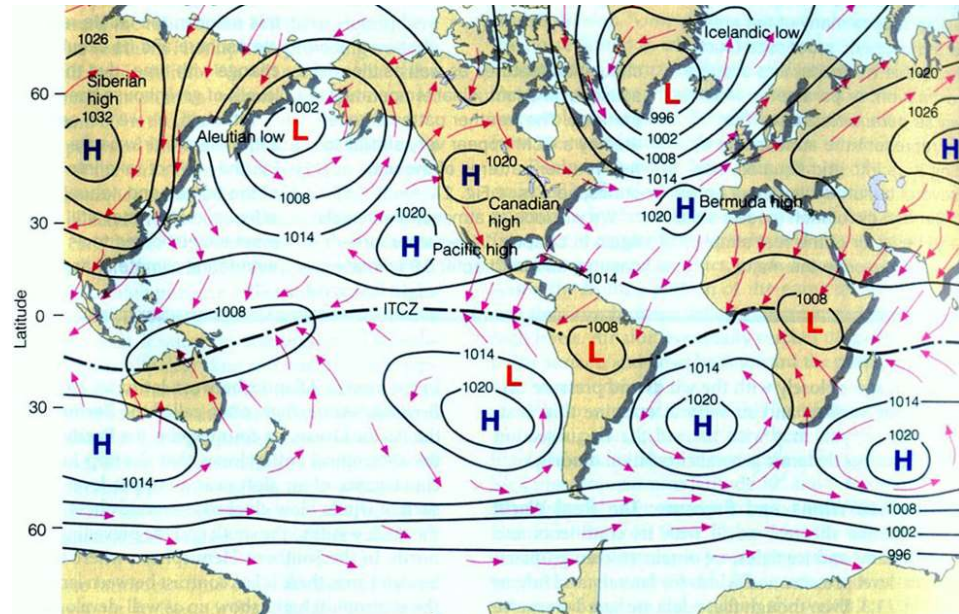
Tipologías constructivas y entorno



Recurso Eólico



- Calentamiento diferencial
- Campo de presiones
- Rotación de la Tierra

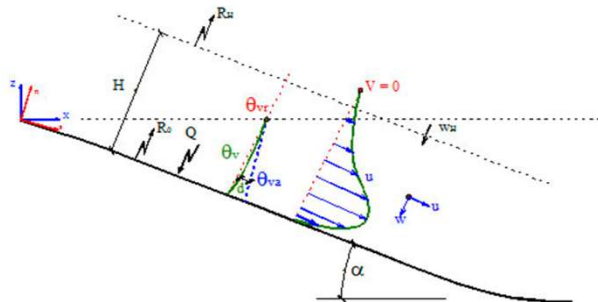
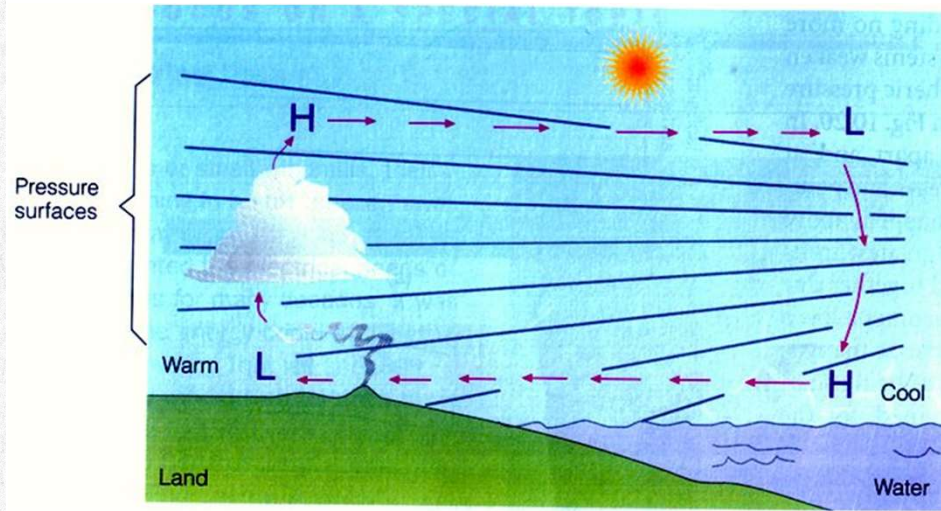
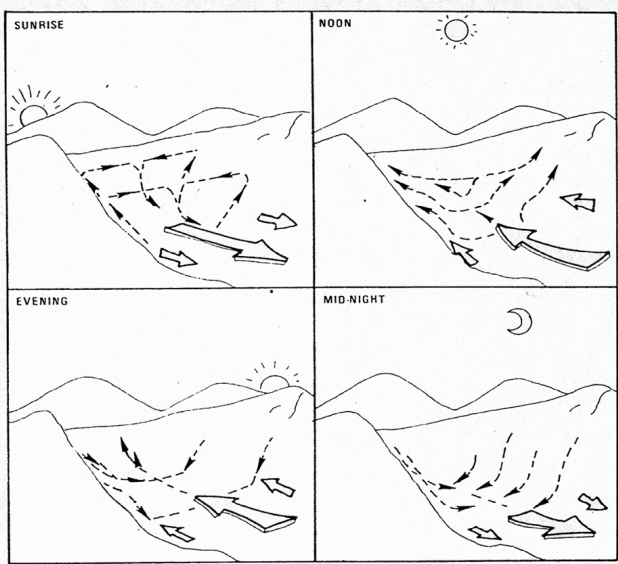


Viento

Factores sinópticos

Escala Sinóptica
1000 km
Días o semanas

Factores Meso-Escala

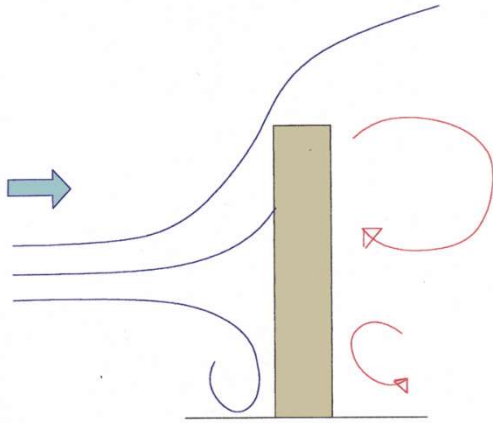


100km
horas a días

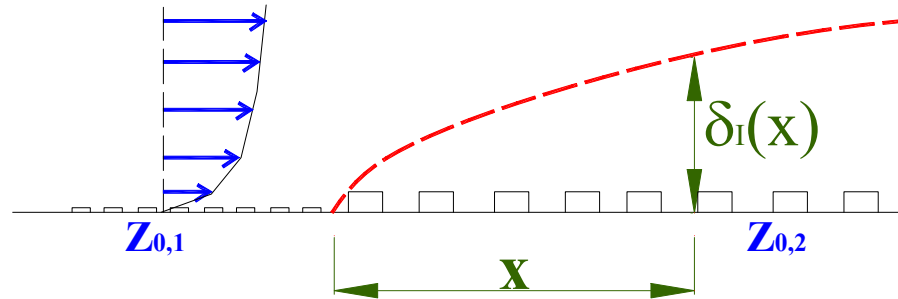
- Sucesión - Factores Sinóptico y Meso-Escala
- Evolución de variables meteorológicas
 - Velocidad y dirección de viento
 - Temperatura
 - Nubosidad
 - Humedad Relativa
 - Establece clima en una zona

Factores Micro-Escala

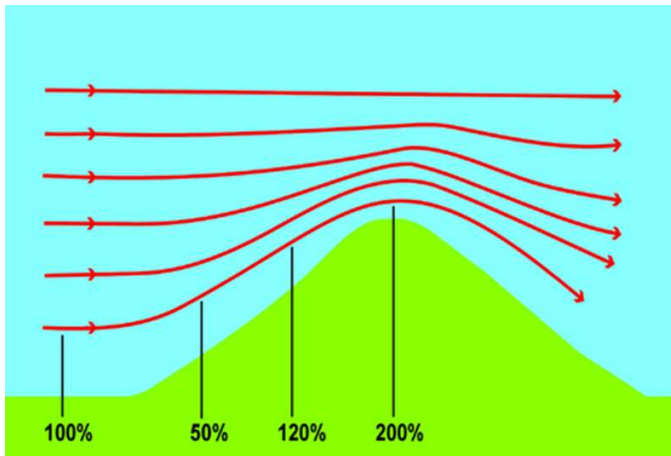
10km
Minutos a horas



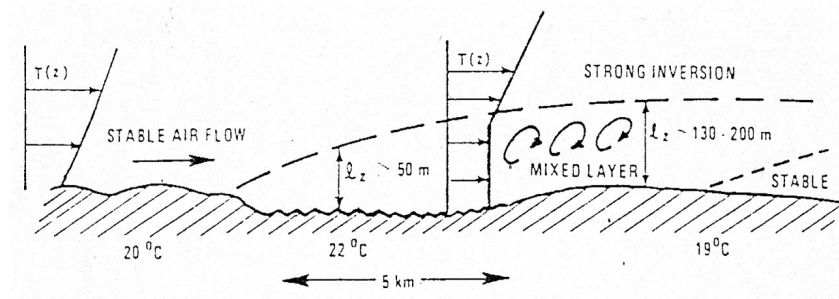
Interacción entre viento y estructuras



Cambio de rugosidad del suelo



Efecto de la topografía



Cambio de temperatura del suelo

Factores Micro Meteorológicos

Reducción de velocidad – Incremento de turbulencia

Efecto de disipa corriente abajo

Difícil de generalizar

Factores significativos

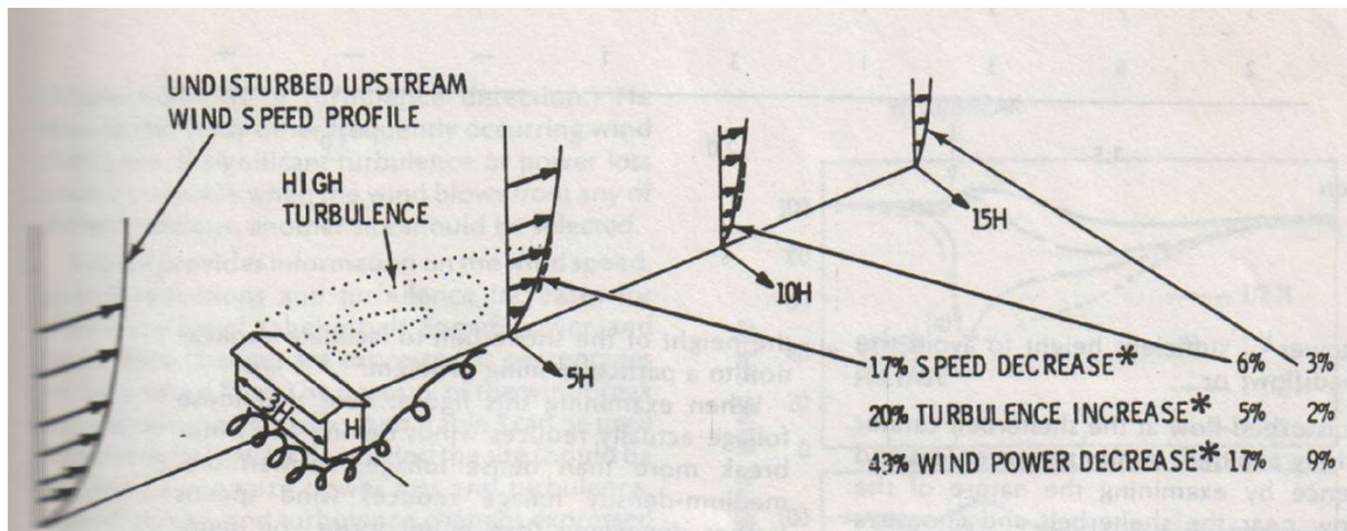
Geometría - Forma

Dimensiones

Distribución en planta

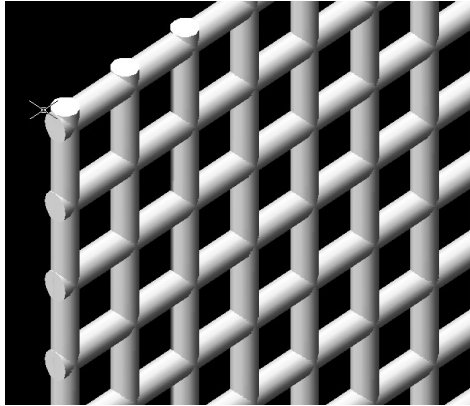
¿Aislado?

Características del flujo incidente

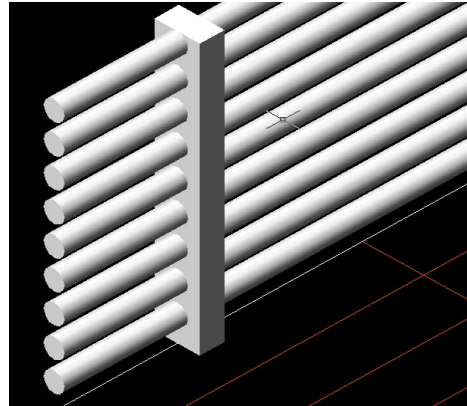


Mallas analizadas

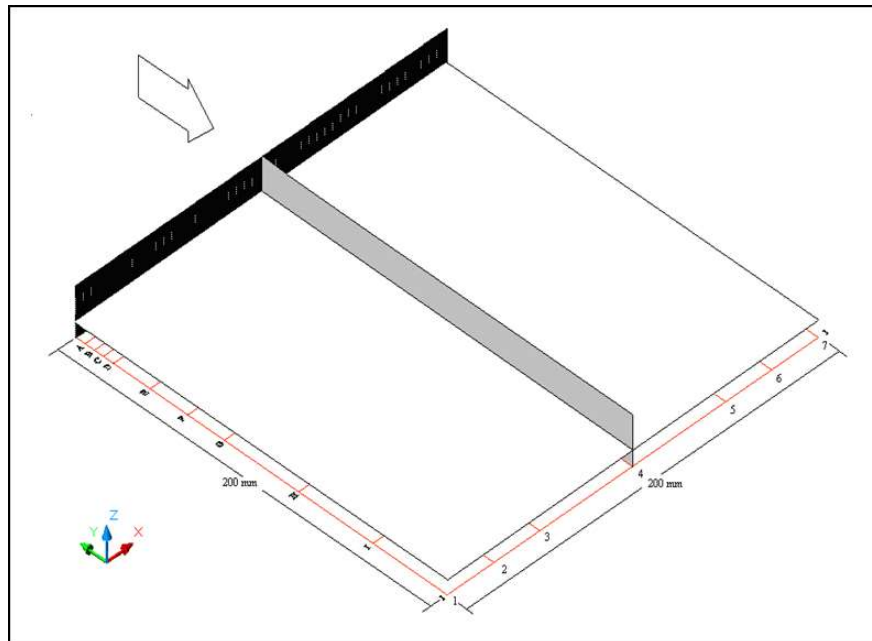
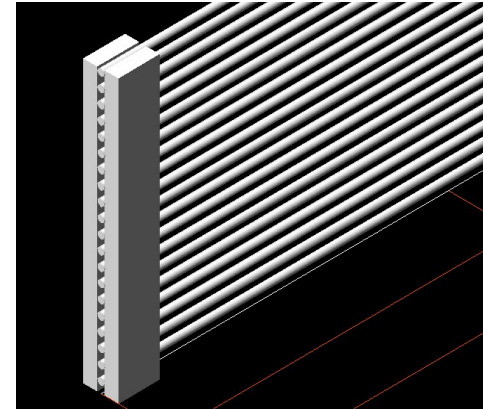
Malla 1
Solidez 54%



Malla 2
Solidez 63%



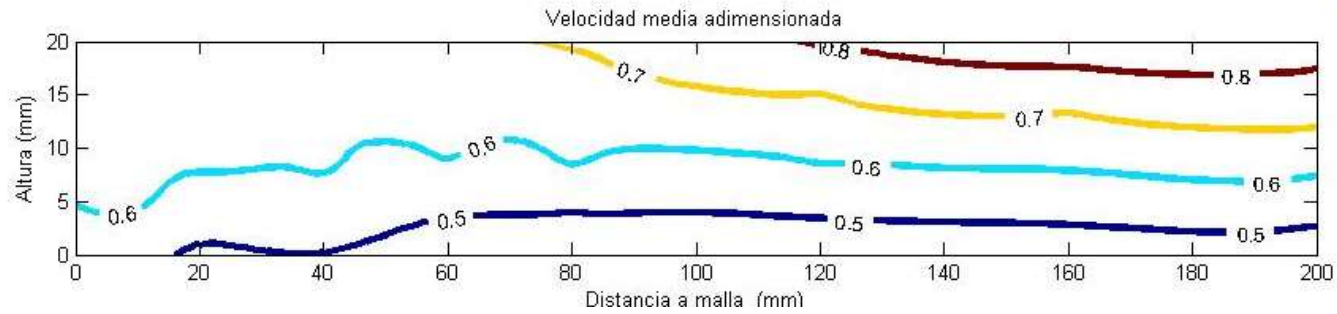
Malla 3
Solidez 50%



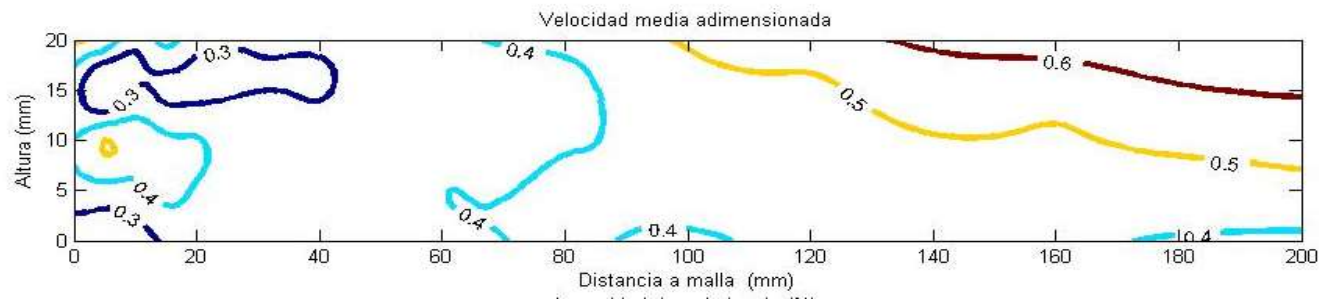
Altura 20 mm

Velocidad media en el plano central

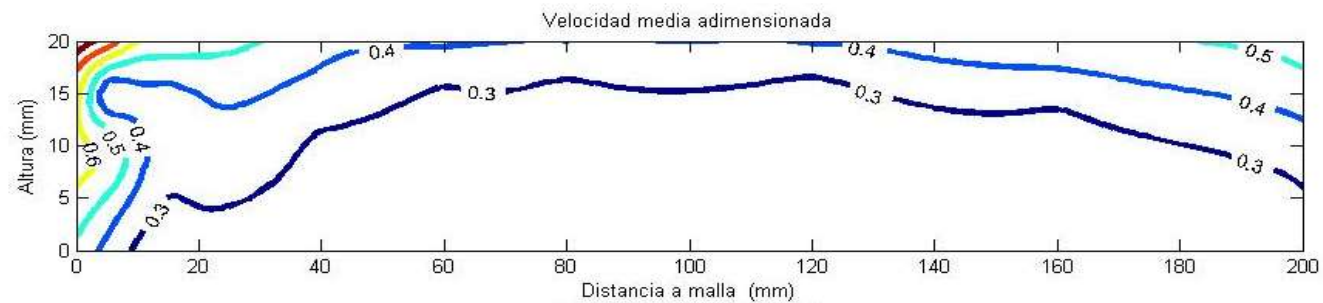
Malla 1



Malla 2



Malla 3



Ambiente urbano

Combinación de efectos

Edificios

Parques arbolados

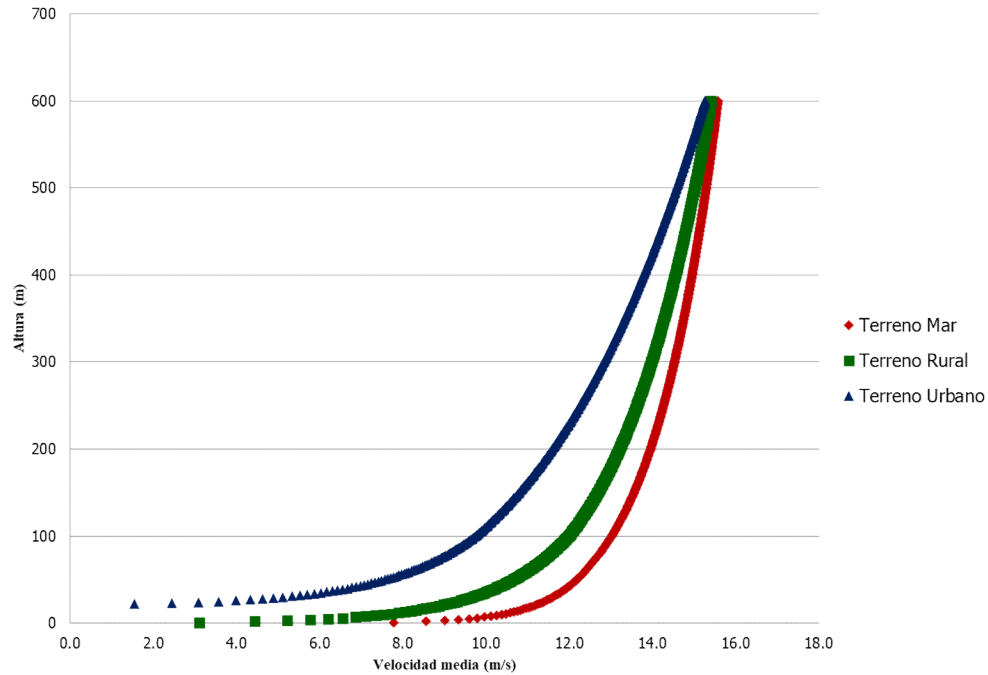
Zonas costeras

Obstáculos no aislados

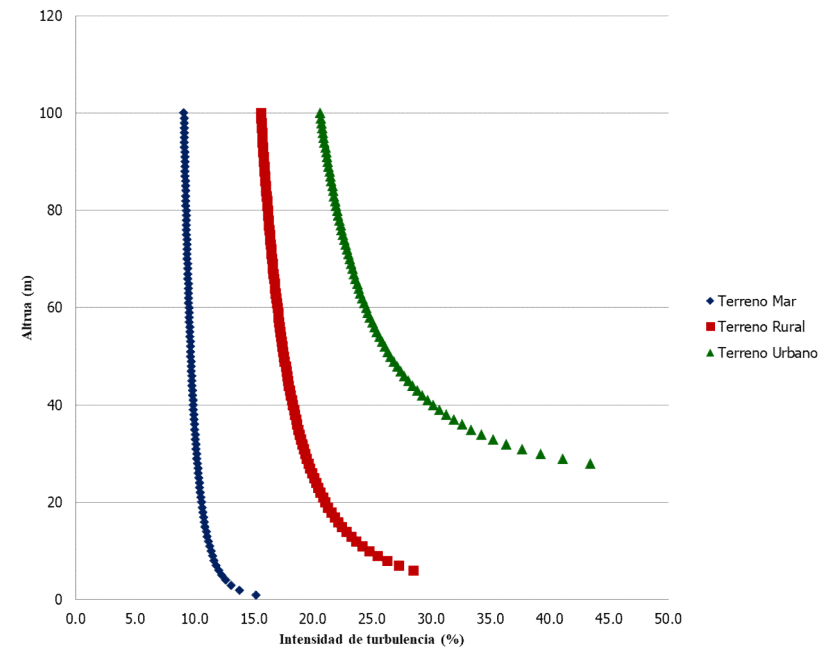


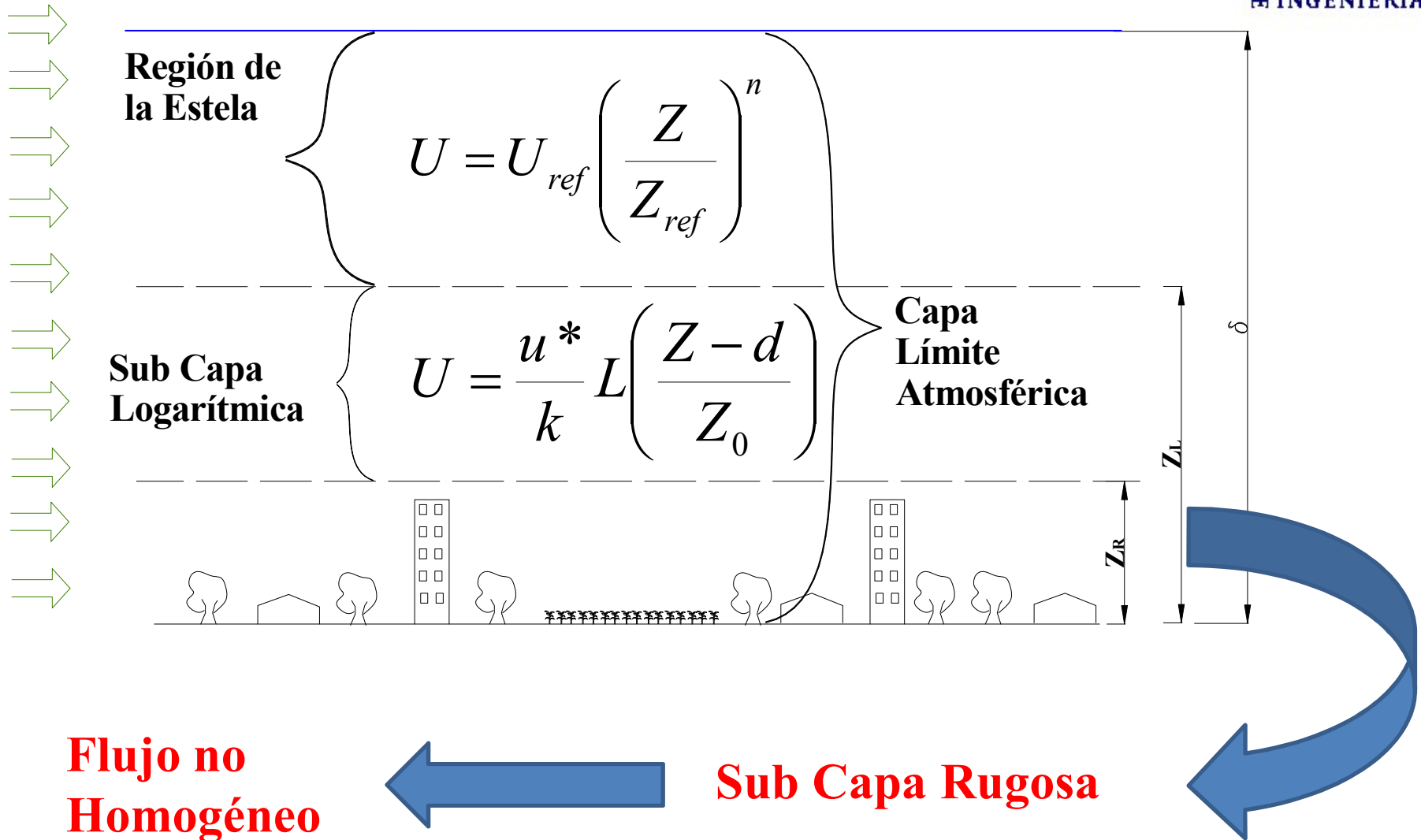
Para altura superiores a la de los obstáculos

Distribución de velocidad media en altura



Distribución de intensidad de turbulencia longitudinal





Descripción de los obstáculos

Describir forma y tamaño

Distribución en planta

Presencia de zonas arboladas

Cambios de rugosidad y temperatura

Zonas costeras

Cambios en el diseño

Cambios de elevación

Diseño arquitectónico

Construcción - aprovechamiento de los recursos naturales

- **Típico**
 - **Características repetitivas**
 - **Hincapié en sus rasgos genéricos**
- **Tipicidad**
 - **Características de las viviendas**
 - **Cantidad de pisos**
 - **Relación de aspecto**
 - **Geometría del techo**

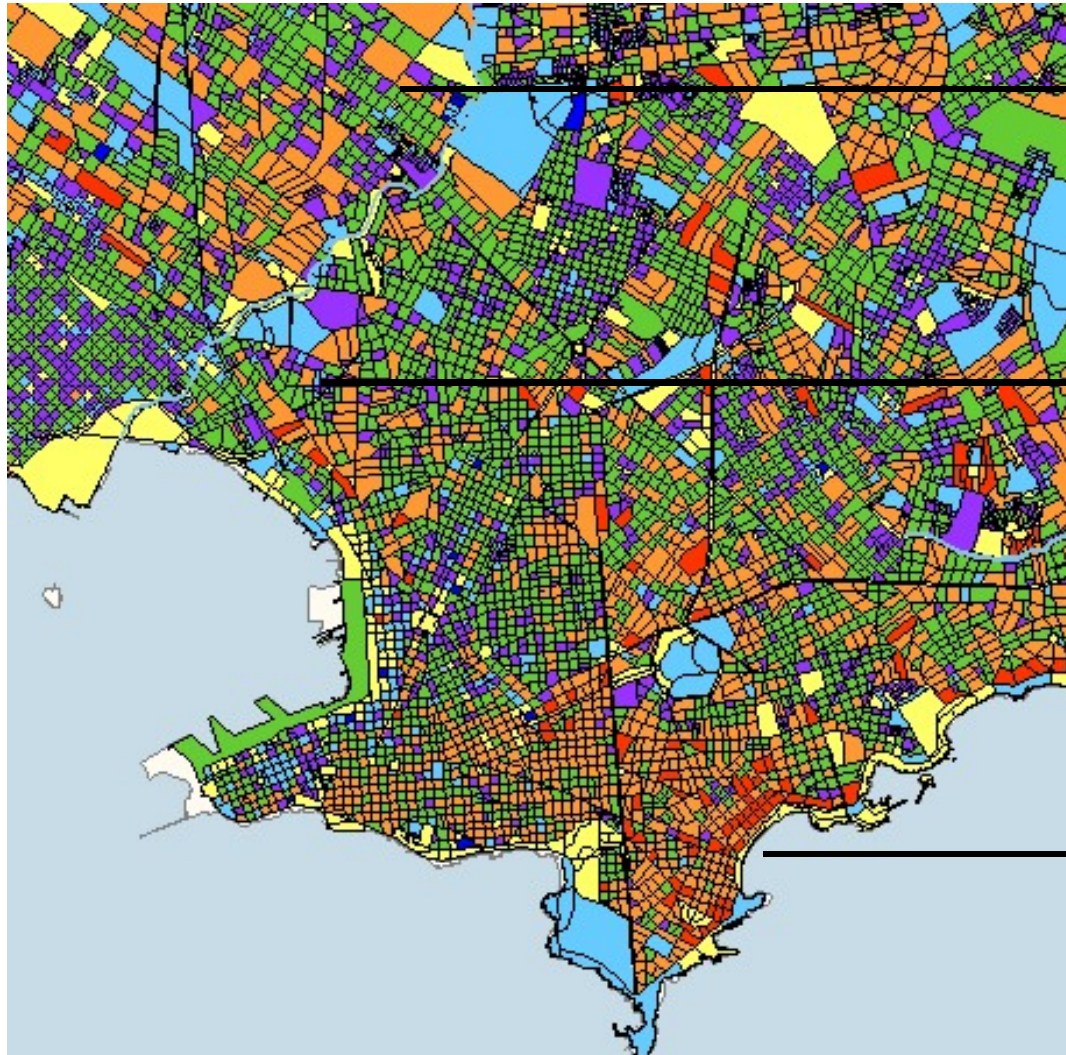
- ❖ **Áreas urbanas homogéneas**
 - ❖ **Elevada homogeneidad interna**
 - ❖ **Alta heterogeneidad externa**

- ✓ **Áreas de borde**
 - ✓ **Diferencias de alturas**
- ✓ **Áreas expuestas**
 - ✓ **Plaza, costa**
- ✓ **Áreas Interiores**

ALTA densidad

Densidad MEDIA

BAJA densidad.



PEÑAROL - densidad media 200 a 500 hbs/h

PRADO - baja densidad 50 a 100 hbs/h

POCITOS - alta densidad + de 500 hbs/h

ALTA DENSIDAD - Pocitos

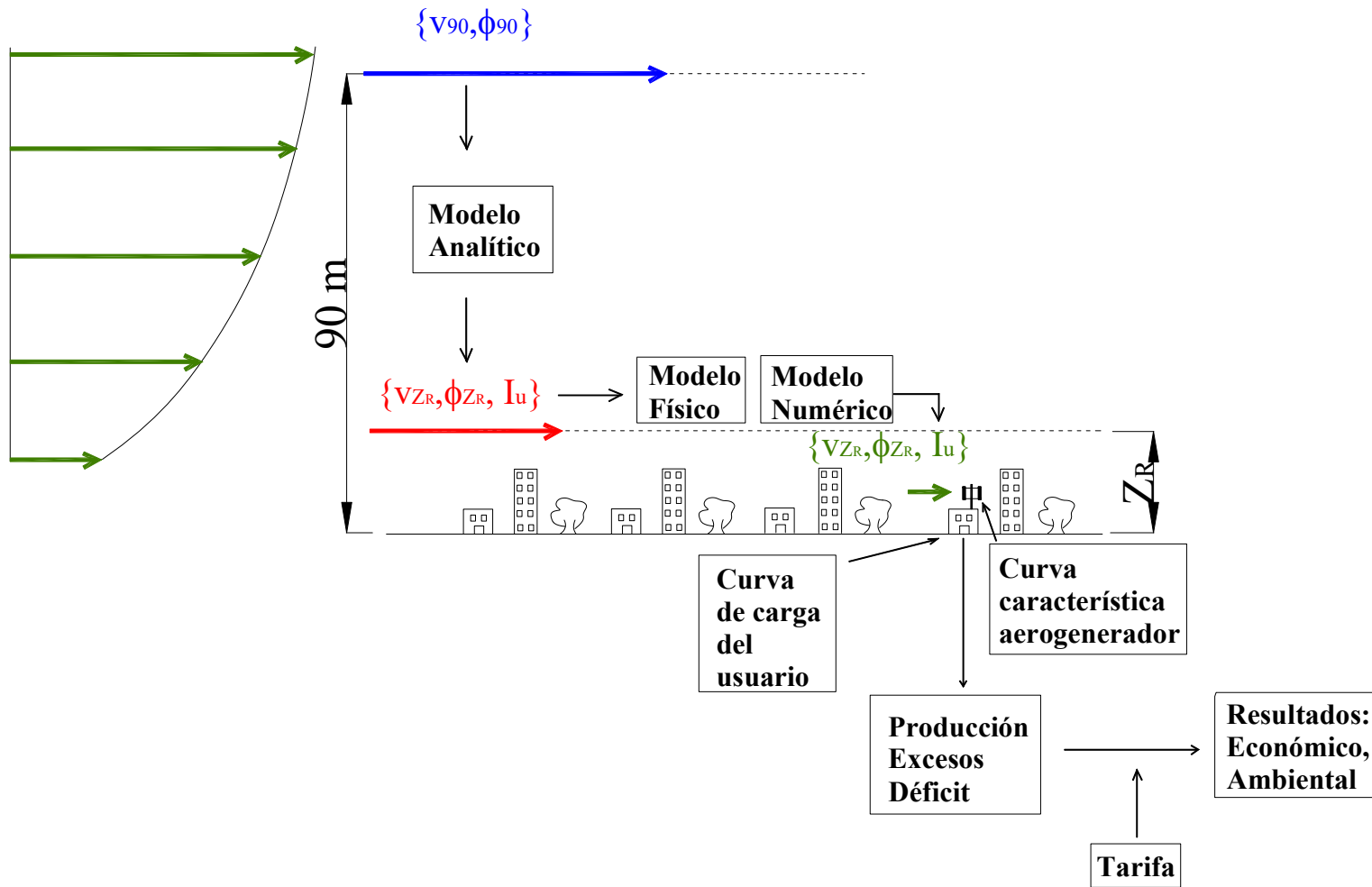


DENSIDAD MEDIA - Peñarol

BAJA DENSIDAD - Prado

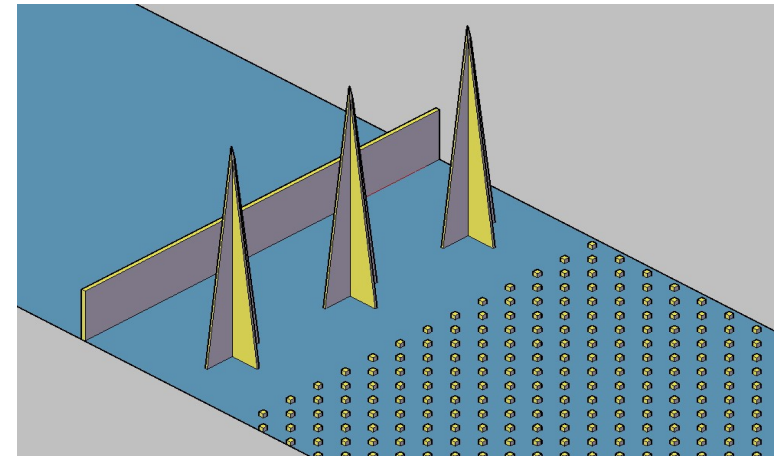


Evaluación del recurso eólico



➤ **Modelación física**

- **Túnel de viento**
- **Modelación del viento atmosférico – Escala 1/100**
- **Modelación de situaciones de estudio**
 - **Tres zonas seleccionadas**
 - **Facultad de Ingeniería**



ALTA DENSIDAD - Pocitos



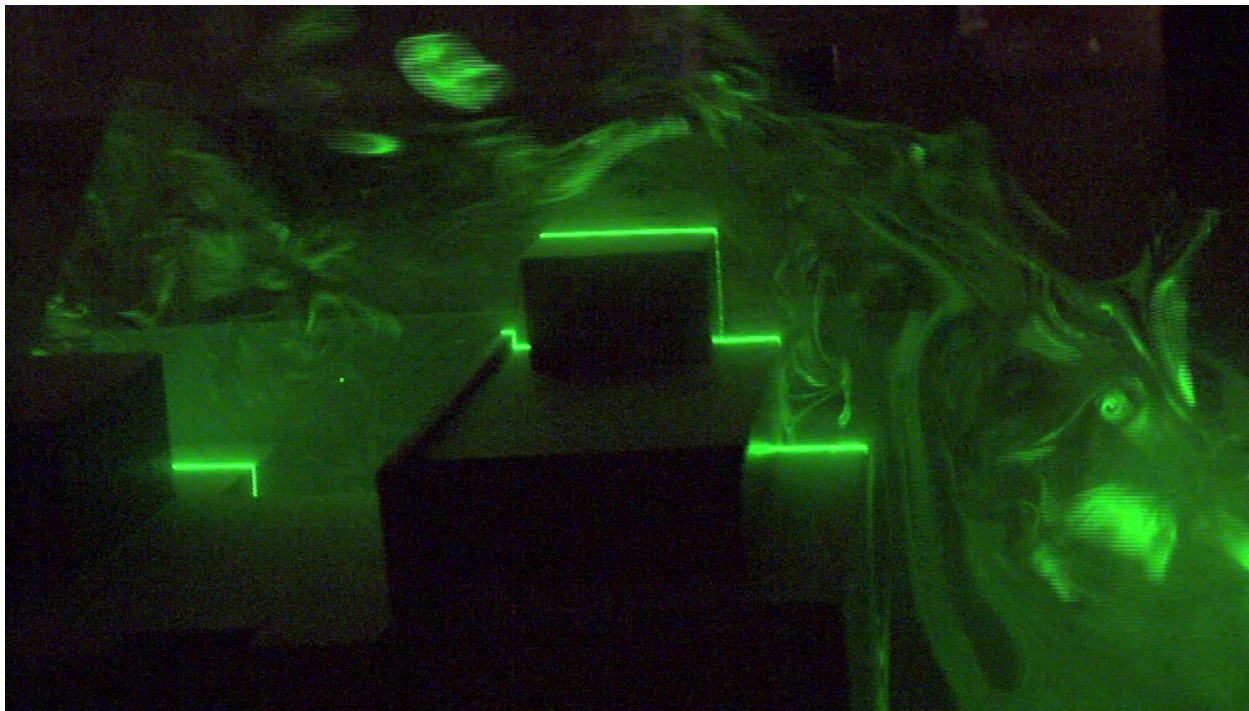
BAJA DENSIDAD - Prado

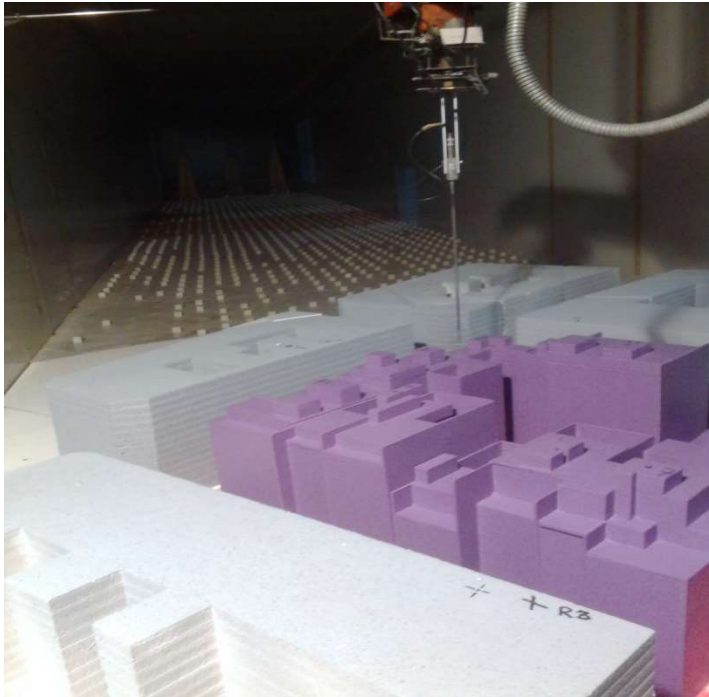


DENSIDAD MEDIA - Peñarol

**Visualización del
flujo**

**Descripción del
flujo**





Medición de velocidad

Velocidad – Velocidad de referencia

Intensidad de turbulencia

Espectros de la turbulencia

Selección de sitios de medición

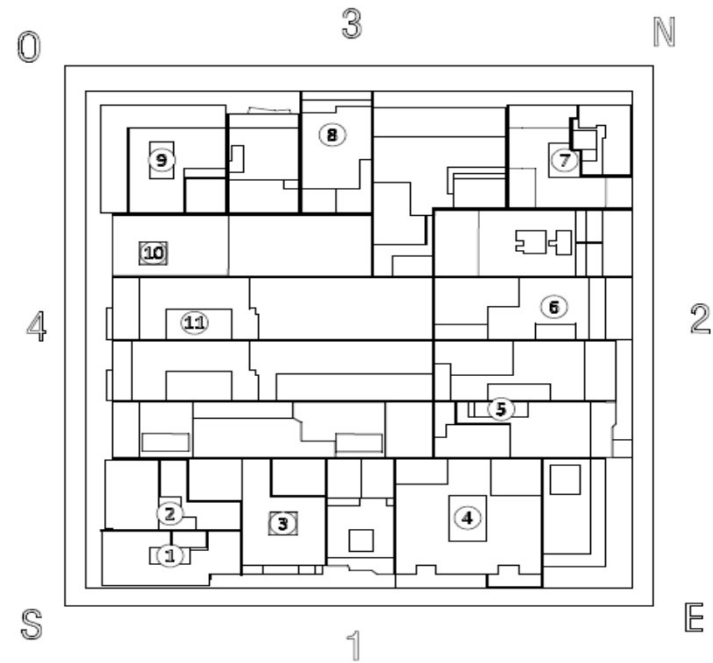
Distribuidos

Alturas

3 m, 7 m, 15 m

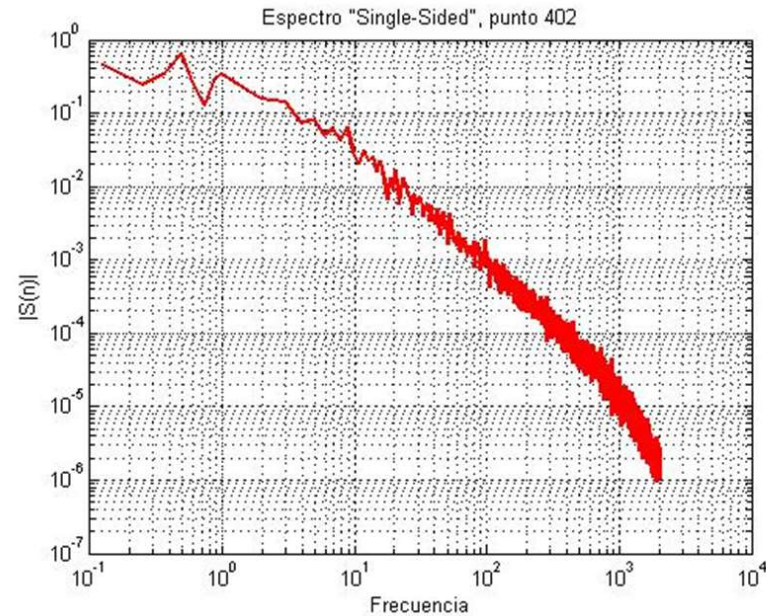
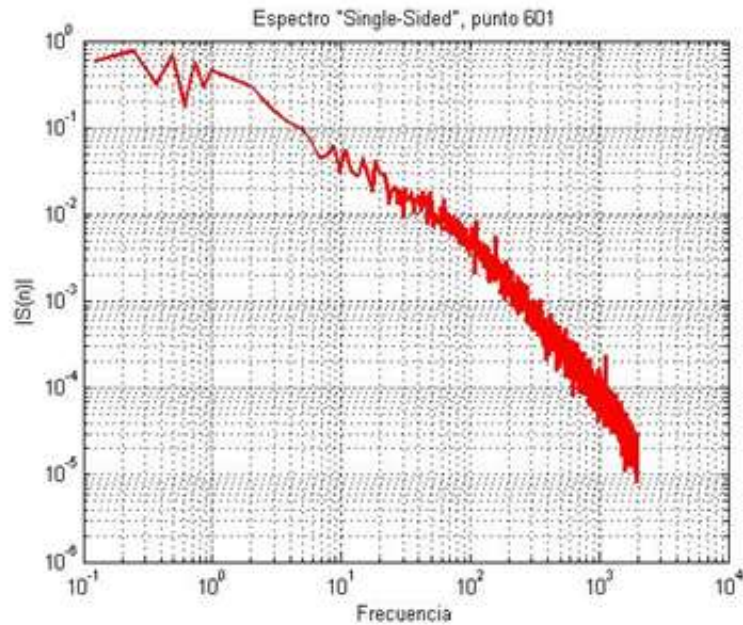
3 m, 6 m, 10 m

Resultados V/V_{ref} , I_u , Espectros



Resultado del ensayo en túnel de viento

Punto	N		NNE		NE		ENE		E		ESE		SE		SSE	
	V/VH	I.T. (%)	V/VH	I.T. (%)	V/VH	I.T. (%)	V/VH	I.T. (%)	V/VH	I.T. (%)	V/VH	I.T. (%)	V/VH	I.T. (%)	V/VH	I.T. (%)
101	0.17	40	0.20	41	0.39	30	0.52	29	0.70	18	0.46	35	0.33	36	0.31	38
102	0.25	39	0.31	41	0.39	31	0.66	25	0.81	15	0.51	33	0.47	32	0.49	36
103	0.58	30	0.59	31	0.53	27	0.79	19	0.86	13	0.65	30	0.77	26	0.75	27
203	0.75	25	0.84	21	0.74	22	0.86	17	0.88	14	0.81	24	0.88	19	0.95	17
202	0.58	29	0.58	30	0.65	23	0.80	22	0.91	14	0.67	29	0.80	22	0.76	25
201	0.52	32	0.52	31	0.63	26	0.65	26	0.92	14	0.66	29	0.74	27	0.73	30
301	0.52	33	0.54	34	0.69	24	0.61	27	0.81	19	0.82	23	0.60	33	0.84	23
302	0.61	30	0.71	28	0.74	21	0.76	22	0.91	16	0.88	22	0.62	31	0.84	22
303	0.83	23	0.96	17	0.77	19	0.88	15	0.89	15	1.00	17	0.76	27	0.91	18



En cada sitios

Serie histórica de velocidad media de viento

Valores de velocidad extrema – Periodo de retorno 50 años

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

Potencia Meteorológica

Energía disponible

	Altura (m)	P(W/m ²)			V (m/s)		
		Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima
101	3	1.12	0.02	5.12	1.7	0.6	3.3
102	7	2.14	0.13	7.87	2.3	1.1	3.9
103	15	5.94	0.40	10.96	3.4	1.5	4.7
201	3	5.76	1.34	12.24	3.4	2.4	4.9
202	7	6.48	0.05	11.80	3.5	0.7	4.8
203	13	10.70	0.12	20.08	4.1	1.0	5.3
301	3	6.52	0.55	13.91	3.5	1.8	4.7
302	7	8.43	0.83	17.23	3.8	2.1	4.9

Punto	Velocidad extrema (km/h)	Punto	Velocidad extrema (km/h)
101	74	701	181
102	86	702	170
103	136	703	181
201	141	801	86

- ❖ Zonas de ELEVADA DENSIDAD
 - ❖ Velocidad media anual > 4 m/s
 - ❖ Valores extremas de velocidad - Elevadas – 40 m/s
 - ❖ Intensidad de turbulencia – 22% a 50%

- ❖ Zonas de BAJA DENSIDAD, DENSIDAD MEDIA
 - ❖ Velocidad media anual > 3 m/s
 - ❖ Valores extremas de velocidad < 30 m/s
 - ❖ Intensidad de turbulencia 18% a 29%

IEC 61400 – 1

Clase de turbina eólica	I	II	III	S
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	Valores especificados por el diseñador
A I_{ref}	0.16			
B I_{ref}	0.14			
C I_{ref}	0.12			

Modelación numérica

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \vec{u} \cdot \vec{u} \right) = \rho \vec{f} + \nabla \cdot T$$

Ecuación de Navier-Stokes

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

Ecuación de conservación de masa

$$T = -p \cdot I + 2\mu D$$

Tensor de tensiones

Velocidad

$$\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$$

$$D \rightarrow \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\}$$

Tensor de deformaciones

Posición

$$\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$$

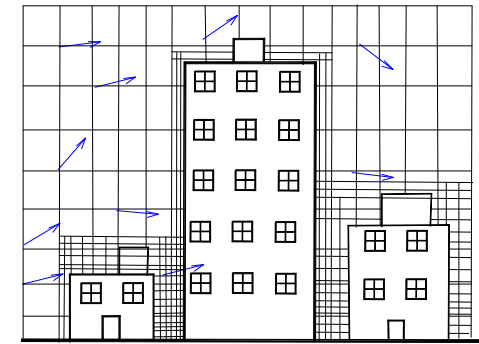
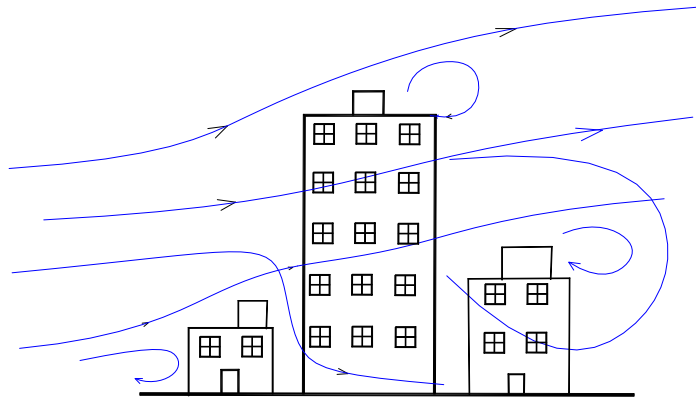
Continuo



Discreto

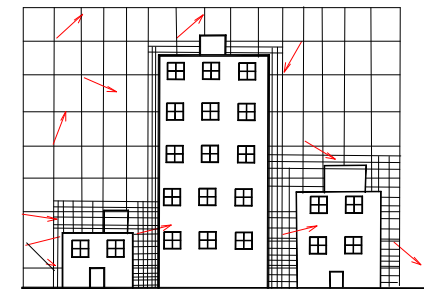
Espacio

$$\Delta V = \Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta Z$$



Tiempo

$$\Delta t$$



Dimensiones del volumen de control V_c

$$\text{Nodos} \sim V_c / \Delta V$$

Duración del periodo de modelación T

Cantidad de pasos temporales $T / \Delta t$

Escala de los vórtices

- Capacidad de almacenamiento
- Tiempo de trabajo

- Situaciones a analizar
 - Dirección de viento
- Parámetros a obtener
 - Valor medio
 - Espectros

- Descripción de la frontera
 - Ciudad
 - Aristas
 - Disponibilidad

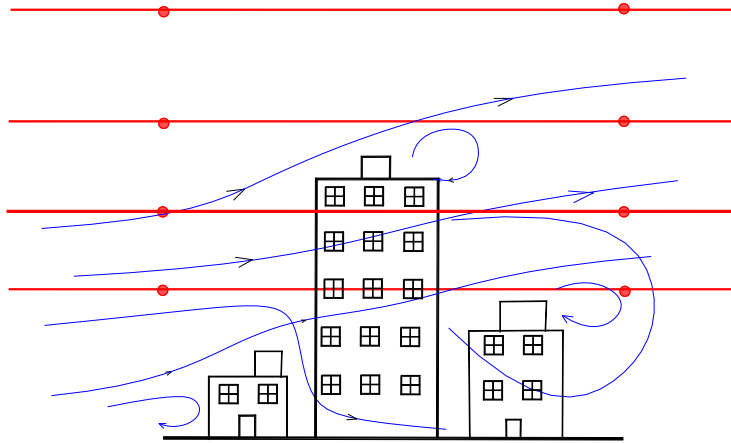
- Modelos de turbulencia
 - $u = U + u'$
 - Promedios en el tiempo
 - Longitud de mezcla
 - Modelo k
 - Modelo k - ϵ
 - Modelos RAN
 - Promedios en el espacio
 - LES

Modelado de la frontera

**Modelos
anidados**

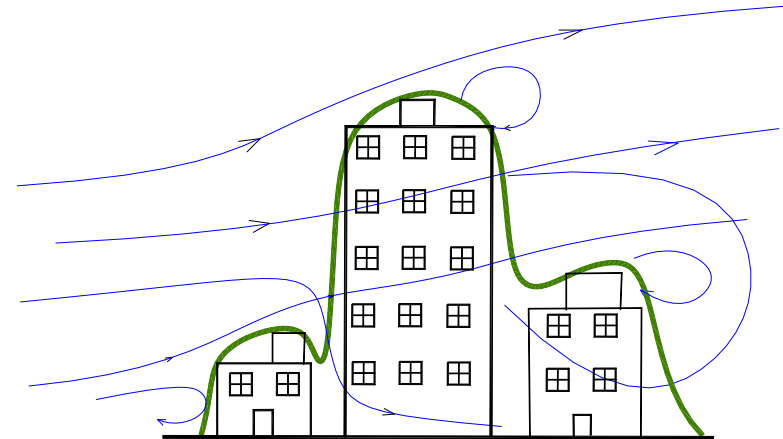


Reducir volumen de cálculo
Modelo de meso escala – WRF
Condiciones iniciales
Condiciones de frontera



**Convertir – Terreno de
topografía muy compleja**

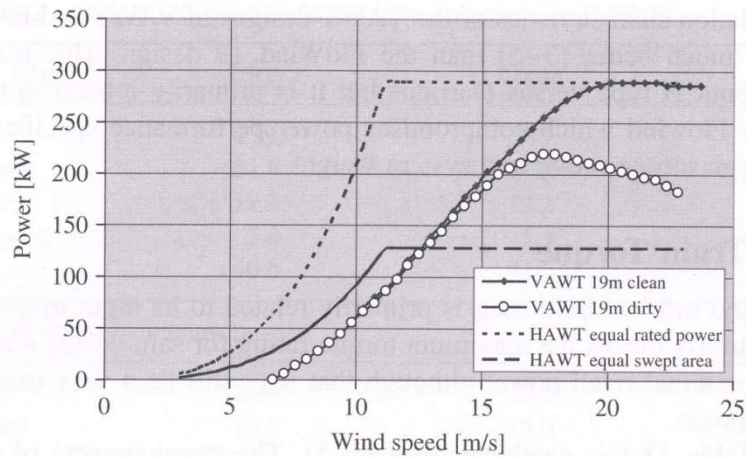
**Correcciones
Sub valora**



➤ Modelo Analítico

➤ Datos

- Curva de consumo
- Esquema tarifario
- Aerogenerador – Curva Característica



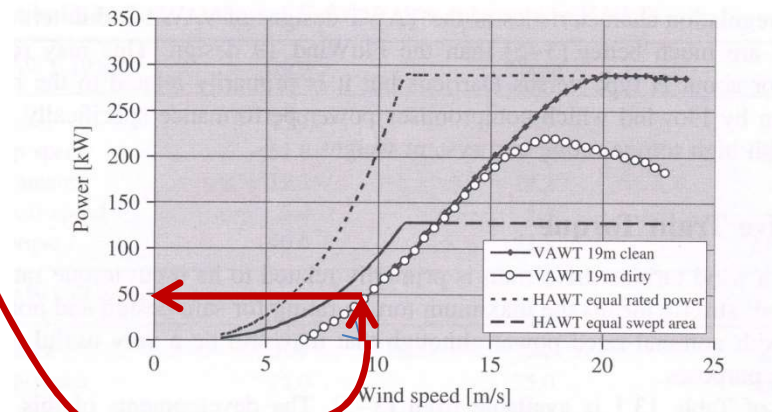
Tecnología de aerogeneradores

Baja velocidad

elevada turbulencia

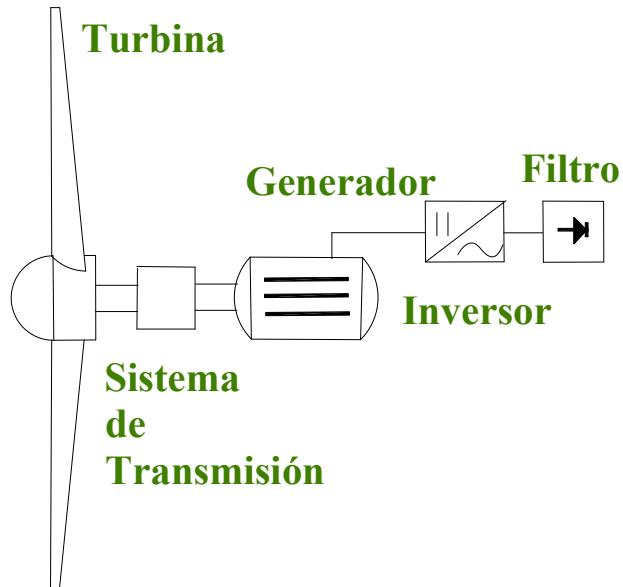


**Elevadas sollicitaciones –
Fluctuantes - Riostras**



Aerogeneradores utilizados en micro generación

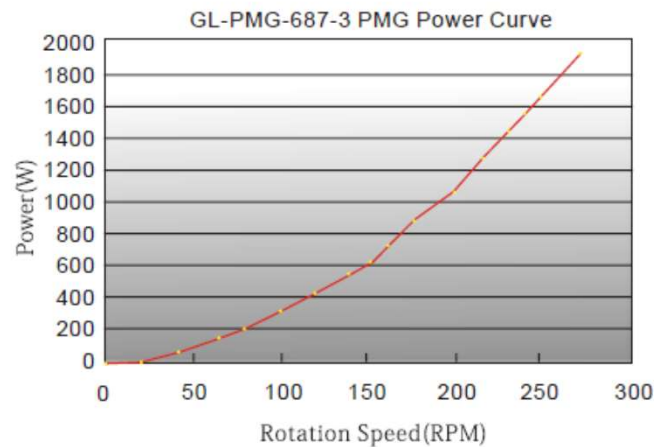




- Sistema de transmisión – Generador
 - Generador Asíncrono
 - Multiplicador
 - Caja, transmisión por correa, cadena
 - Baja potencia
 - Alto rendimiento
 - Acople directo



Generador de imanes permanentes



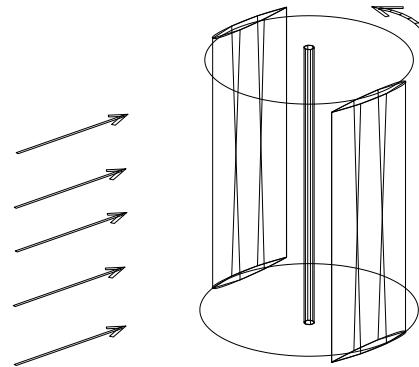
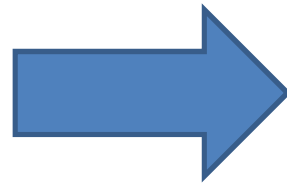
- Diseño de la turbina Eólica
 - Aerodinámico
 - Mecánico

Darrieus



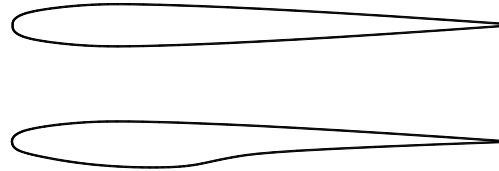
Central Monte Ahumada (Iarifa)

Simplificación
Darrieus recto



- ❖ Arranque
 - ❖ Sin apoyo
- ❖ Fluctuación de par
 - ❖ Cantidad de palas

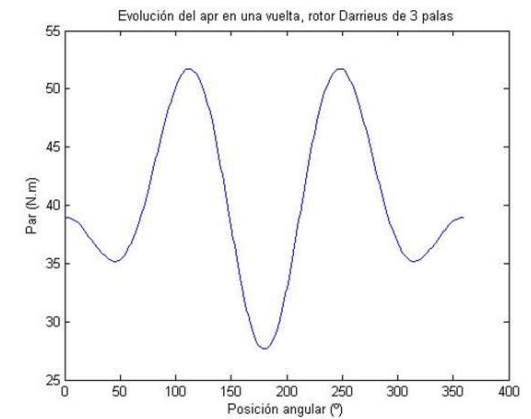
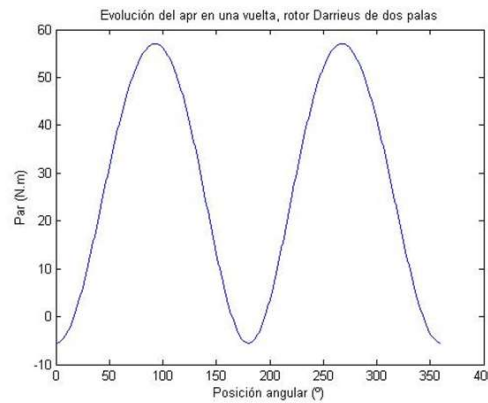
- Arranque
 - Apoyo – Savonius
 - Potencia
 - Perfil



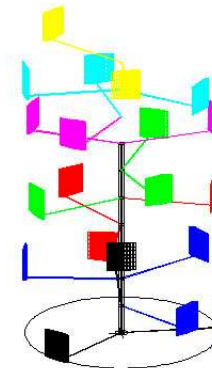
Simétrico

Doble curvatura

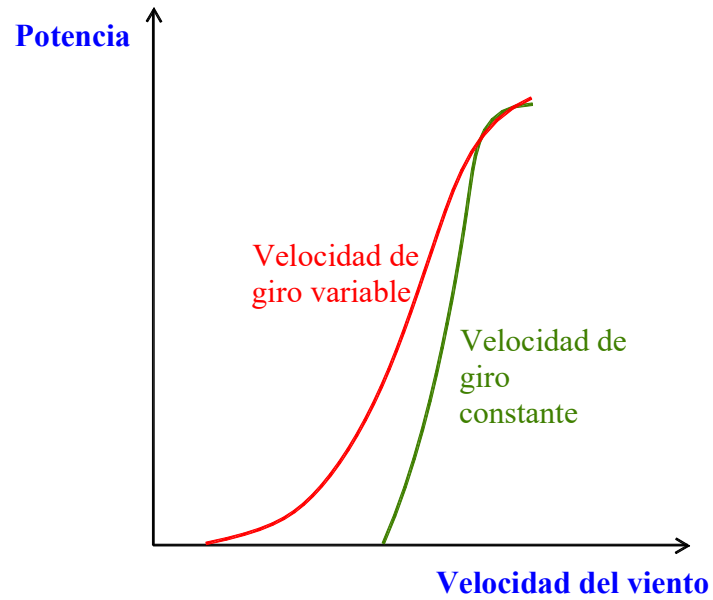
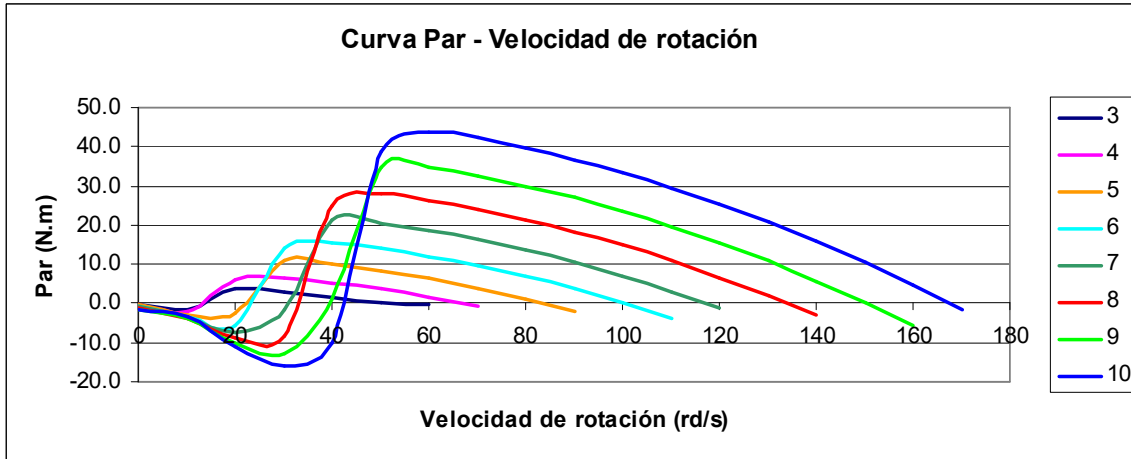
- ❖ Fluctuaciones de par y potencia
 - ❖ Cantidad de palas
 - ❖ Geometría



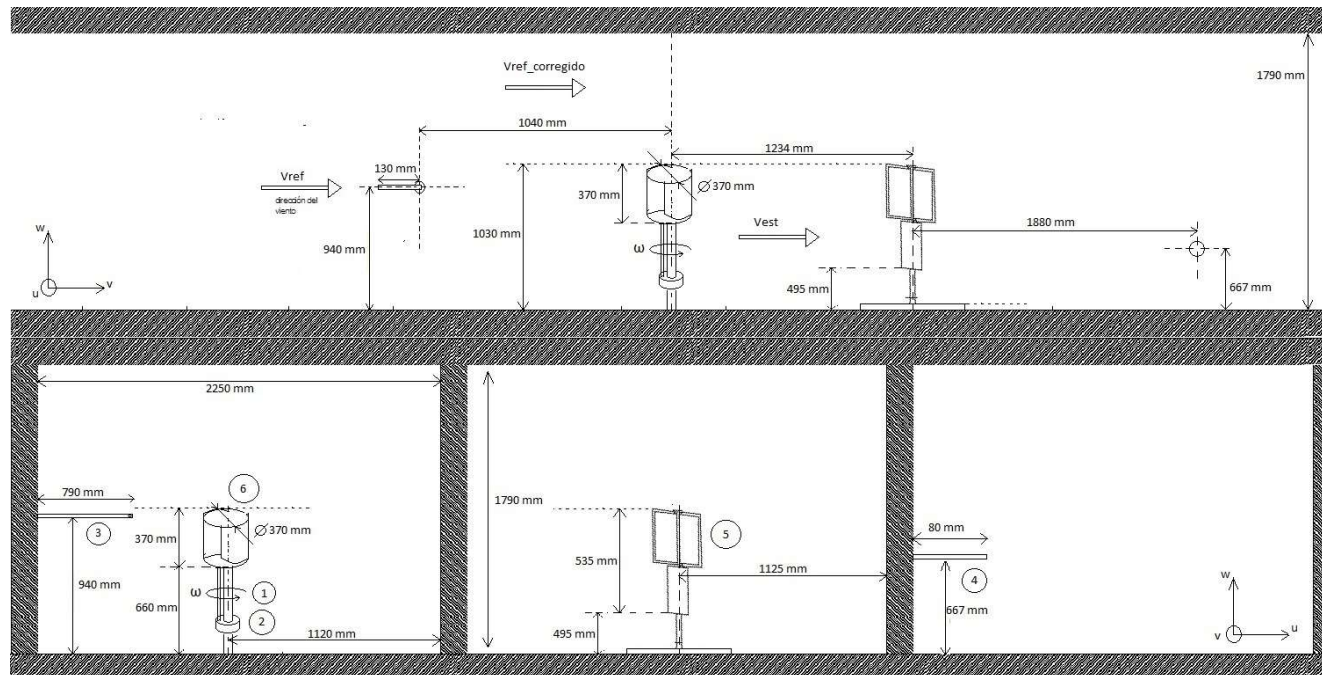
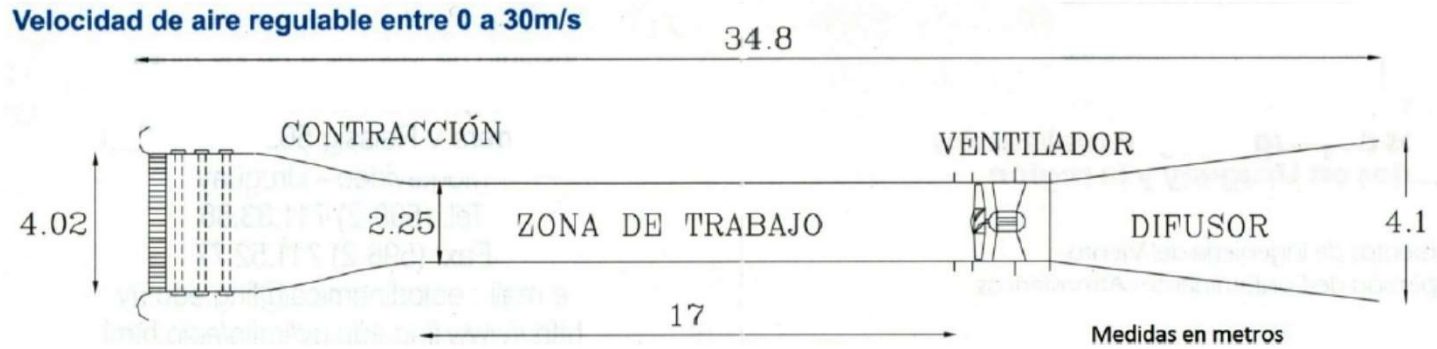
Perfil que aporta potencia



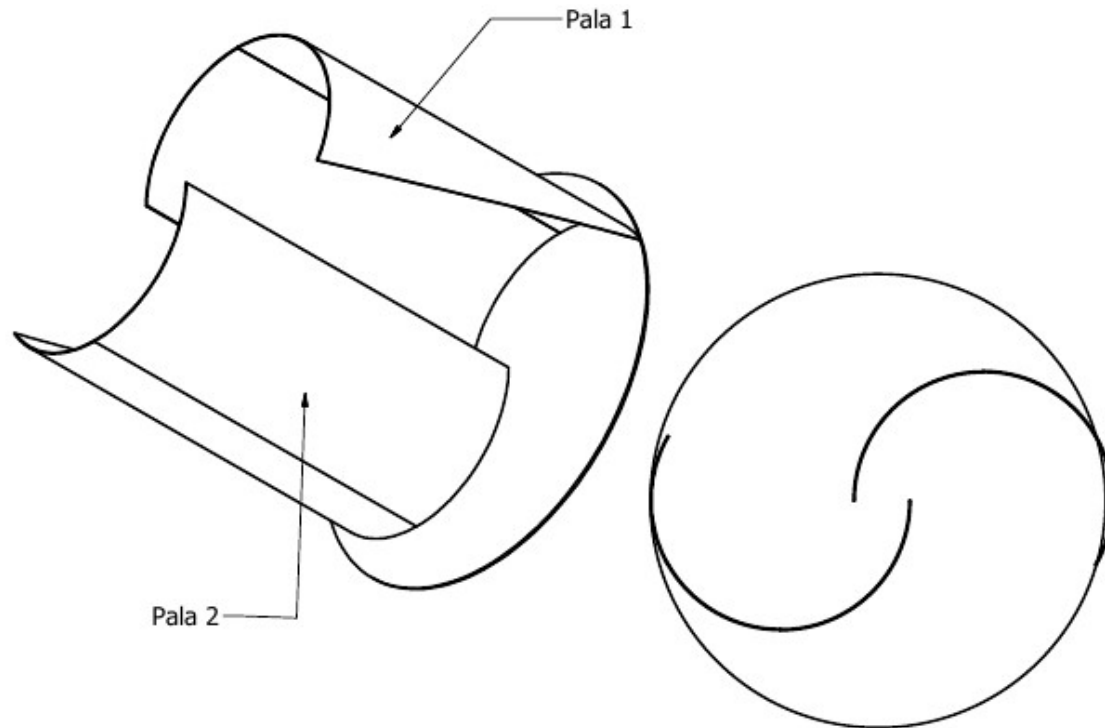
Curva característica



Ensayo de aerogenerador Savonius



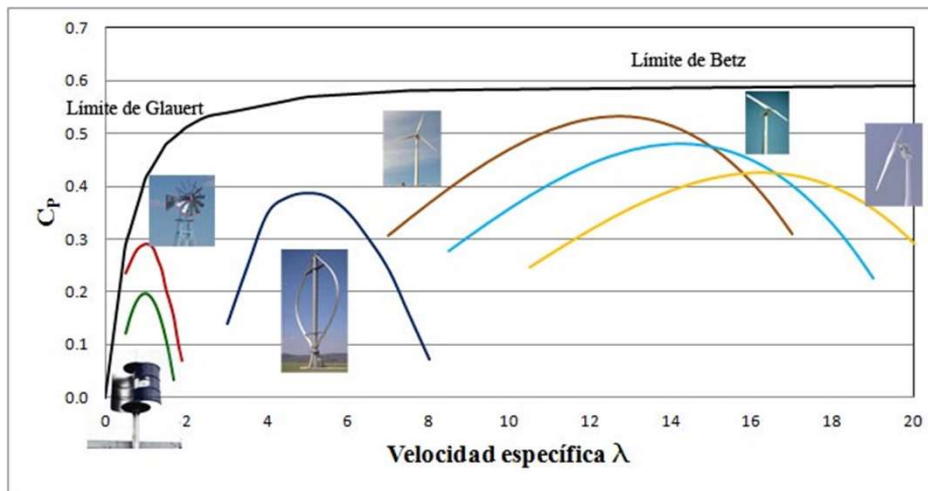
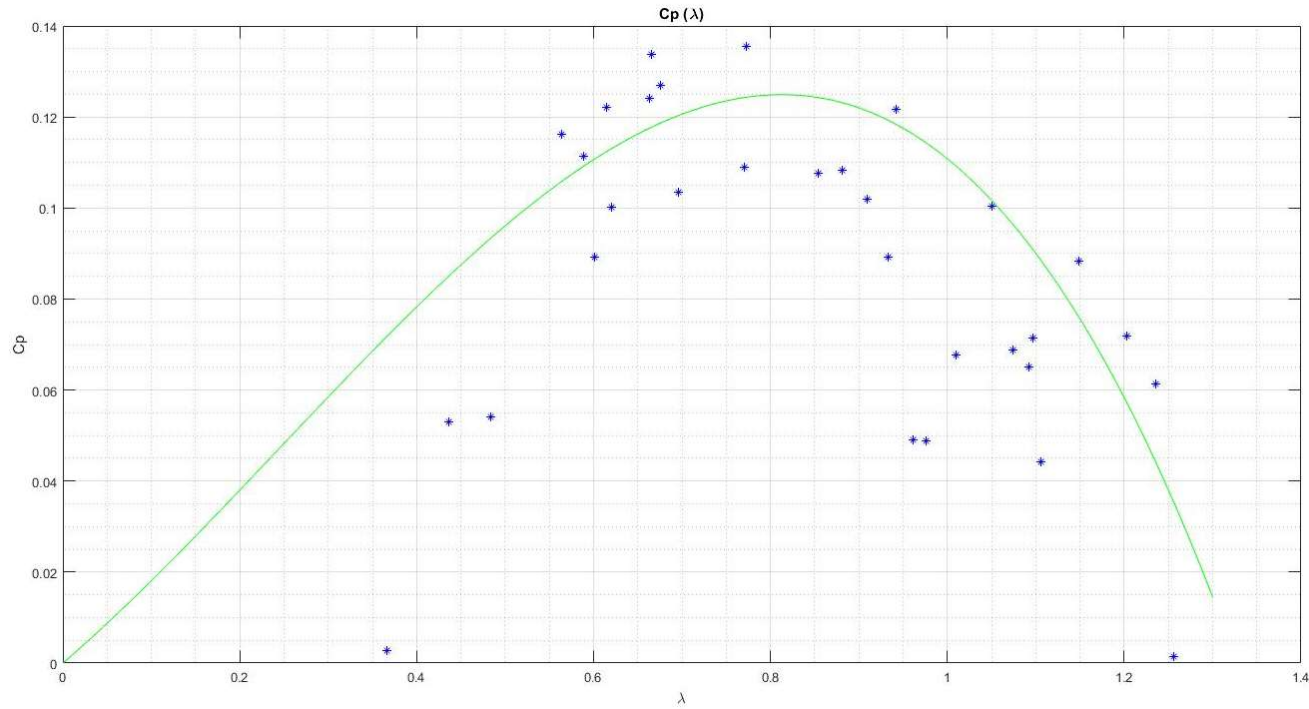
Rotor ensayado



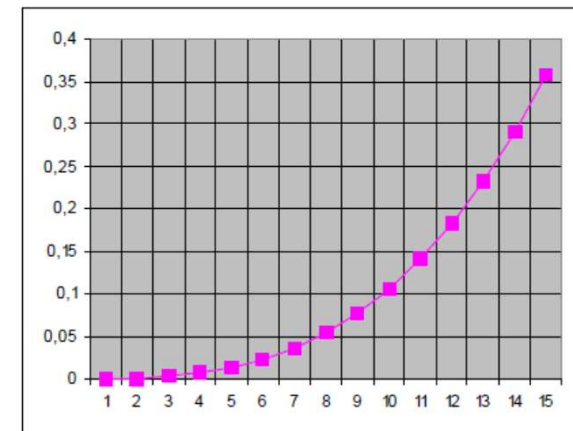
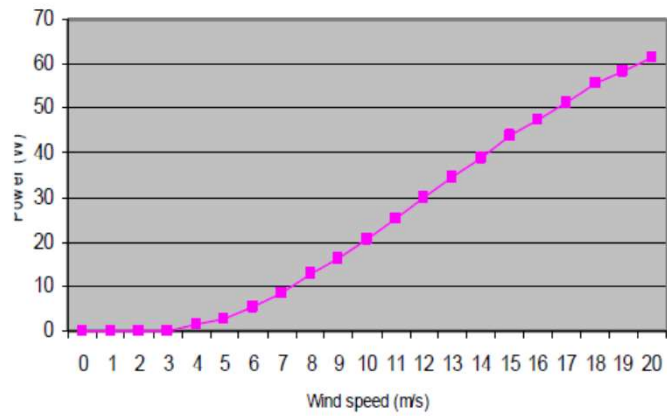
$$C_P = \frac{M\omega}{\frac{1}{2}\rho A V_{refc}^3}$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_{refc}}$$

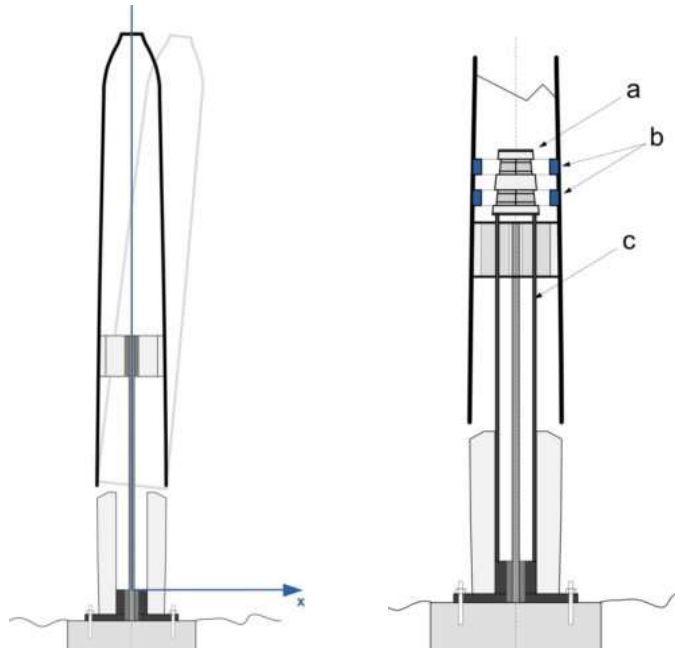
Resultados



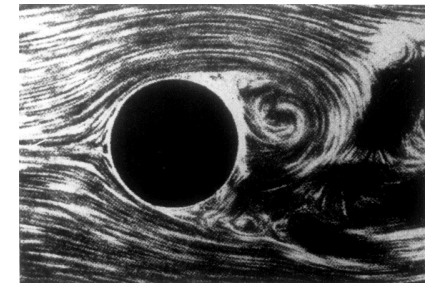
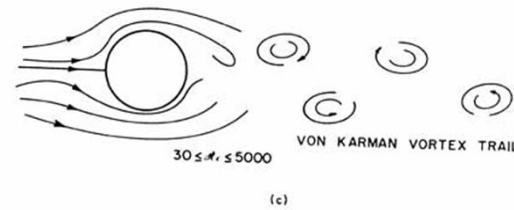
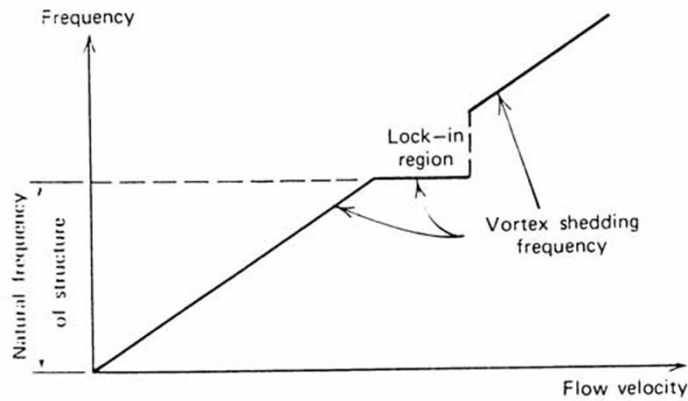
Diseños especiales



VORTEX



Emisión de vórtices
Ajuste de la constante elástica
Frecuencia natural



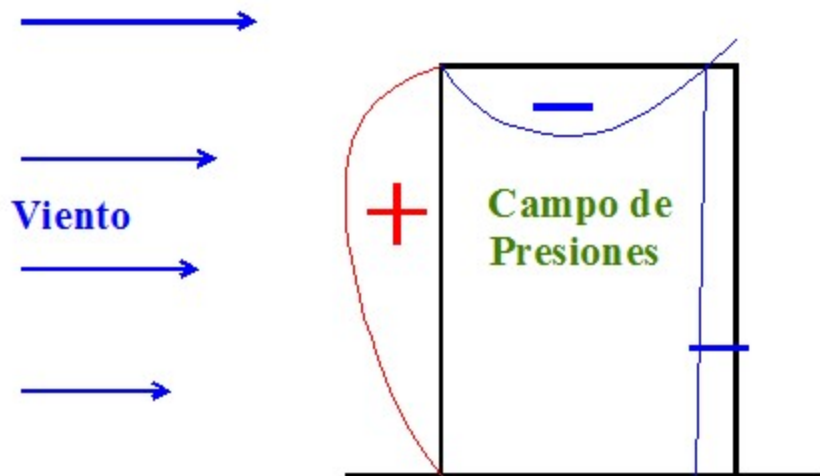
$$St = \frac{f_v \cdot L}{U}$$

Strouhal - Geometría

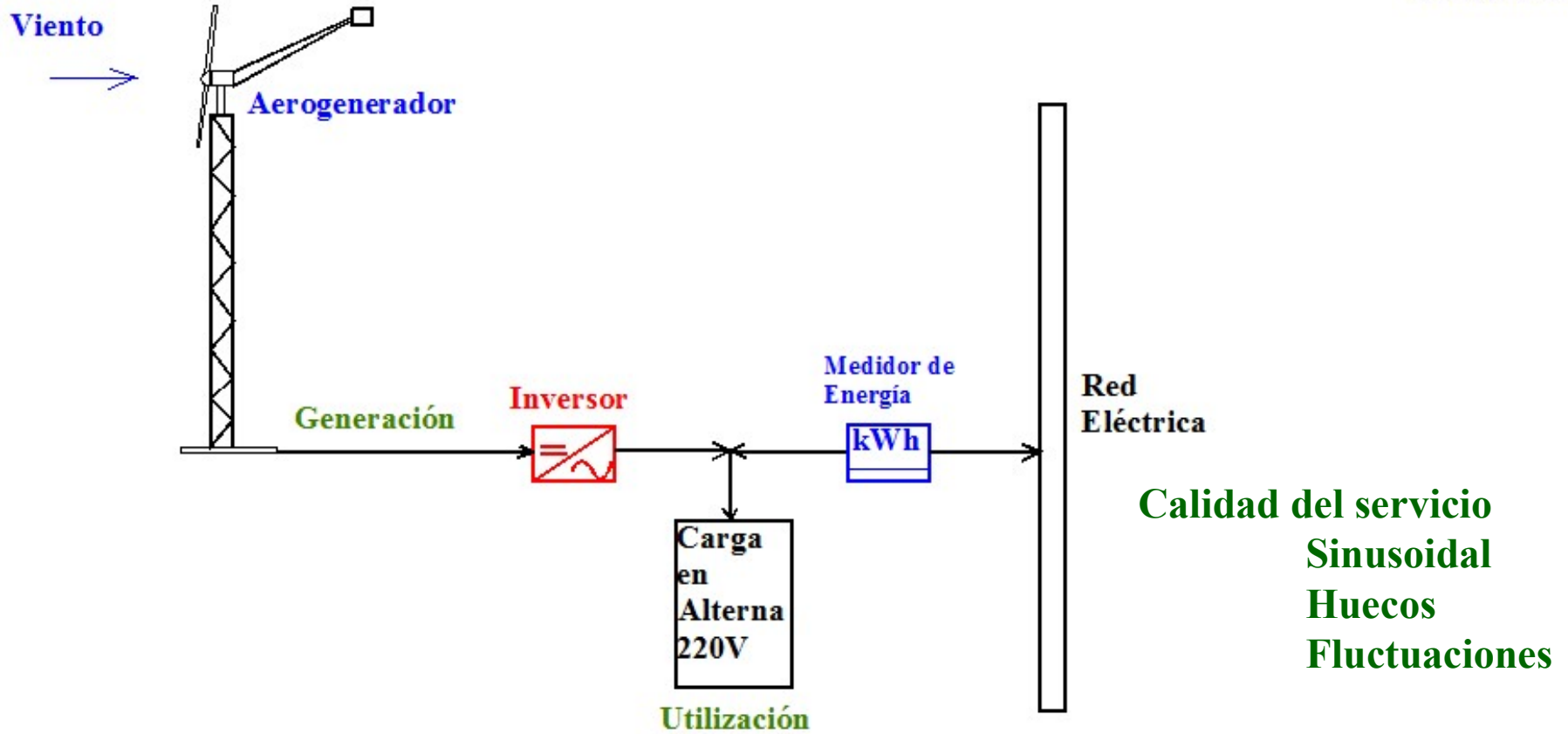
Soluciones a medida





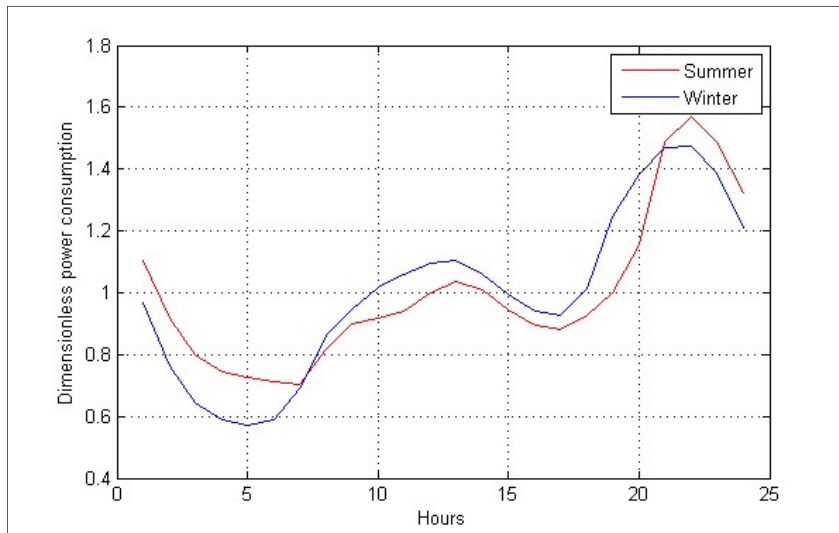


Esquema de conexión



Regulación y consumo

Consumo - UTE



PEDEM

Categoría	Nivel de consumo Mensual (kWh)
Ingresos bajos	123
Ingresos medios	255
Ingresos altos	589
Ingresos muy altos	937

Esquemas tarifarios

TARIFA SIMPLE RESIDENCIAL	
Cargo por consumo de energía	
1 kWh a 100 kWh	4.881 \$/kWh
101 kWh a 600 kWh	6.121 \$/kWh
601 kWh en adelante	7.63 \$/kWh
Cargo por potencia contratada	58.3 \$/kW
Cargo fijo mensual	\$ 188

TARIFA DOBLE HORARIO RESIDENCIAL	
Cargo por consumo de energía	
Horario punta *	8.157 \$/kWh
Horario fuera de punta	3.267 \$/kWh
Cargo por potencia contratada	58.3 \$/kW
Cargo fijo mensual	\$ 340
* 17:00 a 23:00	

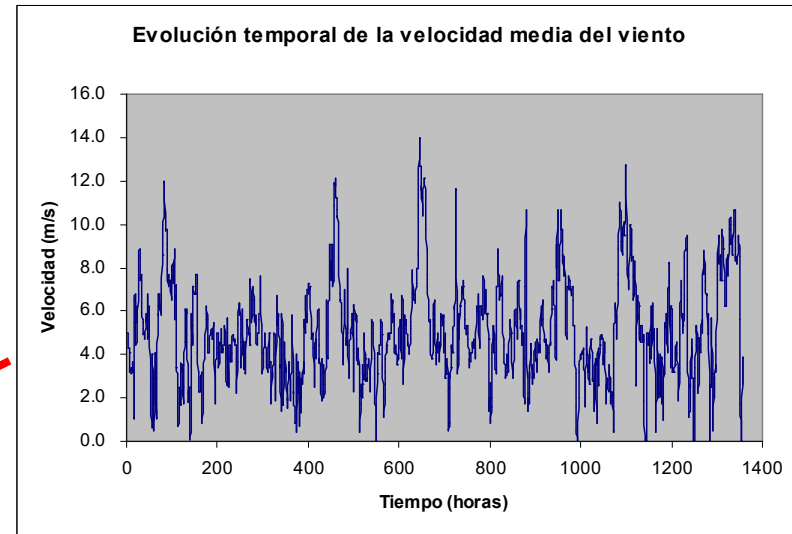
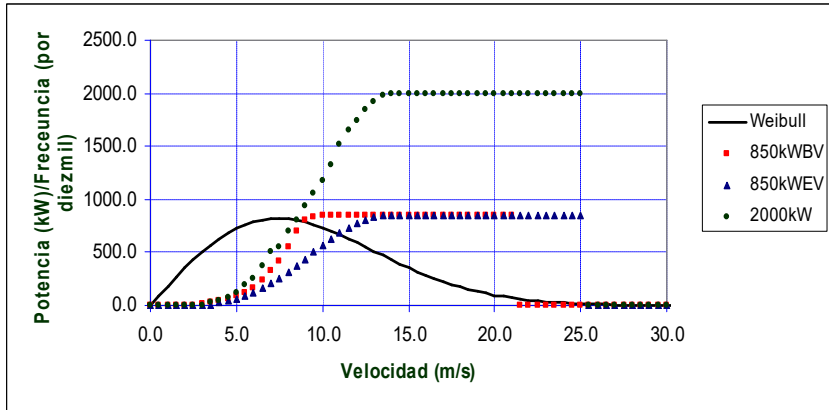
Decreto de Microgeneración, 173 – 010

- * Venta de energía eléctrica a la red de origen renovable**

- * Mismo precio de la tarifa contratada**
 - * Residencial simple**
1k Wh a 100 kWh, 101 kWh a 600 kWh y mayor a 600 kWh
 - * Doble horaria**
Punta 17:00 a 23:00, Valle 0:00 a 17:00 y 23:00 a 0:00

- * Se paga la diferencia**

Urbana, Suburbana, Rural



$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(V) \cdot p(V) \cdot dV$$

$$F.C. = \frac{\bar{P}}{P_R} = \frac{\text{Cantidad de horas a potencia no min al}}{\text{Horas totales}}$$

Desempeño energético – 27 aerogeneradores

Bajos valores de Factor de Capacidad

Marca	Tipo	FC (%)	
		Fac. Ing.	Alta dens
Ecofis	VAWT	11,0	14,5
Oy Windside	VAWT	12,2	15,6
Ropatec	VAWT	11,6	15,1
Ropatec	VAWT	9,3	12,1
Ropatec	VAWT	13,1	16,8
Turby	VAWT	10,8	14,5
Venturi	VAWT	6,2	8,2
Windman	VAWT	22,2	28,7
Windman	VAWT	14,0	18,6

Savonius

Turby 2,5 kW

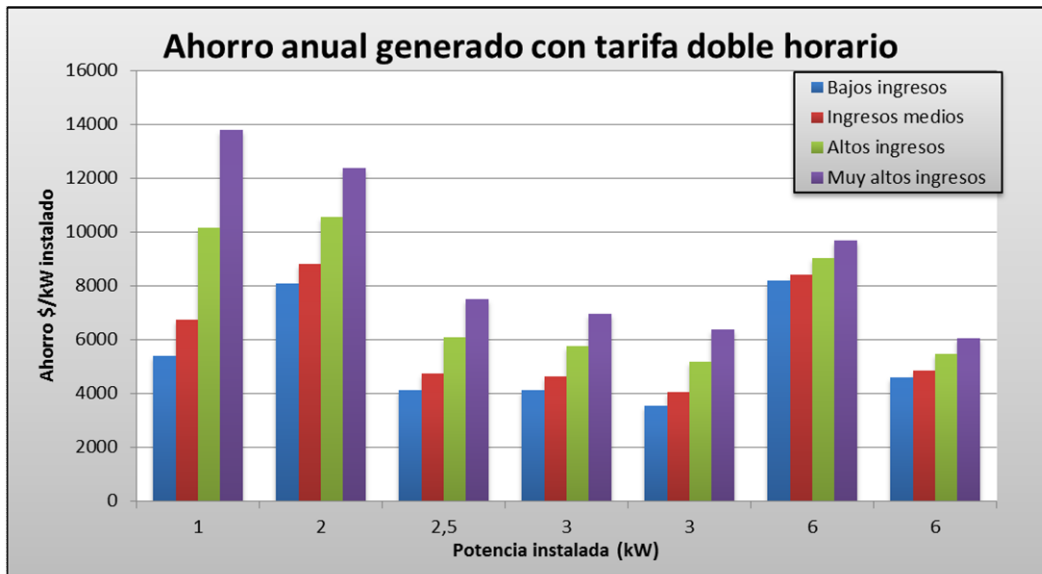
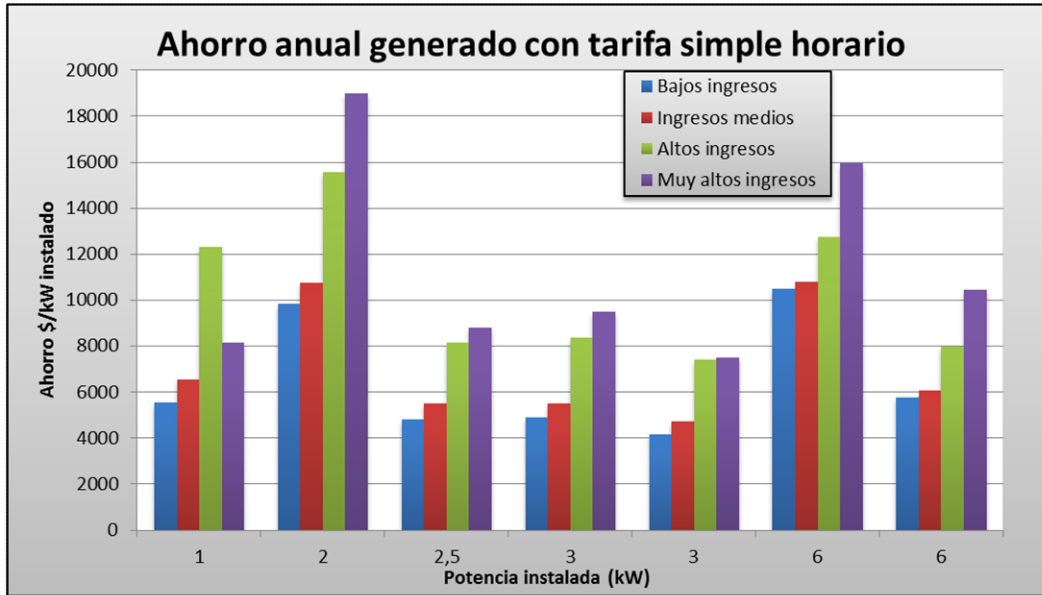


Venturi 110-500



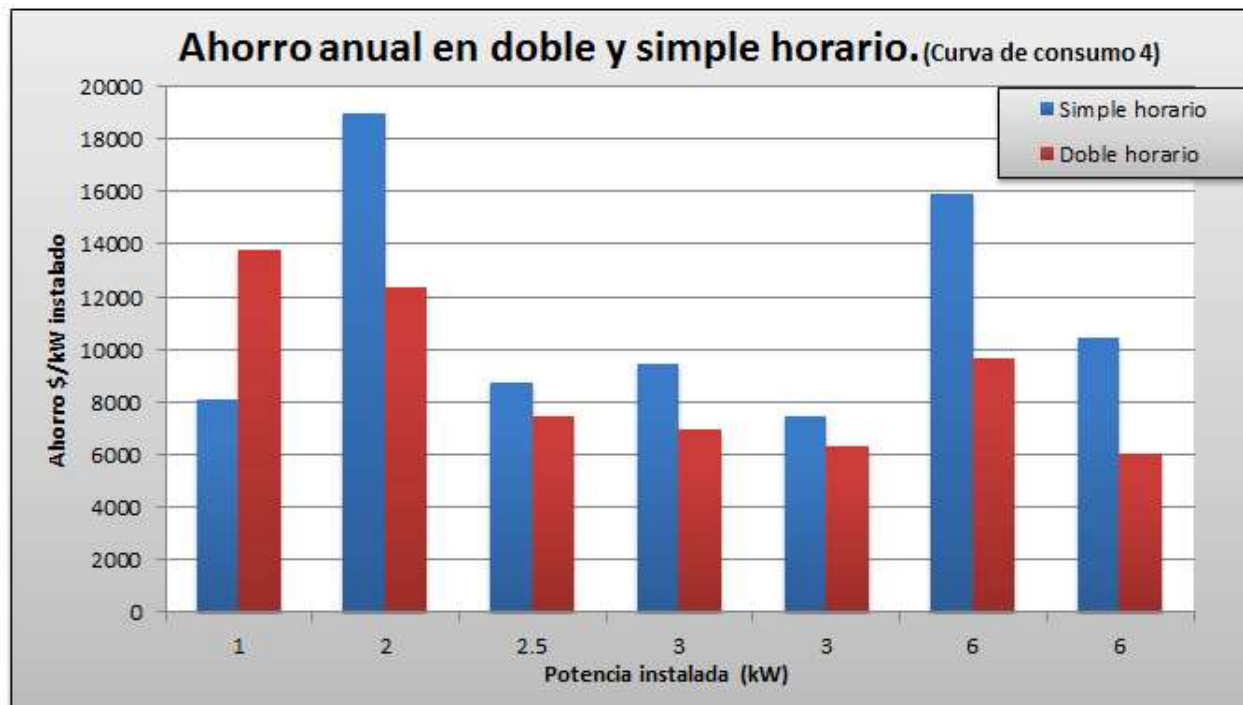
AWT(2)2x2000/ 4 kW





Mayor ahorro a elevados consumos

Simple horario mayor ahorro que en doble horario – Producción no sintonizada horario



Sensibilidad a la inversión

Lugar: Zona de alta densidad de población

Curva consumo 4

AERO 13		Ropatec		Simple horario				Doble horario			
Pot. (kW)	3.0	Predio unitario (US\$/kW)	Simple horario				Doble horario				
FC	12.1%		Ahorro anual (\$)	PB (años)	TIR	VAN (\$)	Ahorro anual (\$)	PB (años)	TIR	VAN (\$)	
% Inv.	Inv. (US\$)										
100%	23621	7874	30433	22	-0.4%	-3.75E+05	22070	30	-3.3%	-4.50E+05	
75%	17716	5905	30433	17	2.4%	-2.19E+05	22070	23	-0.8%	-2.90E+05	
50%	11811	3937	30433	12	7.1%	-5.98E+04	22070	16	3.3%	-1.31E+05	
42%	9921	3307	30433	10	9.5%	-8.77E+03	22070	14	5.3%	-8.00E+04	

AERO 21		TRUBY		Simple horario				Doble horario			
Pot. (kW)	2.5	Predio unitario (US\$/kW)	Simple horario				Doble horario				
FC	14.5%		Ahorro anual (\$)	PB (años)	TIR	VAN (\$)	Ahorro anual (\$)	PB (años)	TIR	VAN (\$)	
% Inv.	Inv. (US\$)										
100%	26392	10557	30454	25	-1.5%	-4.53E+05	22129	34	-4.2%	-5.24E+05	
75%	19794	7918	30454	19	1.3%	-2.75E+05	22129	26	-1.7%	-3.46E+05	
50%	13196	5278	30454	13	5.8%	-9.70E+04	22129	18	2.2%	-1.68E+05	
38%	10029	4012	30454	10	9.4%	-1.15E+04	22129	14	5.2%	-8.24E+04	

Sensibilidad a la tarifa

Lugar: Zona de alta densidad de población

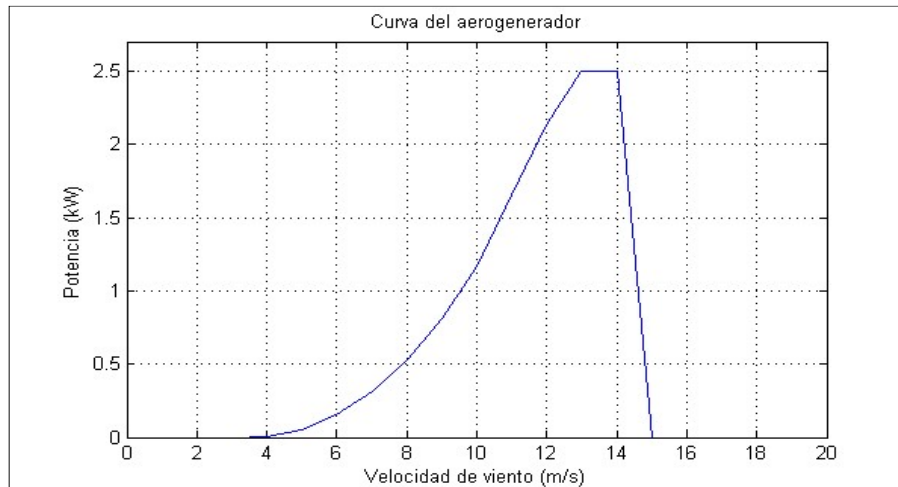
Curva consumo 4

AERO 13	Ropatec					
Pot. (kW)	3					
FC	9,3%	Aumento tarifa (%)	Simple horario			
% Inv.	Inv. (U\$S)		Ahorro anual (\$)	PB (años)	TIR	VAN (\$)
100%	23621	0	30433	22	-0,4%	-3,79E+05
100%	23621	201	91604	10	7,7%	-1,34E+05

AERO 21	Turby					
Pot. (kW)	2,5					
FC	10,8%	Aumento tarifa (%)	Simple horario			
% Inv.	Inv. (U\$S)		Ahorro anual (\$)	PB (años)	TIR	VAN (\$)
100%	26392	0	30454	25	-1,5%	-4,53E+05
100%	26393	236	102320	10	7,8%	-1,50E+05

Familia de aerogeneradores

0.5 a 10 veces 2.5 kW



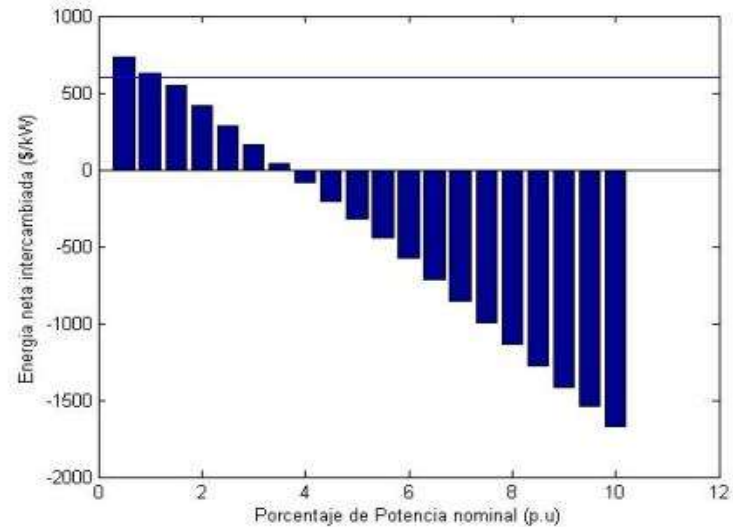
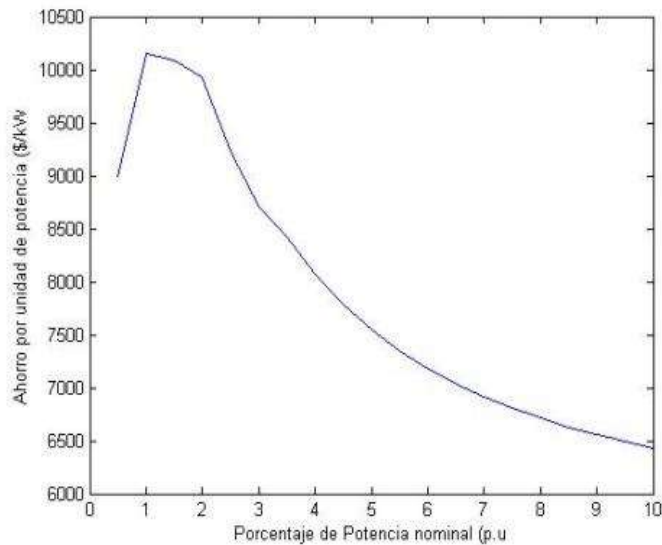
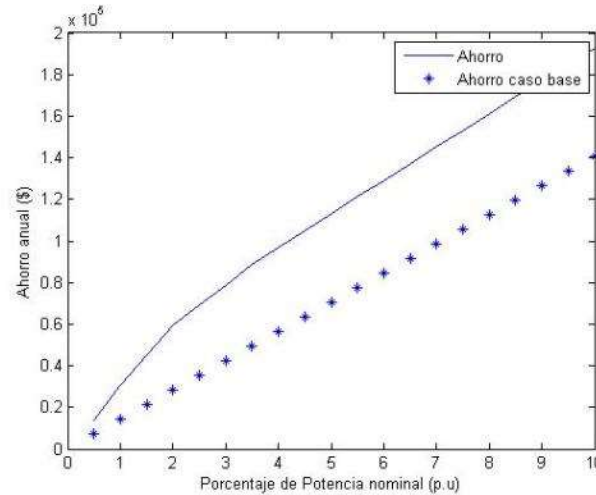
Caso base

Venta de producción

Sin consumo

Vivienda en zona de ALTA DENSIDAD

Ingresos Muy Altos



Dimensión óptima del generador

Banco de prueba de aerogeneradores

Facultad de Ingeniería

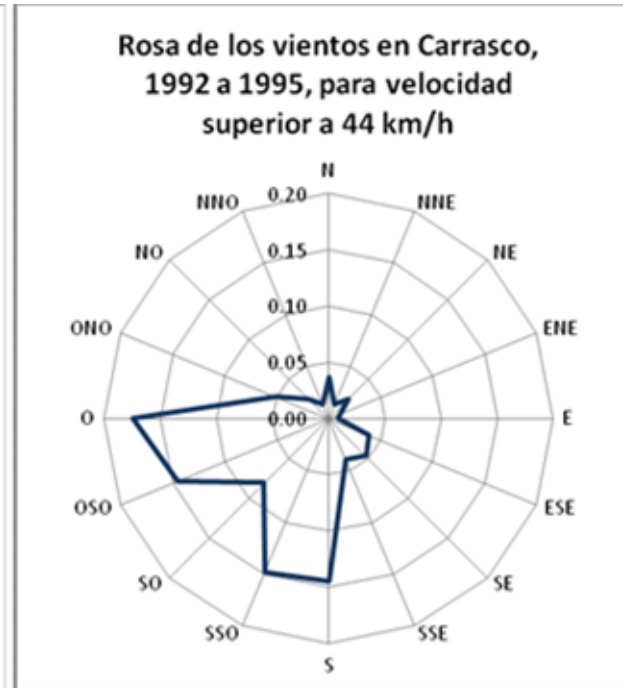
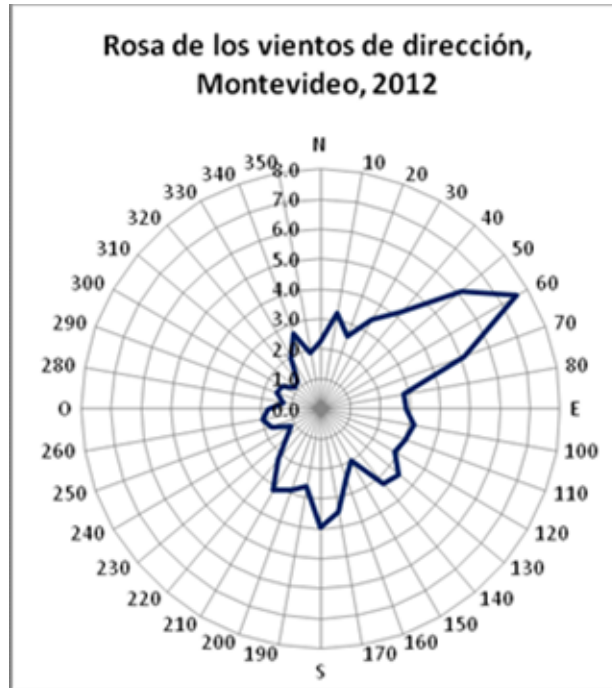
Modelo físico



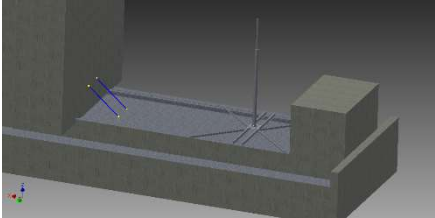
Anemómetros ultrasónicos

e-olos Urbis: Micrositing Computacional de Aprovechamientos Eólicos en la Ciudad de Montevideo

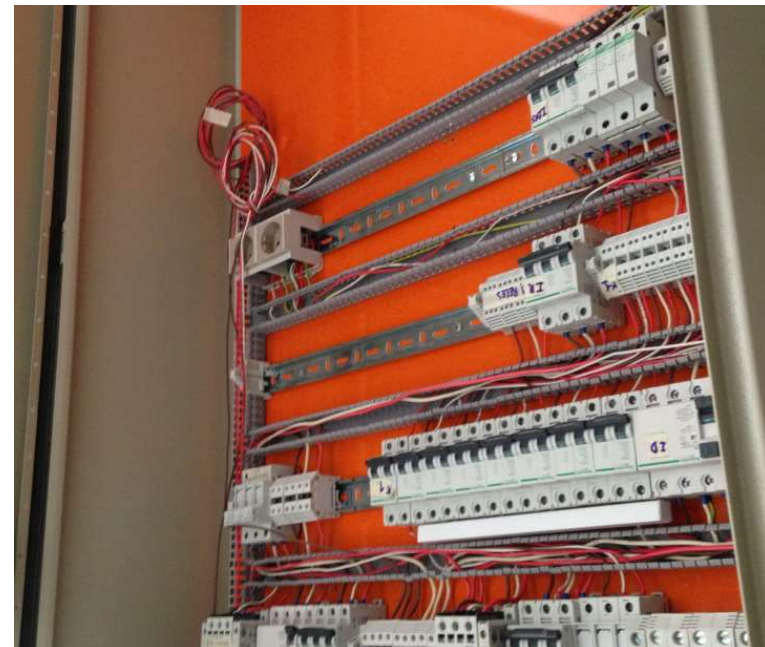
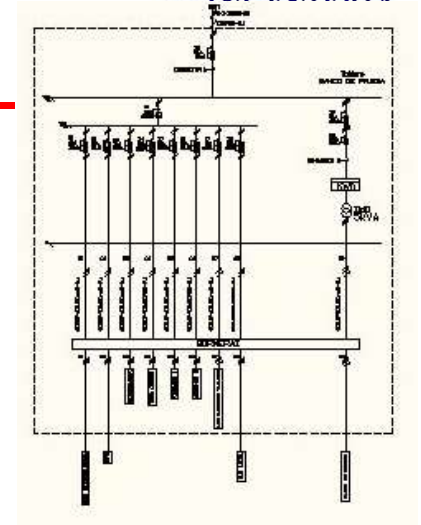
Análisis del clima de vientos



- ❖ **Diseño estructural**
 - ❖ **Vientos extremos**
 - ❖ **Turbulencia**



- ❖ **Diseño de conexión eléctrica**
 - ❖ **Tablero**
 - ❖ **Conexión - UTE**



- **Mediciones**
 - **Potencia**
 - **Velocidad de viento**
 - **Valor medio**
 - **Turbulencia**
 - **Calidad del servicio**
 - **Emisiones acústicas**
 - **Vibraciones mecánicas**

IEC 61400-2:2013



Conclusiones

- Se identificaron tres tipos de zonas urbanas
- Zona de ALTA DENSIDAD – No parece adecuada para la explotación eólica
- Zonas de BAJA y MEDIA DENSIDA
 - Viable – Altura
- Viabilidad
 - Elevados consumos
 - Tarifa Simple
 - Ahorro de energía
 - Inversión < 5000 U\$S/kW
- Banco de pruebas – Desarrollo de tecnología

Conclusiones

- **Desarrollo de tecnología**
 - **Aerogeneradores**
 - **Bajo viento**
 - **Elevada turbulencia**
- **Disponer herramientas de evaluación del potencial**
 - **Metodologías de cálculo**
 - **Descripción del terreno**
- **Perfil de las empresas**
 - **Transferencia**
 - **Desarrollo**
- **Interferencia con el medio**
- **Normativa**
 - **Ensayo**
- **Regulación**