



Introducción a la Generación Eólica



E. Eólica

Molinos de viento Europeos

Características fundamentales:

- Sistema de giro
- Números y tipos de palas (forma y dimensiones)
- Posición del rotor y ángulo de ataque
- Altura en relación al suelo
- Indicación de dirección de viento

Molino Holandés

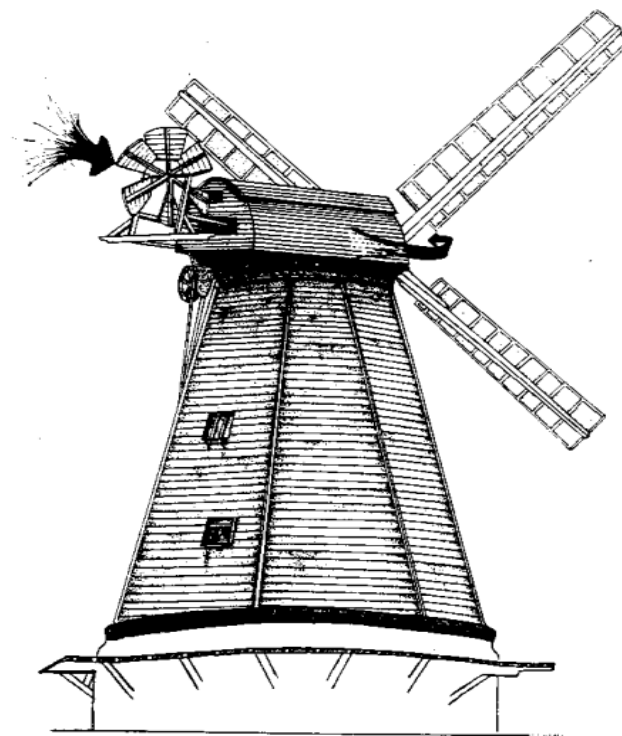
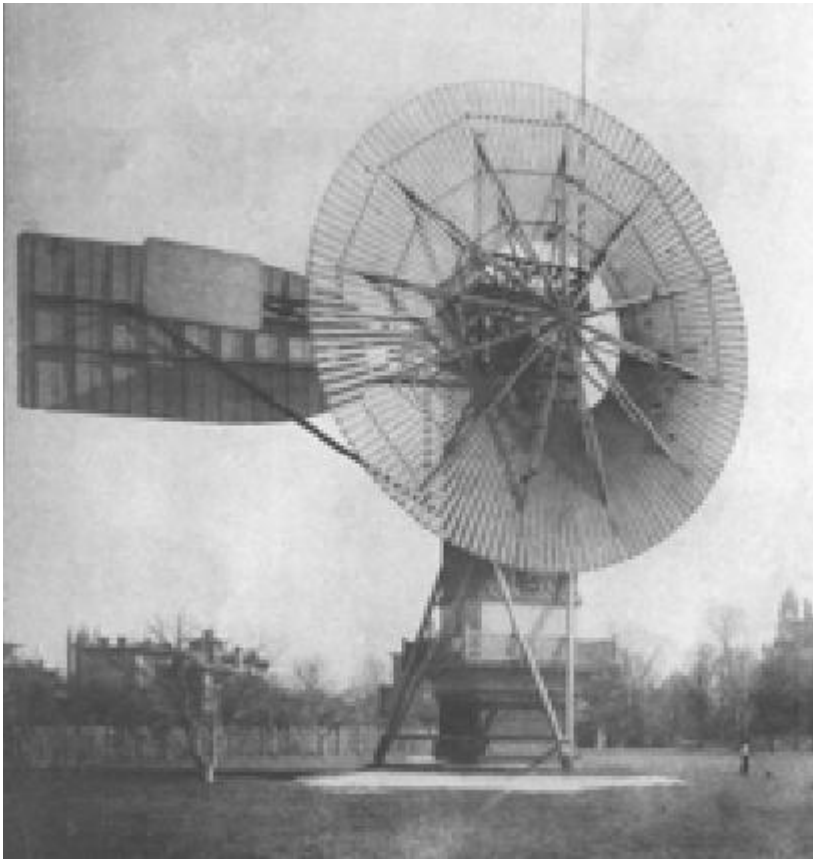


Figure 1. A Dutch Windmill



E. Eólica

Primer molino para producción de Energía Eólica:



Charles Brush
12kW, 1888



E. Eólica

Paul de La Cour

Pionero de la Energía Eólica , Dinamarca:

Primeros Cursos sobre Energía Eólica.

Aplicación para electrificación de escuelas rurales y generación de hidrógeno

1897-1894, máquinas de 20 a 35 kW





E. Eólica

DINAMARCA: (1920), cerca del 3% de la energía eléctrica consumida proviene de generación eólica.

Paul de La Cour

Primeros egresados en Ingeniería Eólica, Año 1904





E. Eólica

Principio de la conversión de la Energía Eólica

TE: Captura parte de la energía cinética del viento y la convierte en energía eléctrica.

Surge interacción del viento sobre las palas. Por lo tanto Fuerzas Aerodinámicas, sustentación y arrastre (lift + drag)

2 efectos:

Torque impulsor (aerodinámico) → movimiento de **rotación** (rotor → tren de transmisión → generador eléctrico), (principio de la conversión energética).

+

Cargas aerodinámicas (estáticas y dinámicas, sobre **tren de transmisión + arrastre** sobre rotor y torre, etc.) → afectan vida útil y calidad de energía eléctrica.



E. Eólica

Fundamentos de la Generación Eólica

PRINCIPIOS

¿Que es el aire?

El aire es un fluido gaseoso compuesto principalmente por nitrógeno y oxígeno. El aire puede ser comprimido y tiene una viscosidad, la cual hará que aparezcan sobre los cuerpos fuerzas de origen viscoso.

En el campo de la energía eólica:

-Asumimos que el aire es un fluido incompresible

-La viscosidad tiene un papel preponderante en la aerodinámica de la turbina

ENERGIA CÍNÉTICA DEL AIRE =
$$\frac{1}{2}mU^2$$



E. Eólica

PRINCIPIOS

Ecuación de Bernoulli

En condiciones estáticas, la energía total del fluido, la cual comprende la energía cinética, la energía de presión estática y la energía potencial se mantiene constante si no se realiza ningún trabajo sobre el fluido o este no realiza ningún trabajo.

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p + \rho gh = cte$$

Valida solo para
fluidos
incompresibles
y no viscosos!!

$$\frac{1}{2}\rho U^2$$

Energía cinética

$$p$$

Energía de presión estática

$$\rho gh$$

Energía potencial



E. Eólica

Principio de funcionamiento: TEORIA DEL DISCO ACTUADOR

La turbina eólica extrae la energía cinética del viento, con el fin de convertirla en energía mecánica y luego en energía eléctrica.

Energía cinética del viento = $\frac{1}{2}mV^2$

Energía cinética contenida
en un determinado
volumen de aire

Pero la potencia del viento es definida como $\frac{\text{energía_cinética}}{\text{tiempo}}$

La variación de la masa con el tiempo se llama flujo másico, y esta relacionada con la que pasa por un área en un determinado tiempo

Reemplazando,

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

Potencia del aire que
atraviesa un área
determinada

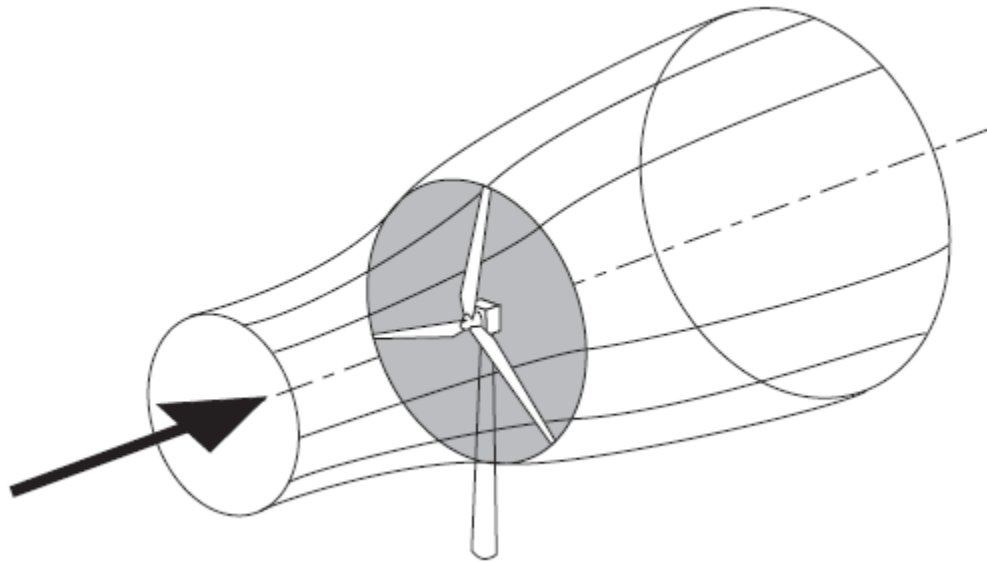
$$\frac{dm}{dt} = \dot{m} = \rho AV$$



E. Eólica

TEORIA DEL DISCO ACTUADOR (Base del principio de la Eólica)

Basándonos en la ecuación de Bernoulli, vamos a desarrollar la teoría del disco actuador.



La misma presupone al área que cubre el rotor como un disco “poroso”, y la turbina está inmersa en un tubo de corriente, es decir, no hay flujo de aire que se intercambie entre el interior y el exterior del tubo



E. Eólica

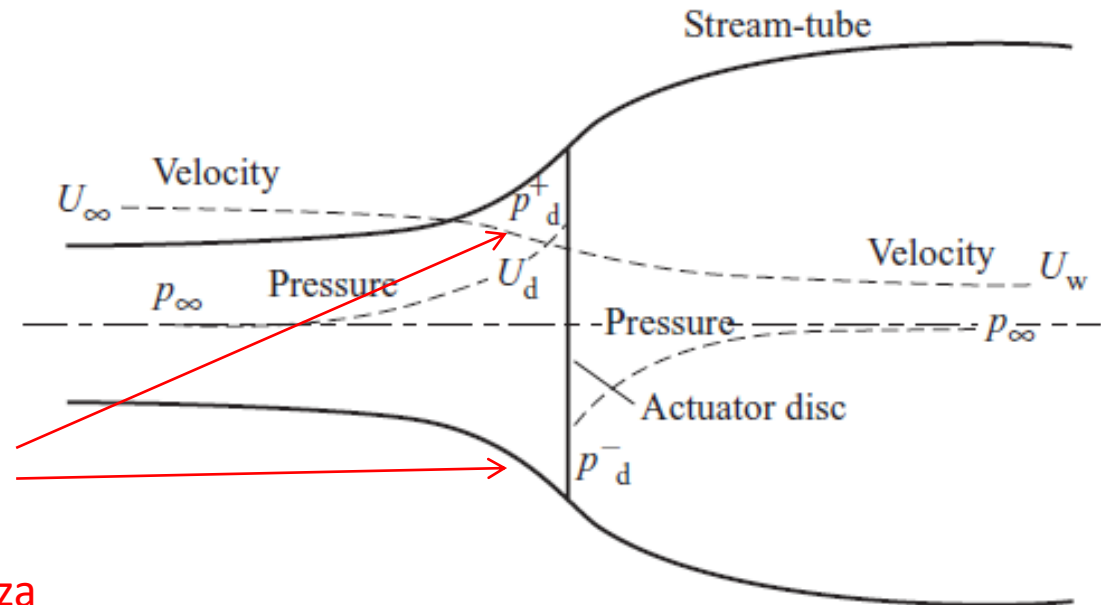
TEORIA DEL DISCO ACTUADOR

Basándonos en lo anterior, graficamos como la velocidad y la presión del aire varían a través de la turbina

Flujo másico cte. $\rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w$

Velocidad en el disco, "a" es llamado factor de inducción del flujo axial

$$U_d = U_{\infty}(1 - a)$$



La extracción de energía se realiza por la diferencia de presiones que existe sobre el disco, lo cual origina una fuerza sobre él.

Por Bernoulli, se calculan las presiones a ambos lados del disco obteniéndose

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2} \rho (U_{\infty}^2 - U_w^2)$$

Fuente = [Burton]



E. Eólica

TEORIA DEL DISCO ACTUADOR

Desarrollando,

Al pasar el aire por la turbina, sufre un cambio en su velocidad, y la tasa de cambio de la cantidad de movimiento es igual al cambio de velocidad multiplicado el flujo másico

$$\text{tasa_de_cambio_cantidad_movimiento} = (U_{\infty} - U_w) \rho A_d U_d$$

Esta variación de la cantidad de movimiento es debida a la diferencia de presión en el disco,

$$(p_d^+ - p_d^-) A_d = (U_{\infty} - U_w) \rho A_d U_{\infty} (1 - a)$$

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2} \rho (U_{\infty}^2 - U_w^2)$$

$$U_w = (1 - 2a) U_{\infty}$$

MITAD DE LA VELOCIDAD SE PIERDE ANTES DEL DISCO Y MITAD DE LA VELOCIDAD SE PIERDE DESPUÉS DEL DISCO



E. Eólica

TEORIA DEL DISCO ACTUADOR

Volviendo a la fuerza ejercida por el aire sobre el disco,

$$F = (p_d^+ - p_d^-)A_d = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1 - a)$$

Y como esta fuerza ejerce un trabajo sobre el disco, definimos potencia como

$$\text{Power} = F U_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2$$

Y definimos un coeficiente de potencia C_p como

$$C_P = \frac{\text{Power}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d}$$

Donde, el denominador es la potencia del viento y $C_P = 4a(1 - a)^2$



E. Eólica

LIMITE DE BETZ

El límite de Betz indica cual es el máximo valor que puede tomar C_p , o sea, que indica cual es la máxima extracción de energía posible

Recordamos $C_p = 4a(1 - a)^2$

Derivando e igualando a cero $\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0$

Obtenemos $a=1/3$, y un $C_p=0,593$

Se puede extraer como máximo ideal un 59,3% de la energía cinética del aire a través del rotor de una turbina eólica.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot U_{\infty}^3 \cdot A_d$$

- Turbina de 20m de pala
- Velocidad de viento incidente 7m/s (25 km/h)
- Densidad del aire 1,225 kg/m³ (nivel del mar)
- $C_p=0,4$

POTENCIA = 105,6 kW



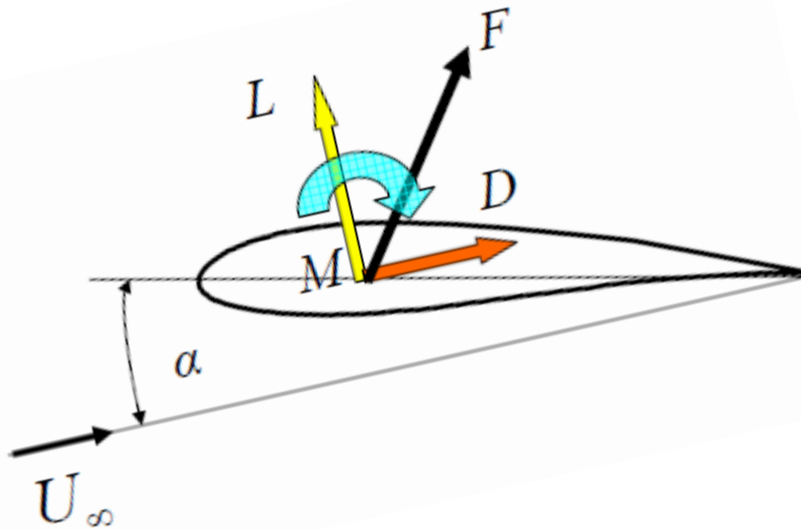
E. Eólica



E. Eólica

AERODINÁMICA 2-D

La distribución de presiones generan la fuerza de sustentación (Lift) y la de arrastre (Drag)



L Lift perpendicular al viento incidente
Drag paralelo al viento incidente



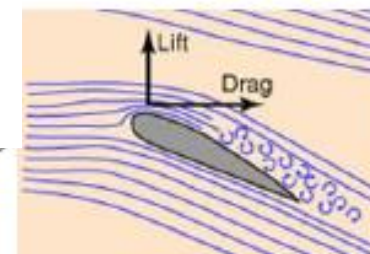
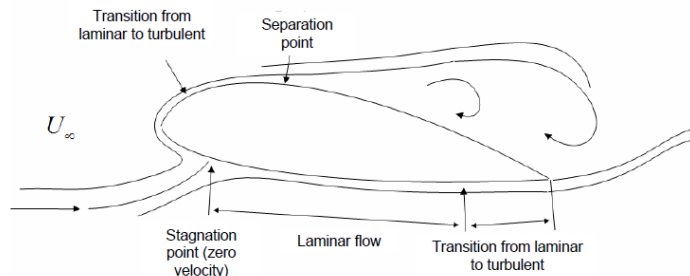
E. Eólica

AERODINÁMICA 2-D

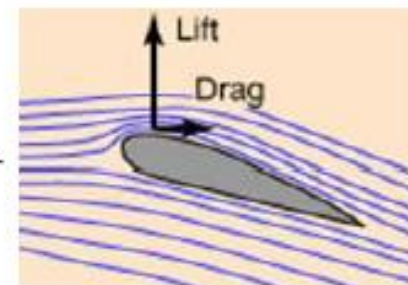
<https://www.youtube.com/watch?v=IDw8WEsQr64>

Curvas C_l , C_d , y C_m

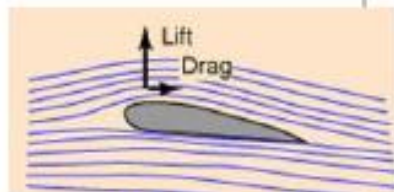
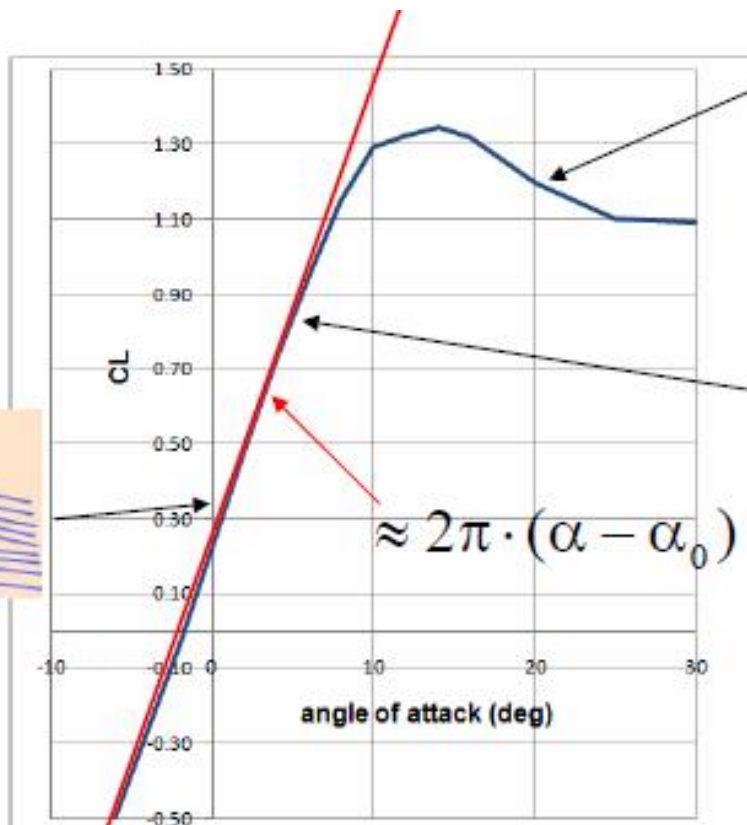
Lift, Drag & Moment



Separated flow - stall



Attached flow



Attached flow



E. Eólica

Conceptos principales de clasificación de las TE

- Según el tipo de rotor
- Velocidad de rotación (control de velocidad)
- Tecnología para el control de potencia
- Tecnología para la conversión de la energía a eléctrica
- N° de palas





E. Eólica

Clasificación según el tipo de rotor

El rotor se encuentra soportado por una estructura. Gira por acción de cargas impulsoras (aerodinámicas) debido a la interacción con el viento.

Eje Vertical

- ❖ Transmisión y generador ubicados a nivel de piso.
- ❖ Omnidireccional, no necesita reorientación.
- ❖ Buena adaptación a vientos fuertes
- ❖ Por lo general captura de energía reducida, baja altura por lo tanto bajos vientos.
- ❖ Perfil de viento (wind shear) por proximidad al suelo muy variable, alto nivel de turbulencia.
- ❖ Gran extensión de terreno en equipos grandes por necesidad de tensores para sostenimiento de estructura (Darrieus).

Eje Horizontal - **Uso masivo hoy en día en Potencia**

- ❖ Fundamentalmente 2 y 3 palas
- ❖ Rotor gira sujeto a góndola en parte superior sobre soporte estructural (Tower) de altura generalmente igual a diámetro del rotor, por lo tanto vientos de mayor velocidad y menos turbulentos (mejor perfil de vientos)
- ❖ Transmisión y generador ubicados a nivel de góndola
- ❖ Mantenimiento considerable si por ejemplo se compara con otras renovables (Ej. Solar PV)
- ❖ Mecanismo de orientación (Yaw) posiciona rotor y góndola en la dirección del viento incidente



E. Eólica

Clasificación según control de velocidad de rotación:

Velocidad fija Vs Velocidad Variable

Velocidad fija:

Ventajas: equipos sencillos, sin necesidad de conversión de energía eléctrica, conexión directa a la red, uso de generador asíncrono muy robusto y de bajo mantenimiento.

Desventajas: variabilidad de potencia entregada “muy ligada a la del viento”, necesidad de potencia reactiva de la red (por lo tanto necesito conexión a la red, complicación para sistemas aislados). Déficit de producción a velocidades de viento moderadas (menores a la nominal), generación de alto Flicker (parpadeo) en la red. Menor amortiguamiento de cargas, o damping, por encima de velocidad nominal, mayores fatigas por cargas de histéresis. Necesidad de caja de velocidad (Gear Box).

Velocidad Variable:

Ventajas: mejor desempeño a bajas velocidades (mayor producción de energía),

Menor variabilidad de potencia en función del viento generado, independencia de la red (no necesita potencia reactiva de esta), mejor control de cargas de fatigas. Permite trabajar tanto con generación síncrona como asíncrona (SG o IG), bajo contenido de flicker, mejor calidad de energía inyectada. Posibilidad de no uso de caja de velocidad o multiplicadora.

Desventajas: sistemas más costosos y complejos, necesidad de doble conversión AC-DC, DC-AC. Mayor necesidad de control y mantenimiento. Mayor inyección de contenido armónico a la red debido a la necesidad de electrónica de potencia. Mayor complejidad por la necesidad de sincronización con la red.



E. Eólica

Clasificación según la tecnología de control de potencia:

Necesidad de controlar potencia, Fijada por la potencia nominal del generador, la electrónica de potencia y el sistema de transmisión (Drive Train). Alcanzada la velocidad de viento “nominal” el sistema debe regular potencia para no sobrepasar las condiciones nominales especificadas.

Dos Métodos Principales:

Stall Control (control por pérdida aerodinámica) **Vs. Pitch Control** (control por paso de pala).

Stall control: como la velocidad de viento se incrementa, por condición aerodinámica (aumenta el ángulo de ataque del viento incidente) las palas en algún punto entran en pérdida (stall), limitando el desempeño de captura de potencia del rotor, siendo por lo tanto un camino pasivo de regular la salida de la TE.

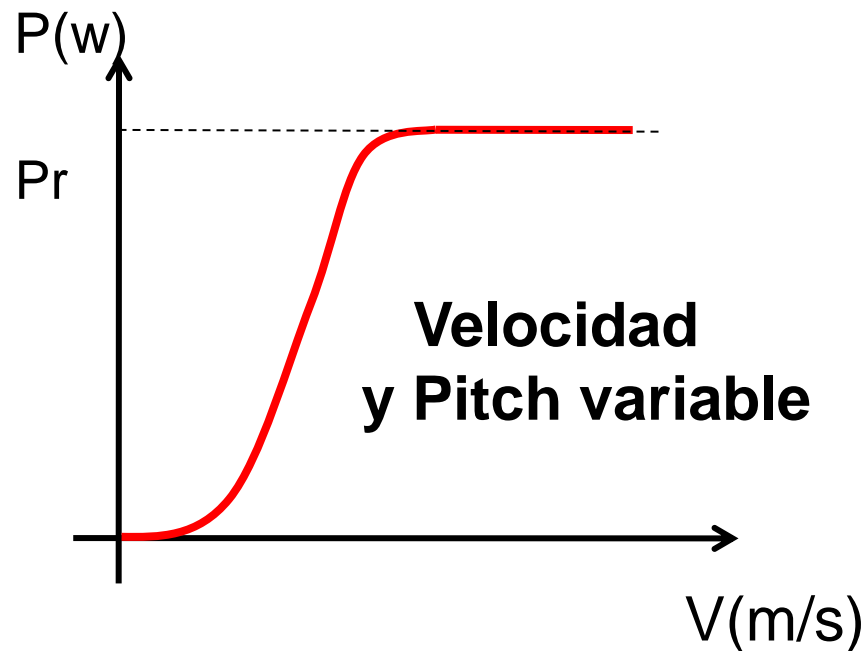
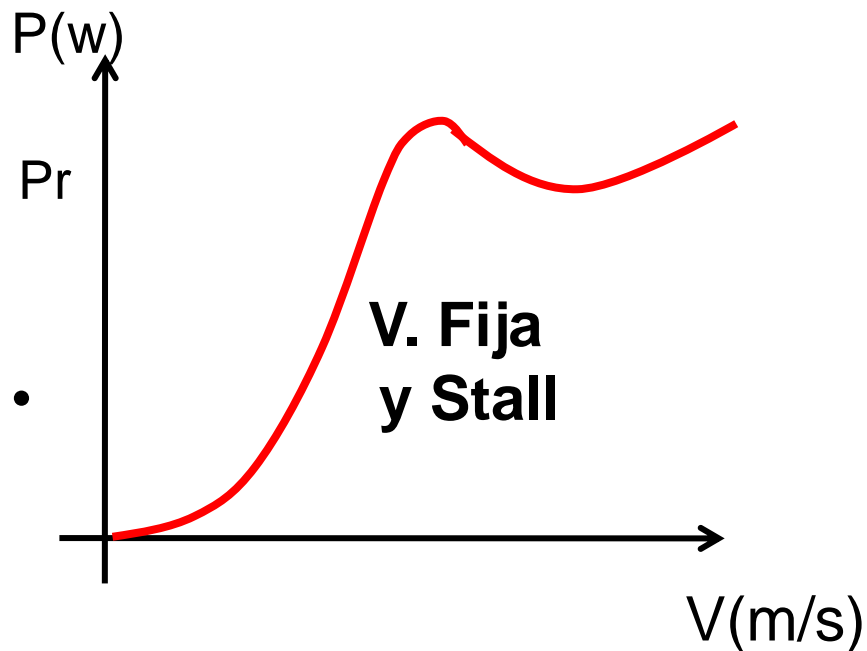
Pitch o paso de pala: El objetivo de paso de pala es reducir (una de las posibilidades) el ángulo de ataque por incremento del ángulo entre la cuerda de la pala y el plano de rotación. Esto disminuye el desempeño del rotor en una zona “lineal” de menor coeficiente de sustentación lo cual permite regular la salida de la TE con variaciones del ángulo de inclinación de las palas.

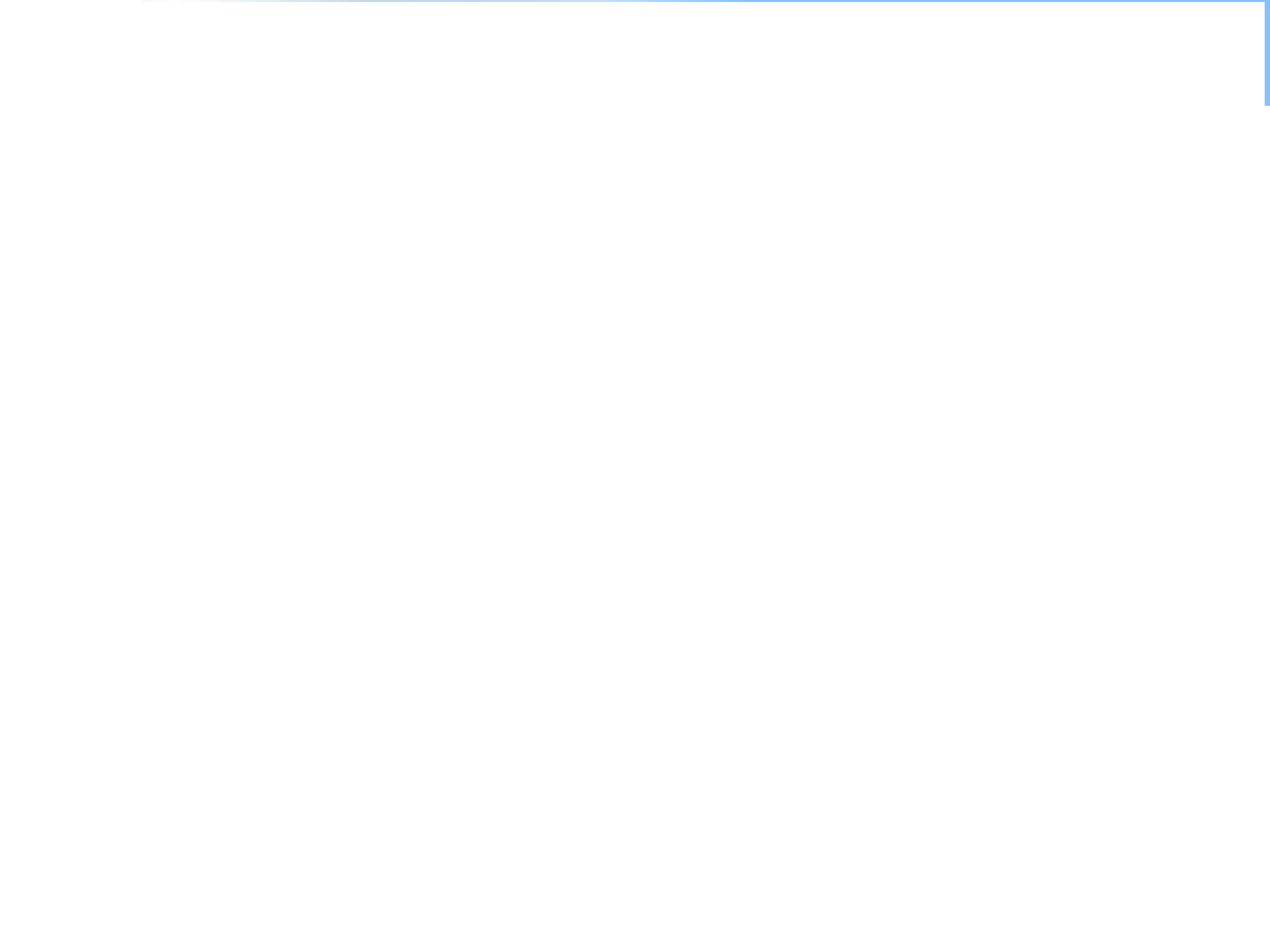


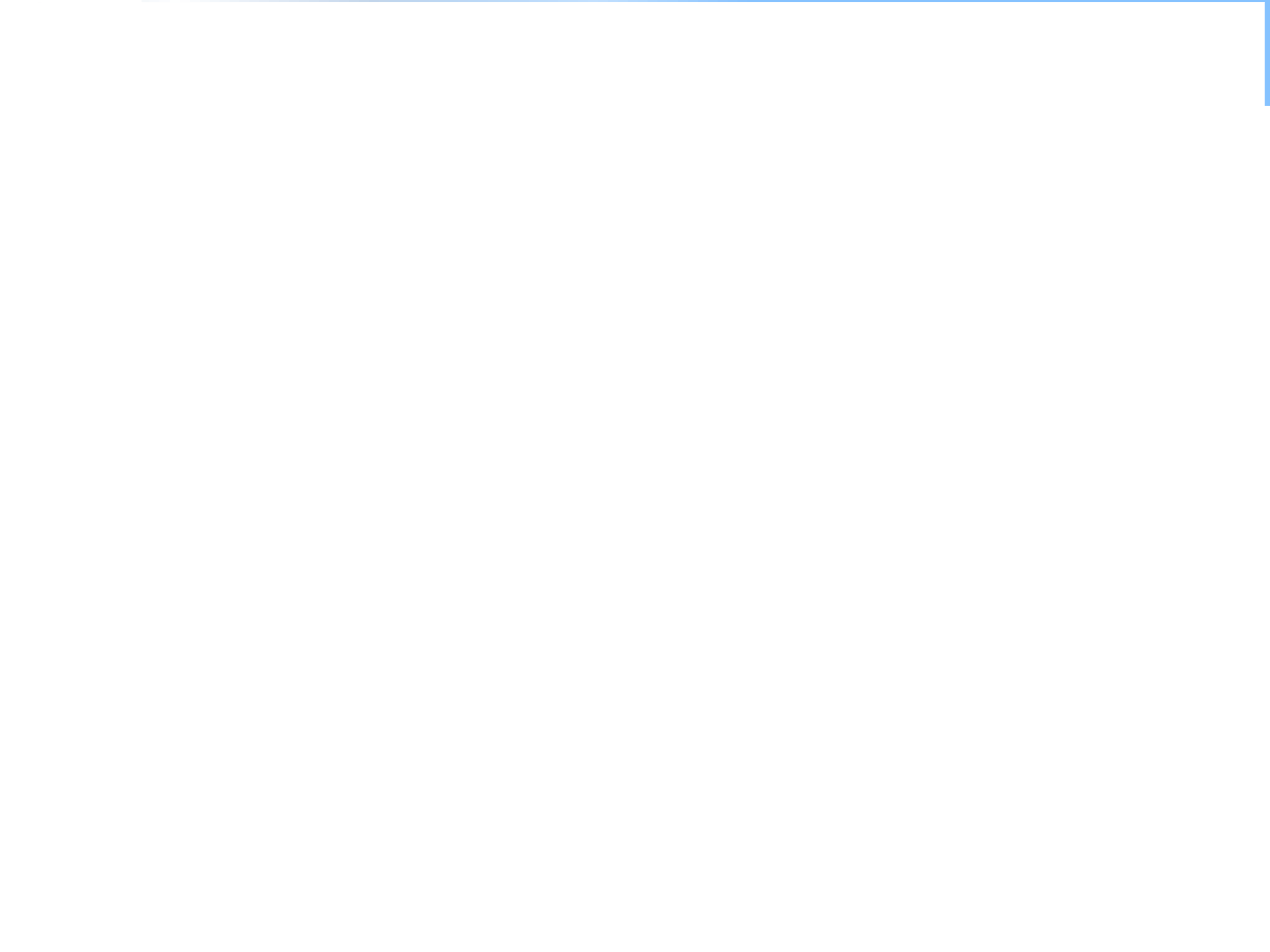
E. Eólica

Curva de potencia, velocidad fija y Stall Vs. velocidad variable y Pitch

Curva de Potencia TE : potencia media entregada por un generador eólico en función de la velocidades del viento.









E. Eólica

Componentes de una TE:

- Rotor**
 - Palas-Hub

- Estructura**
 - Gondola
 - Torre
 - Fundación

- Mecanismos y Accionamientos**
 - Pitch
 - Tren de Transmisión

- Sistema Eléctrico**
 - Generador
 - Electrónica de Conversión (EP)
 - Transformadores
 - Contactores de Mando
 - Alimentación de Respaldo, Sistemas Auxiliares

- Sistema de Control**
 - PLC
 - SCADA





E Eólica

TURBINAS Modernas

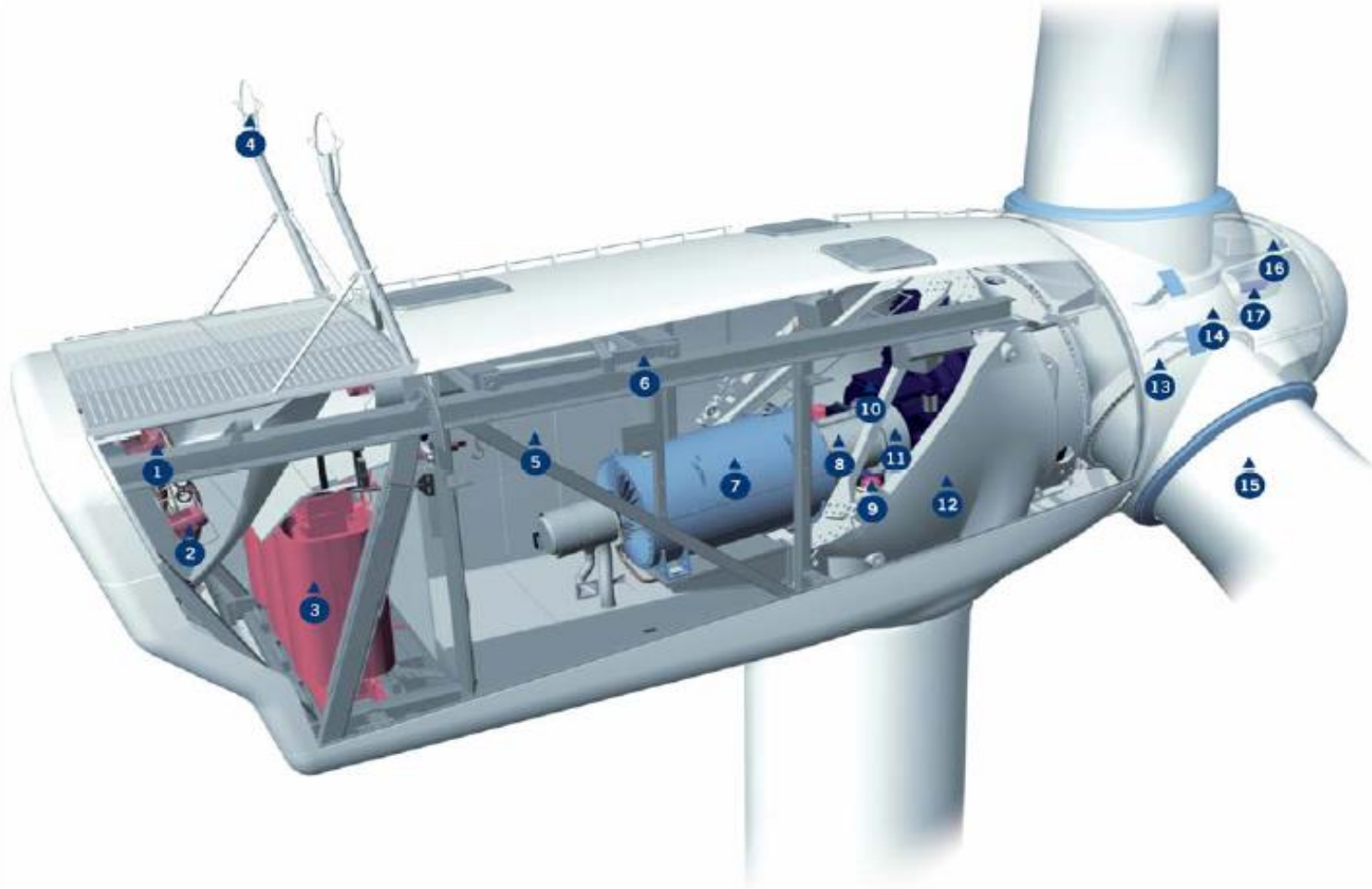
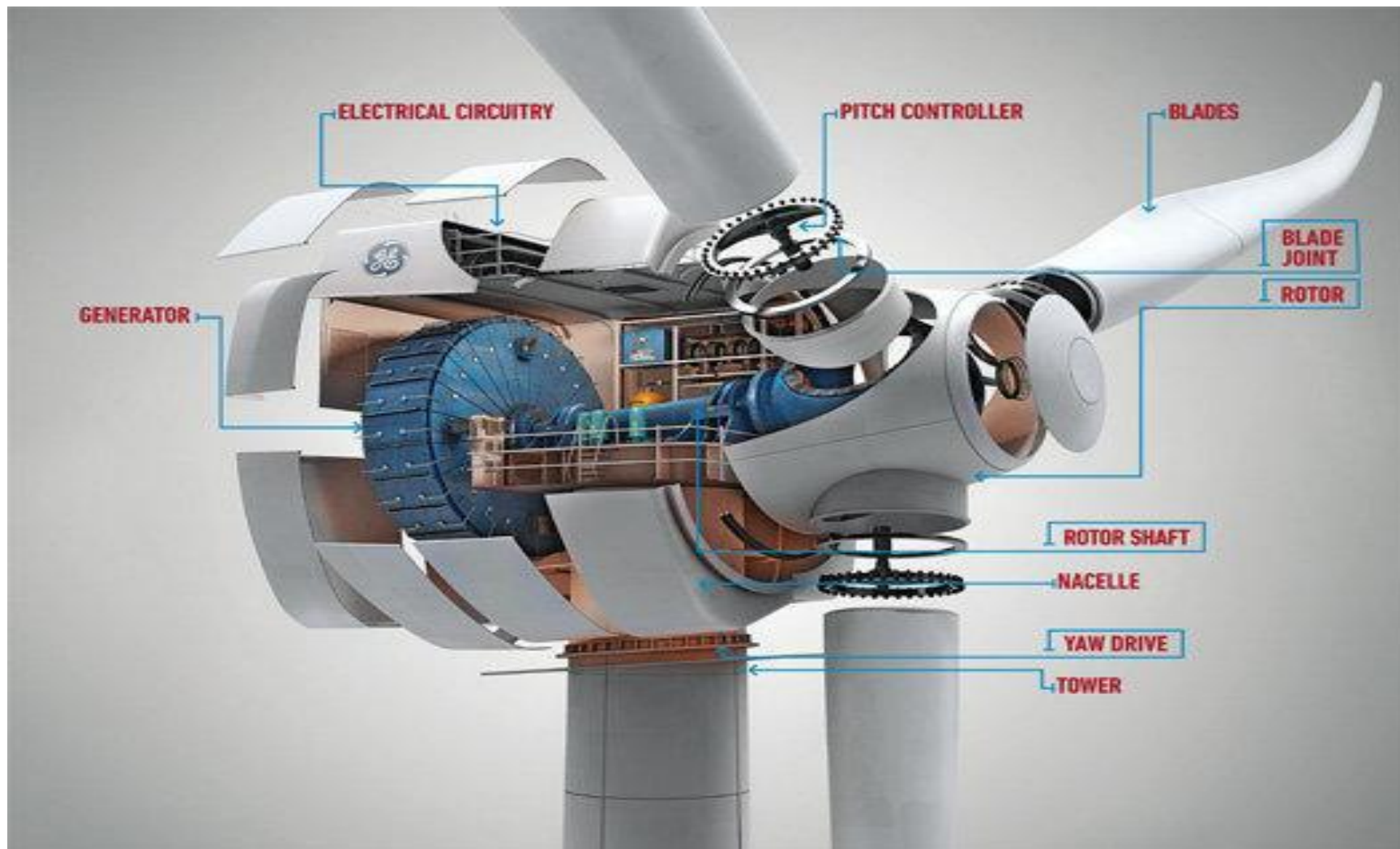


Plate 4 Nacelle Vestas V90 3 MW. Note: 1= oil cooler; 2 = generator cooler; 3 = transformer; 4 = ultrasonic wind sensors; 5 = VMP-Top controller with converter; 6 = service crane; 7 = generator; 8 = composite disc coupling; 9 = yaw gears; 10 = gearbox; 11 = parking brake; 12 = machine foundation; 13 = blade bearing; 14 = blade hub; 15 = blade; 16 = pitch cylinder; 17 = hub controller. (Reproduced by permission of Vestas Wind Systems A/S, Denmark)



E. Eólica





E. Eólica

Construcción de PALAS





E. Eólica





E. Eólica



Fuente: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Diplomatura en Transición Energética



E. Eólica



Fuente: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Diplomatura en Transición Energética



E. Eólica

N° de PALAS: 1 Pala

Ventajas:

- Menor peso y costos

Desventajas:

- Contrapeso
- Mayor velocidad de giro
- Mayor ruido
- Impacto visual





E. Eólica

N° de PALAS: 2 Palas

Ventajas:

- Buen desempeño a vientos bajos
- Menores costo y peso respecto 3 palas

Desventajas:

- Mayores cargas
- Menor C_p (Coef. de potencia) respecto 3 Palas
- Necesidad de mecanismos de balance





E. Eólica

N° de PALAS: 3 Palas

Ventajas:

- Buen balance de cargas
- Menor velocidad de giro
- Máximo C_p
- Menor impacto visual
- Menor ruido

Desventajas:

- Mayores costos
- Mayores pesos





E. Eólica

Fundación:





E. Eólica

Instalación:





E. Eólica

Instalación:



Fuente: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Diplomatura en Transición Energética



E. Eólica

ALGUNAS TURBINAS Modernas

<https://www.youtube.com/watch?v=QQaB1rdGcYY>

<https://www.youtube.com/watch?v=kmN9qD8vXbY> <https://youtu.be/xTlIpD6GHFvA>



E33

330 kW

E44

900 kW

E48

800 kW

E53

800 kW

E70

2.300 kW

E82

2.000 kW

E101
3000 kW

E126

7500 kW

<https://www.youtube.com/watch?v=MgGk2WvK80M> (Enercon)



Gracias por su Atención