



Una Introducción a los Sistemas de Generación Eólica

Dr. Oscar Carranza Castillo

5 de abril de 2013

Introducción

➤ Auge de las Energías Renovables para la obtención de Energía Eléctrica

- ❑ Alto Costo de los Combustibles Fósiles
- ❑ Fuentes Alternativas de Energía

➤ Energía Eólica

- ❑ Estudios de Lugares donde es viable colocar Aerogeneradores.



Sistemas de Generación Eólica

➤ Aerogenerador

❑ Turbina Eólica

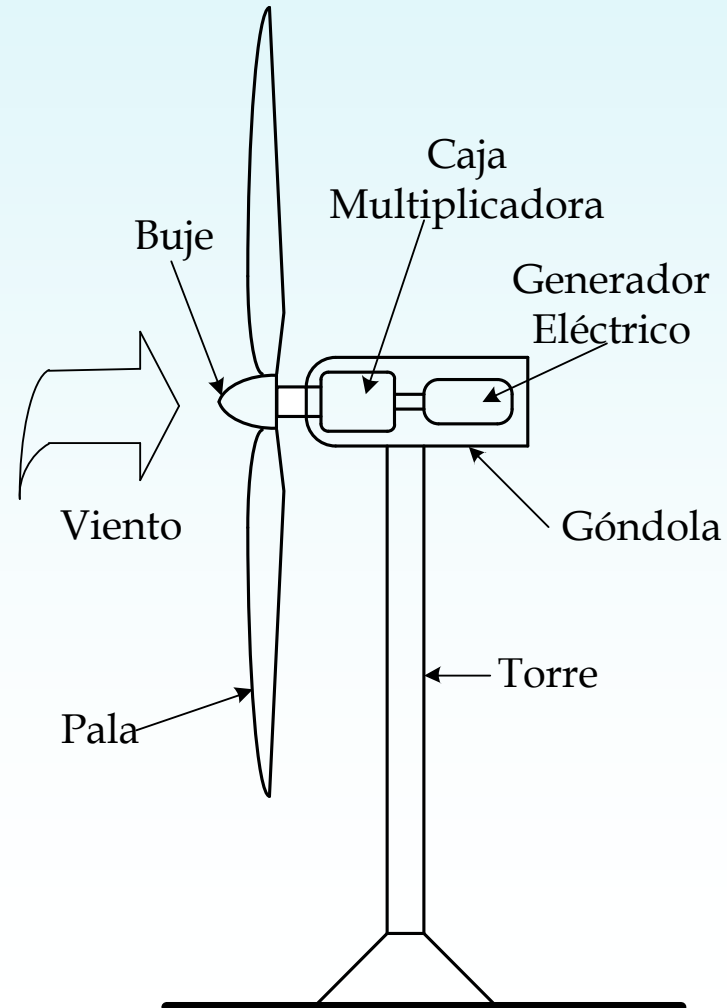
❑ Generador Eléctrico

➤ Aerogenerador

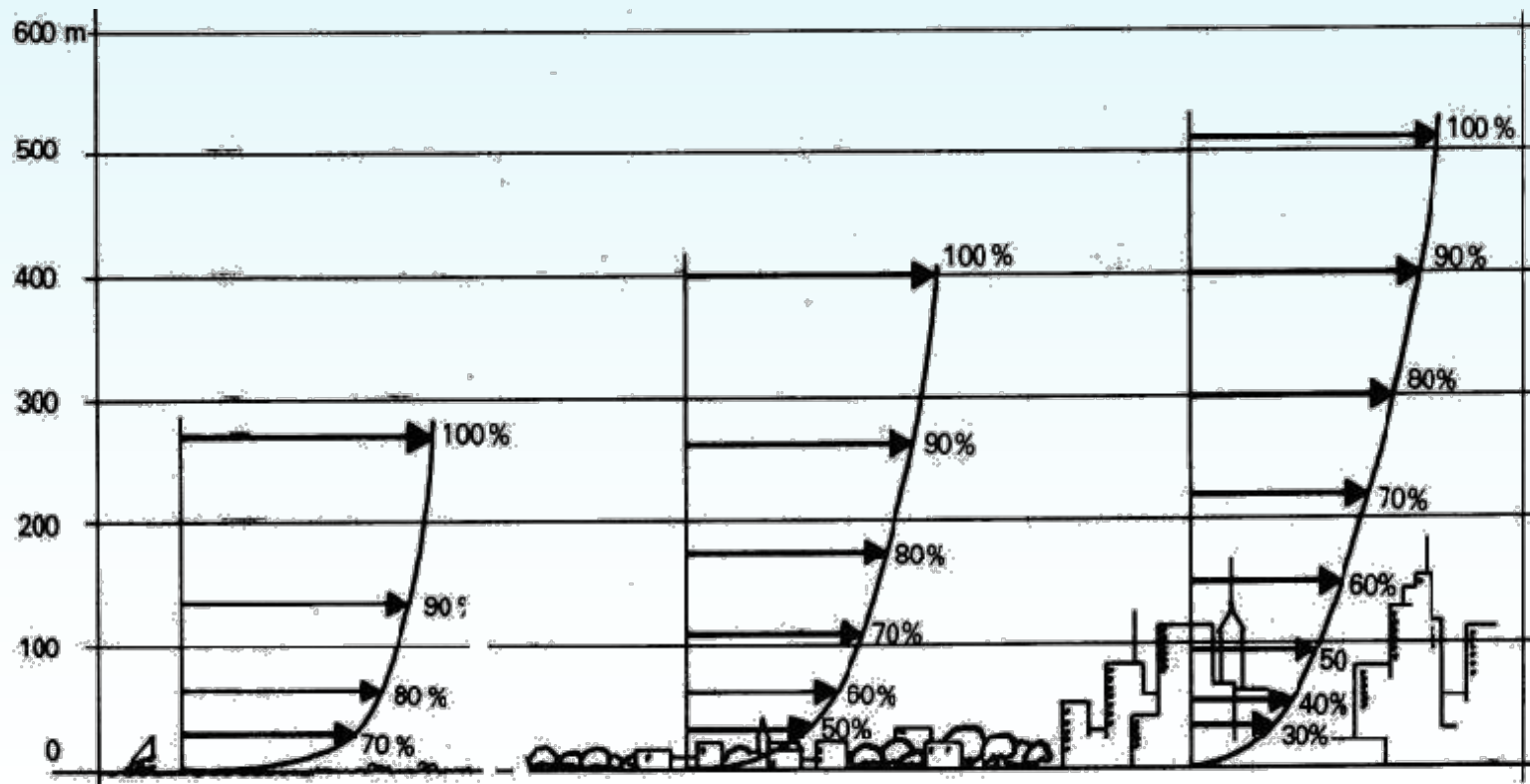
❑ Baja Potencia < 10 kW

❑ Mediana Potencia 10 kW
hasta 1 MG

❑ Alta Potencia > 1 MW



Perfil del Viento

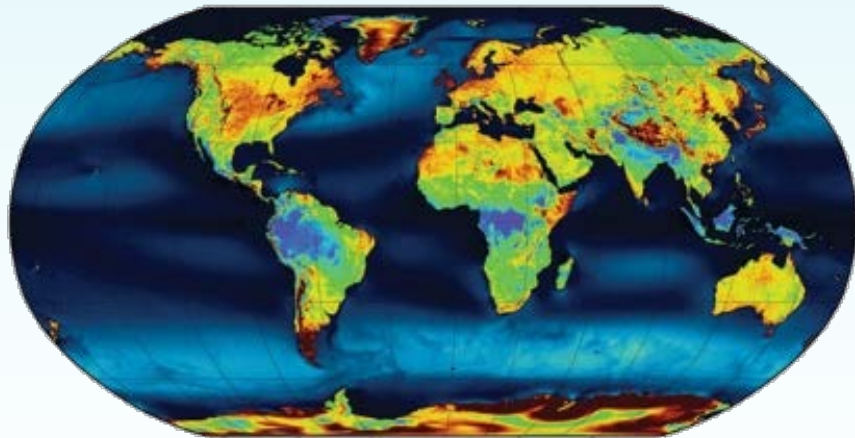


Distribución del Viento

15km Global Wind Map at 80m

Mean Wind Speed for 2025
© Copyright 2008 3TIER Inc.

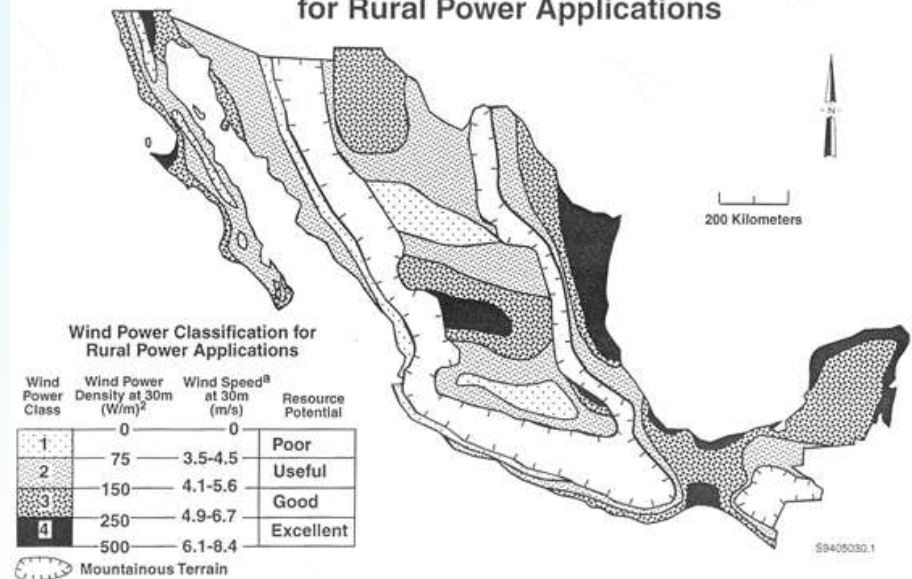
developed by  3TIER



Wind speed over water
5 10 15 20 m/s

Wind speed over land
3 6 9 m/s

Mexico - Preliminary Wind Resource Map for Rural Power Applications



Energía y Potencia del Viento

Energía del Viento

$$E_v = \frac{1}{2}mv^2$$

$$P_v = \frac{1}{2}\rho Av_\omega^3$$

Potencia del aire en movimiento

$$P_v = \frac{dE_v}{dx} = \frac{1}{2}\dot{m}v_\omega^2$$

Área que barren las palas de la turbina

$$A = \pi r^2$$

Flujo de masa del aire por segundo

$$\dot{m} = \rho Av_\omega$$

$$P_v = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 v_\omega^3$$

Energía y Potencia del Viento

Ecuación de continuidad del flujo de aire

El viento al pasar por la turbina se frena, saliendo a una velocidad menor, pero siempre distinta de cero

Ley de Betz → solo se puede convertir el 59.25% de la energía cinética del viento en energía mecánica.

Límite de Betz

Potencia en la turbina

$$P_a = \frac{1}{2} C_p \rho \pi r^2 v_\omega^3$$

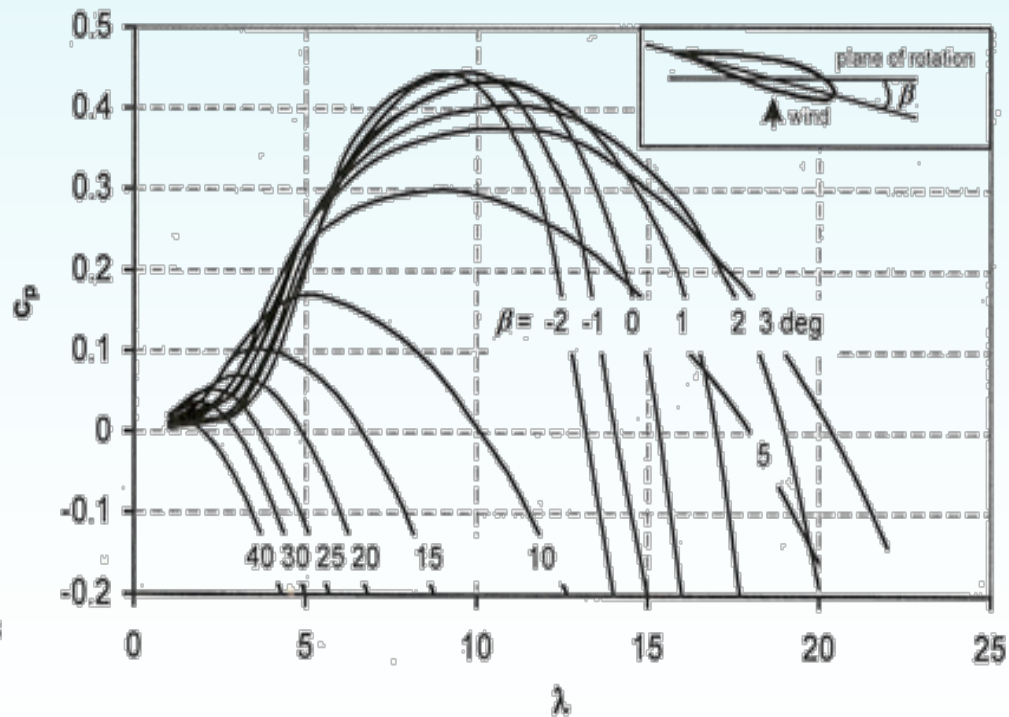
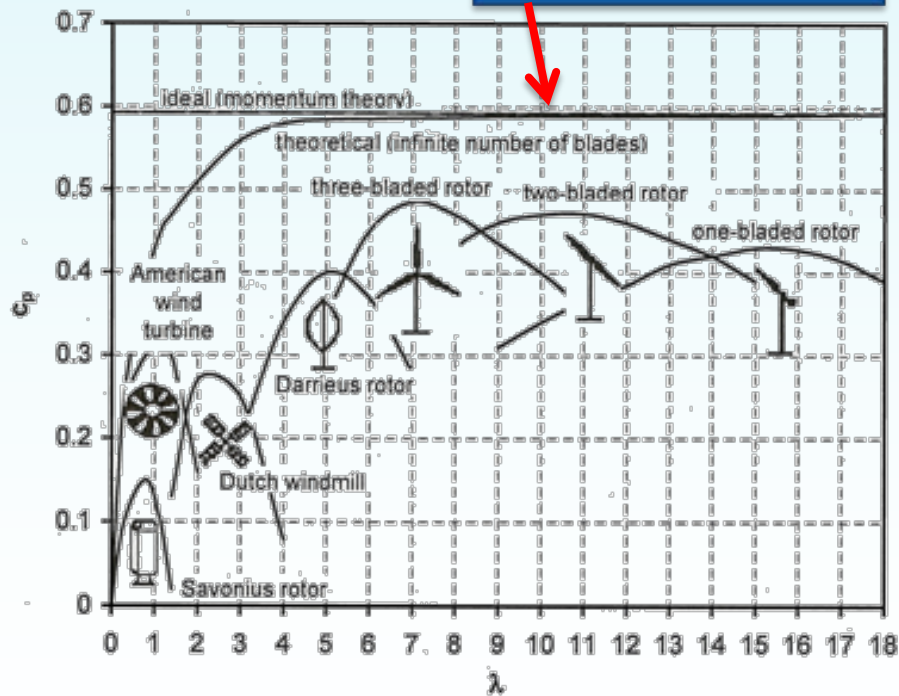
C_p depende fundamentalmente de:

- Diseño mecánico y aerodinámico de la turbina
- Tipo de turbina eólica
- Velocidad específica o “Tip speed ration” (λ).
- Ángulo de paso de las aspas de la turbina (β).

$$\lambda = \frac{r \omega_m}{V_\omega}$$

Coeficiente de Potencia $C_p(\lambda, \beta)$

Límite de Betz



Torque y Coeficiente de Potencia

Torque en el eje de la turbina eólica

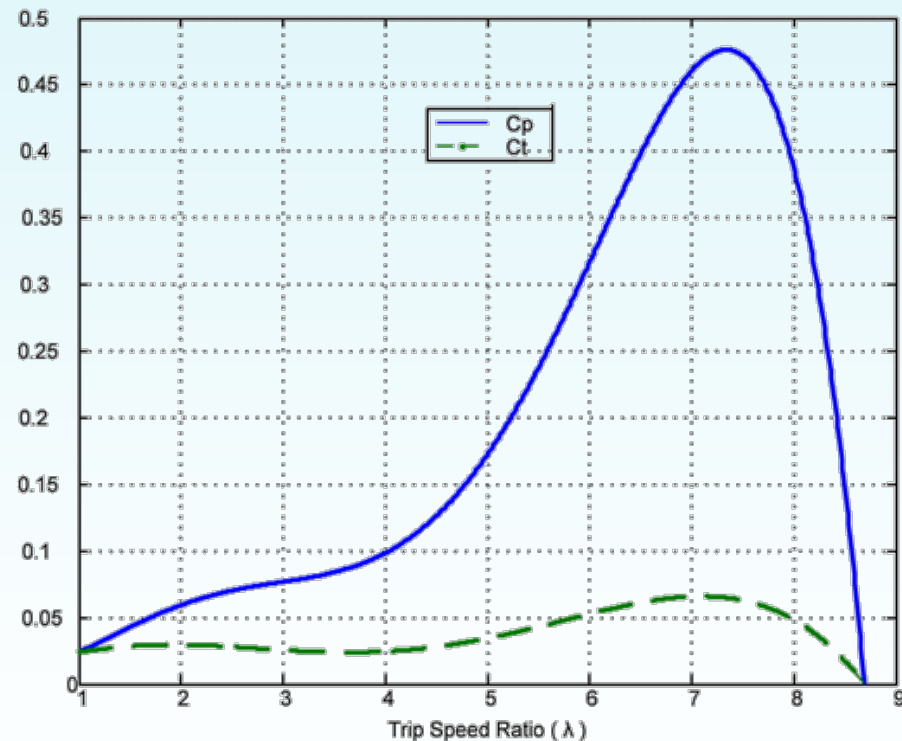
$$T_m = \frac{1}{2} C_t \rho \pi r^3 v_\omega^2$$

$$P_m = T_m \omega_m$$

$$C_p = \lambda C_t$$

$$C_p(\lambda) = a + b\lambda + c\lambda^2 + d\lambda^3 + e\lambda^4 + f\lambda^5$$

$$a = 0.043, b = 0.108, c = 0.146, \\ d = 0.0605, e = 0.0104, f = 0.0006$$

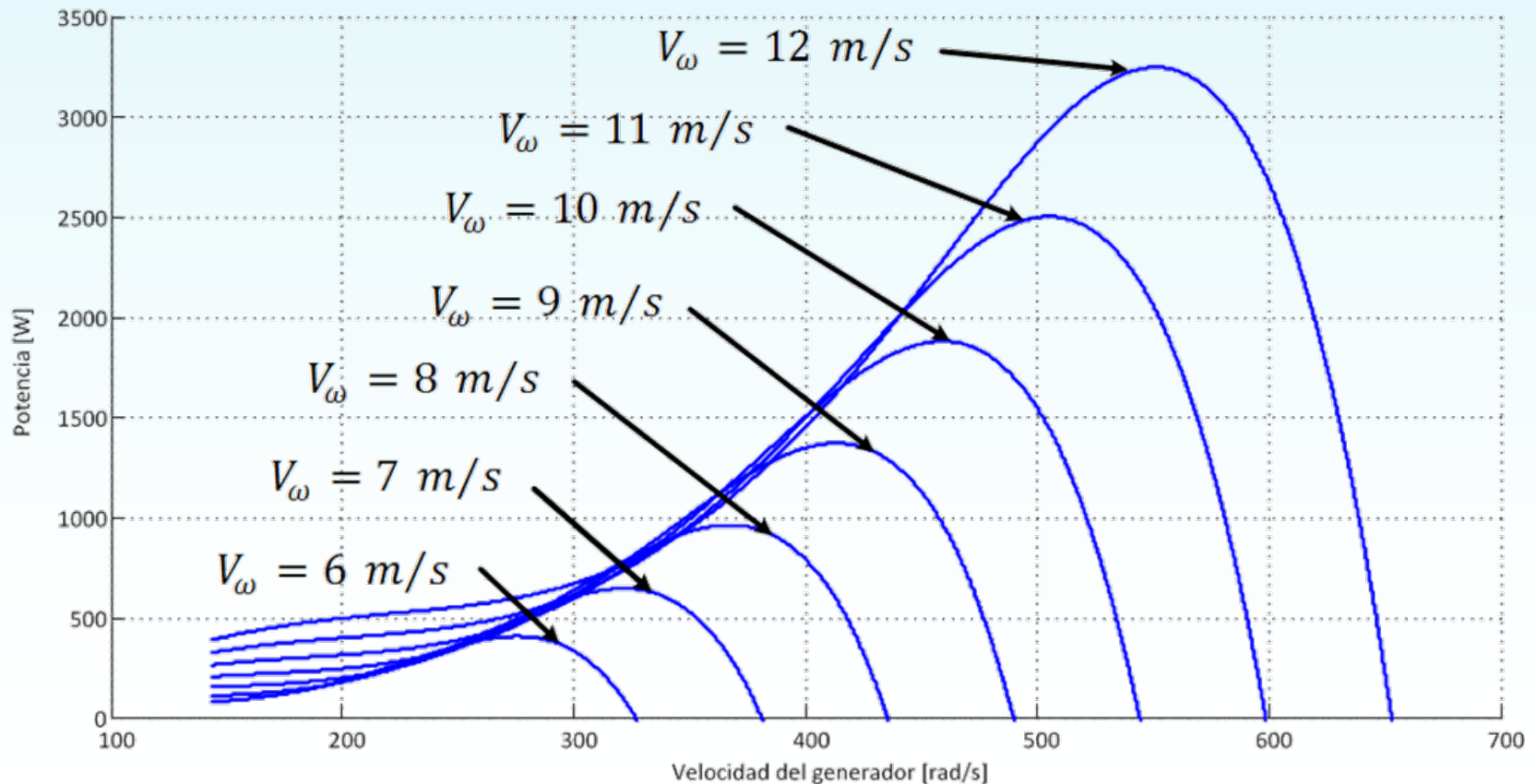


$$C_{p_{max}} = 0.4764 \text{ cuando } \lambda = 7.34 \\ C_{t_{max}} = 0.06594 \text{ cuando } \lambda = 7.095$$

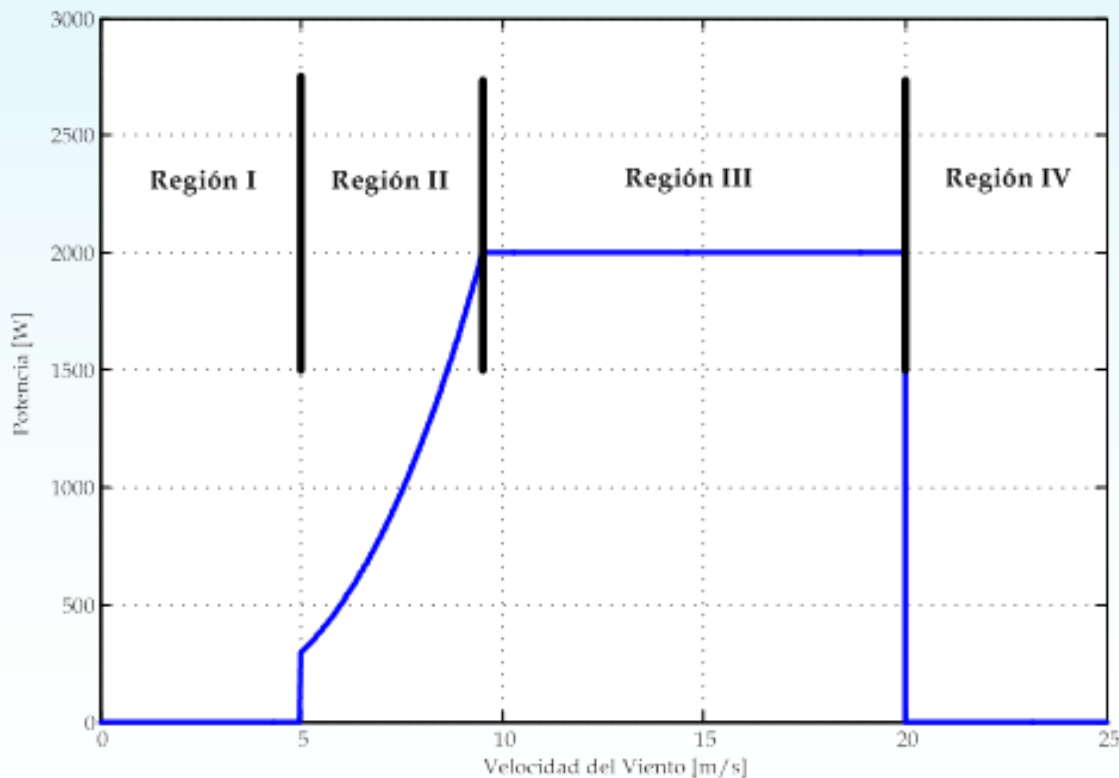
Potencia en la turbina

$$r = 1.525 \text{ m}$$

$$P_a = \frac{1}{2} C_p \rho \pi r^2 v_\omega^3$$



Potencia del Sistema de Generación Eólica

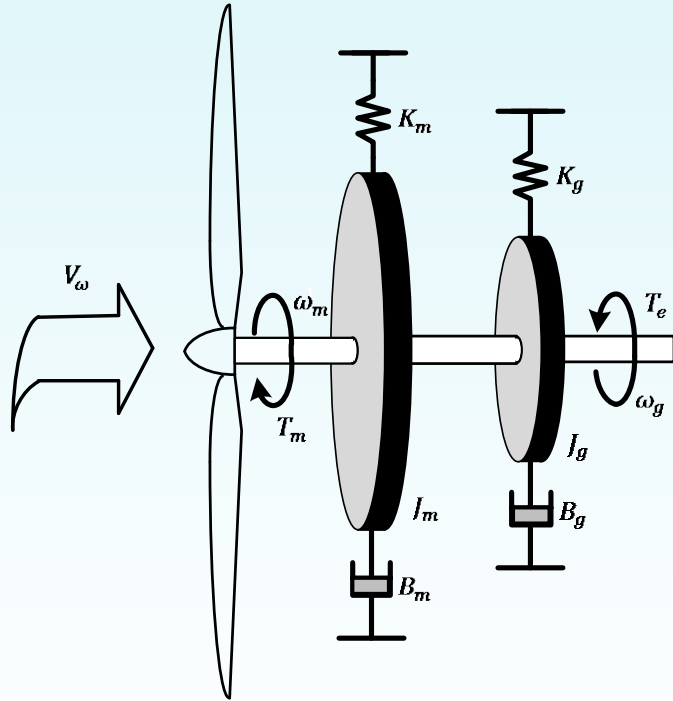


- Región I: Turbina detenida
- Región II: Extracción de Máxima Potencia
- Región III: Limitación de Potencia
- Región IV: Turbina Detenida

Estrategia de Control del Sistema de Generación Eólica

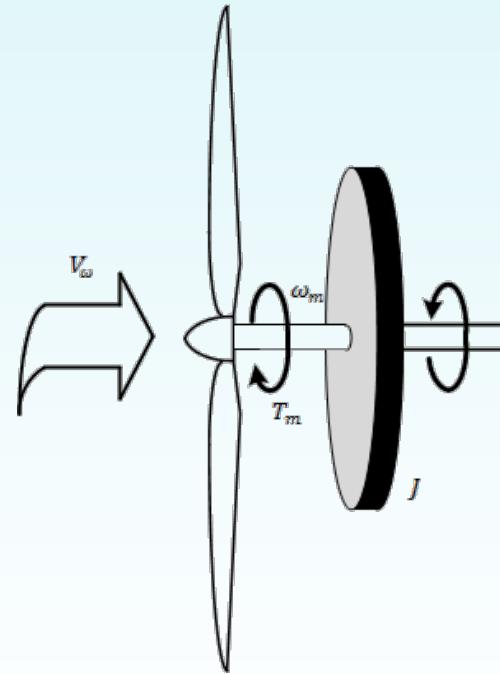
- Velocidad fija, Pitch fijo. ***Regulación pasiva***
- Velocidad fija, Pitch variable. ***Control del ángulo de paso*** (pitch angle control) y ***control de parada activa*** (active stall)
- Velocidad variable, Pitch fijo. ***Regulación pasiva y Punto de operación*** (C_{pmax})
- Velocidad variable, Pitch variable. ***Control del ángulo de paso y control de parada activa***

Modelo del Sistema Mecánico



$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e - K_m \omega_m - B_m \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_m - T_e - K_g \omega_g - B_m \frac{d\omega_g}{dt}$$



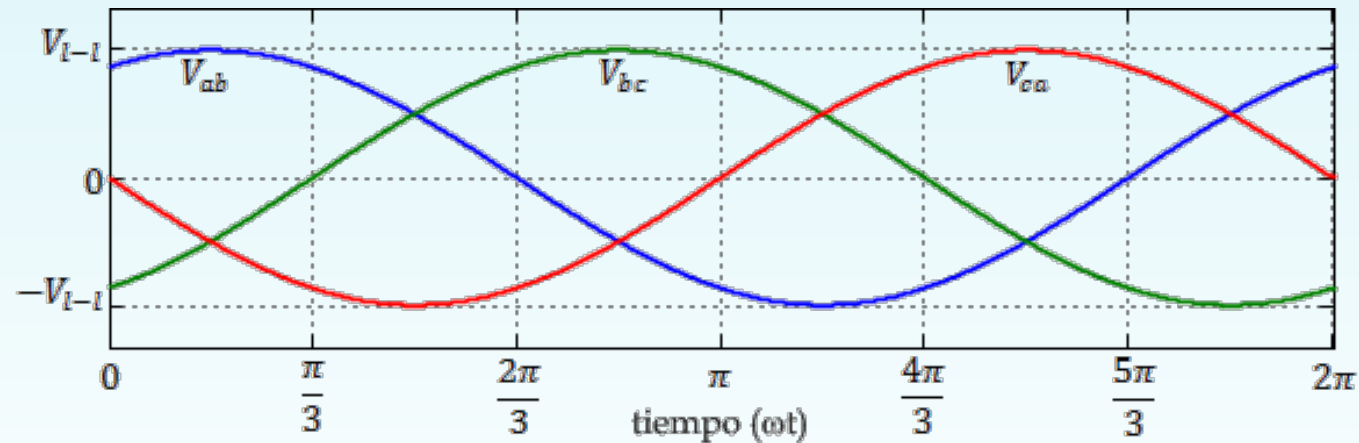
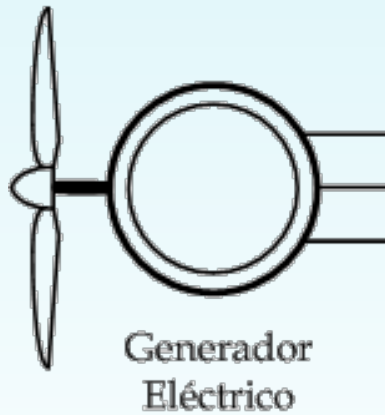
$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m = T_m - T_e$$

Generador Eléctrico

Tipos de generadores

- Generador de inducción (GI)
- Generador de inducción de doble bobinado (GIDB)
- Generador síncrono (GS)
- Generador síncrono de imanes permanentes (GSIP)

Generador Eléctrico



El voltaje y la frecuencia del generador depende de la velocidad del viento

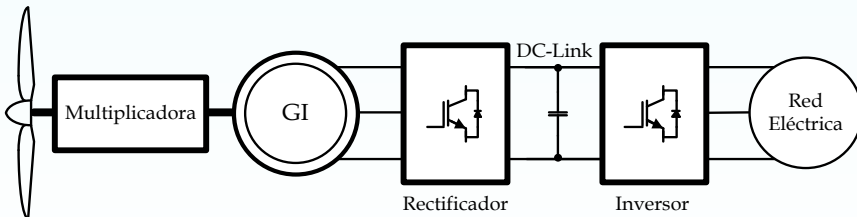
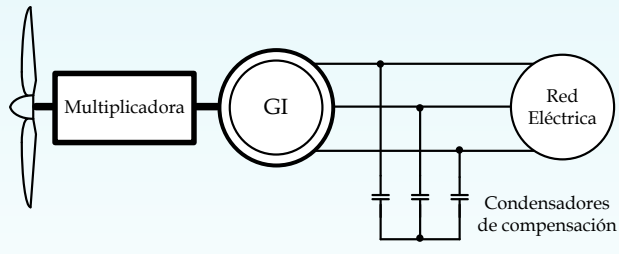
Características del GSIP

$$\omega_e = \frac{n_p}{2} \omega_m$$

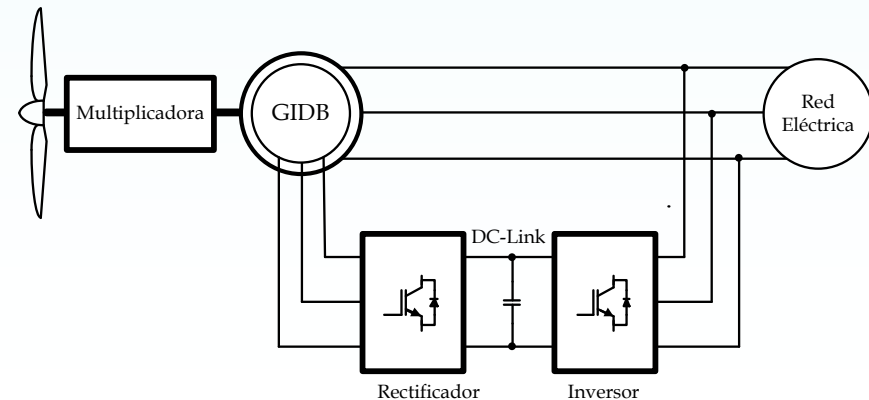
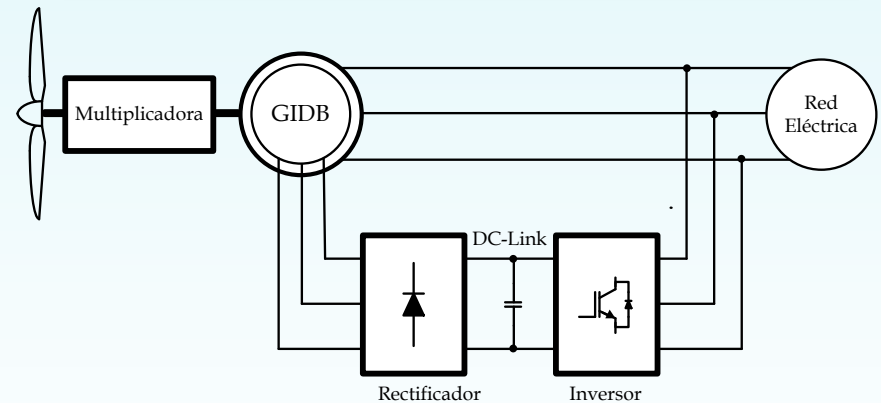
$$E_{A_{pico}} = K_{fem} \omega_m$$

Sistemas de Generación Eólica

Generador de Inducción

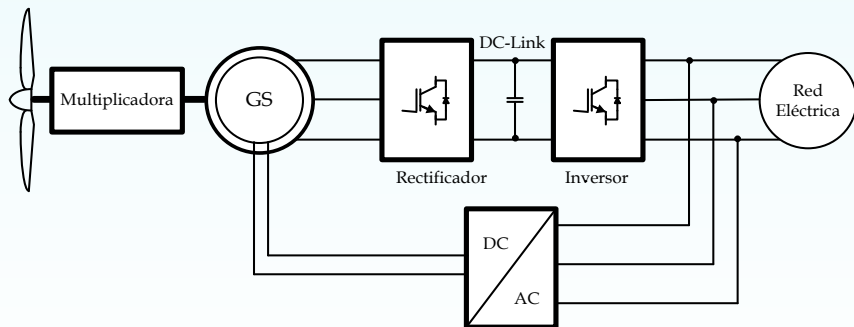


Generador de inducción de doble bobinado

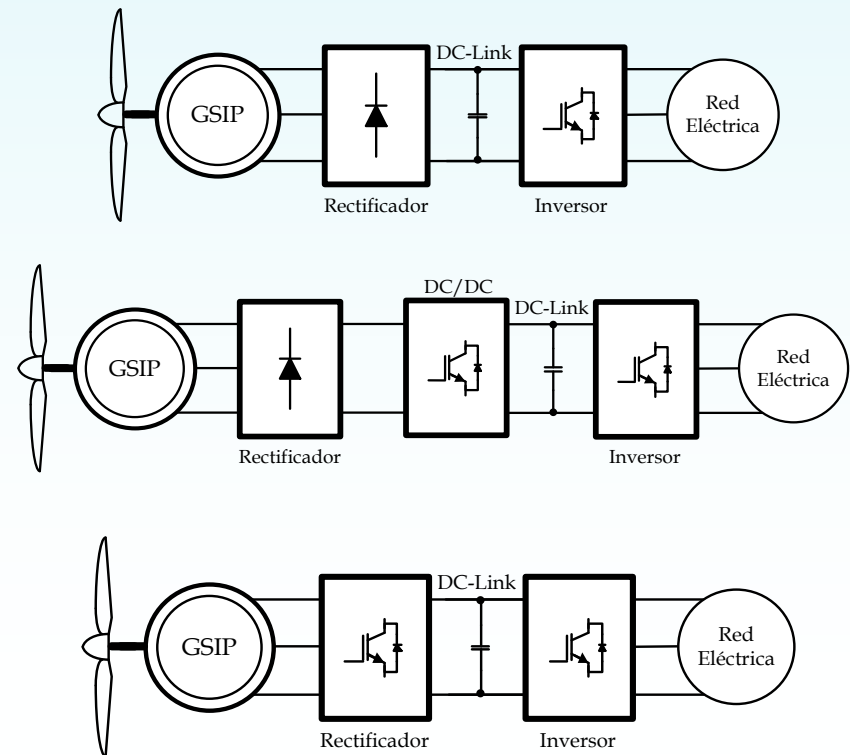


Sistemas de Generación Eólica

Generador síncrono



Generador Síncrono de Imanes Permanentes



Convertidores en SGE con GSIP

Convertidores AC/DC

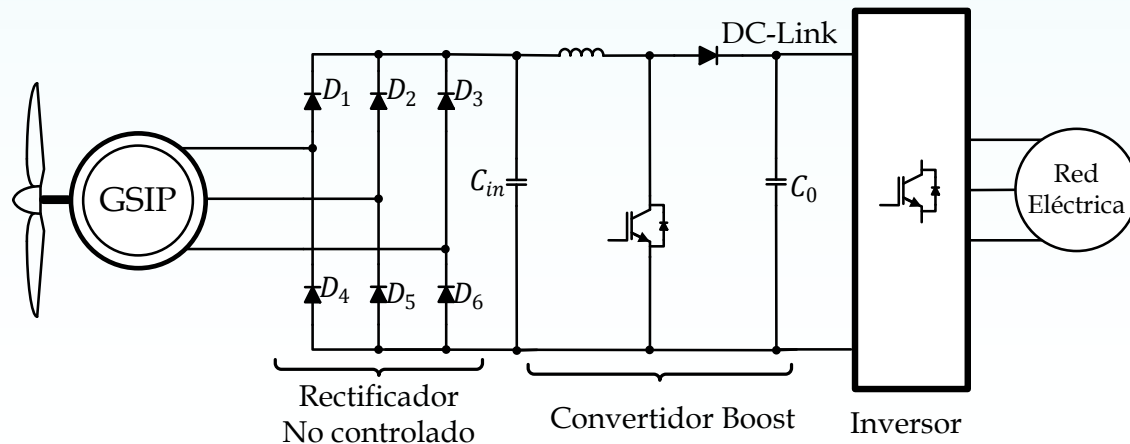
Rectificador No Controlado

Rectificador Boost

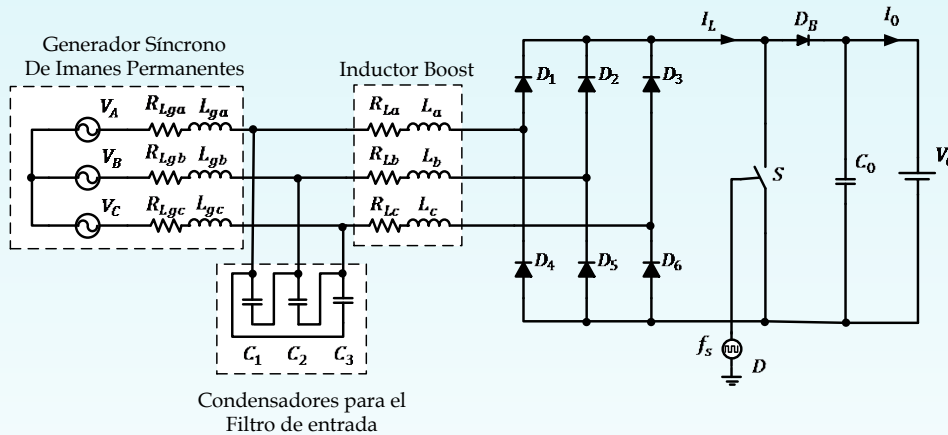
Rectificador Buck-Boost

Rectificador Controlado

Rectificador Boost

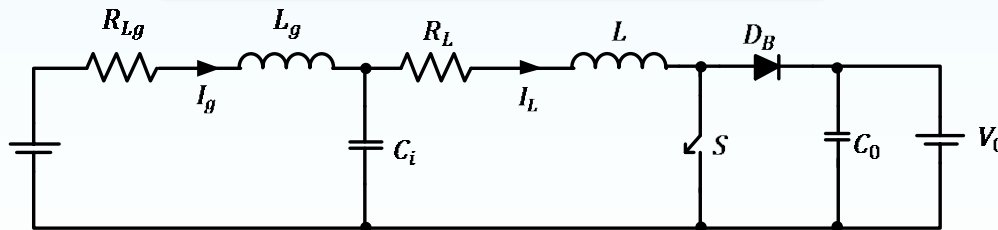


Rectificador Boost Trifásico Con filtro de entrada LCL

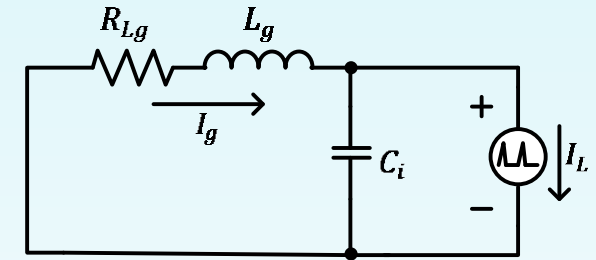


Condensadores para el
Filtro de entrada

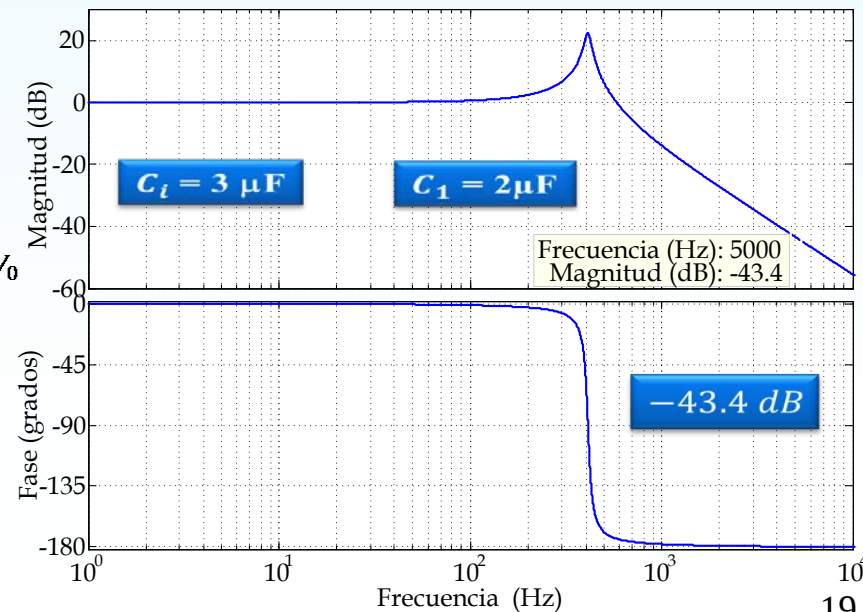
Considerando solo dos fases



$$C_i = \frac{3}{2} C_1$$

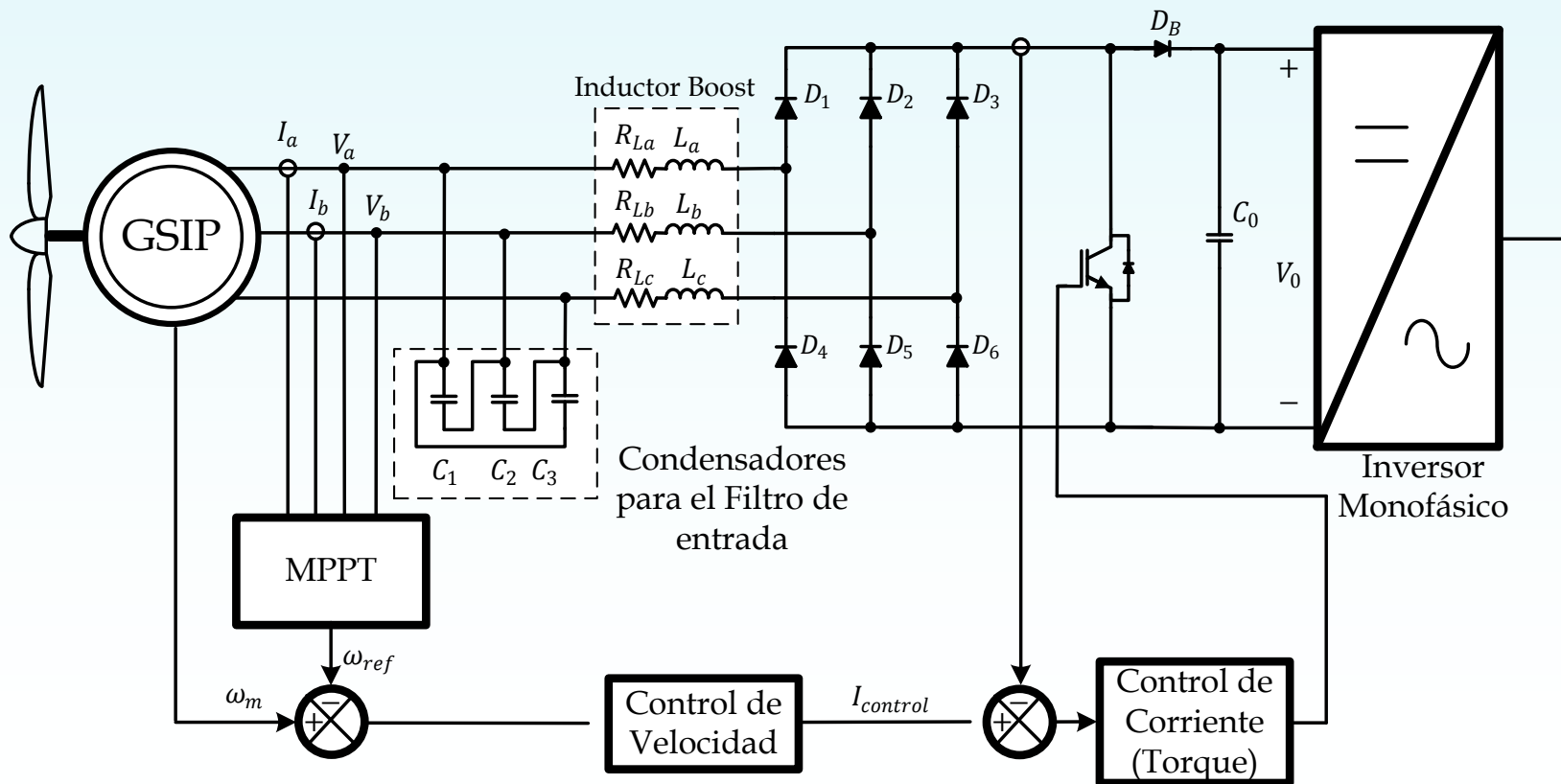


$$\frac{i_g(s)}{i_L(s)} = \frac{1}{s^2 C_i L_g + s C_i R_{Lg} + 1}$$

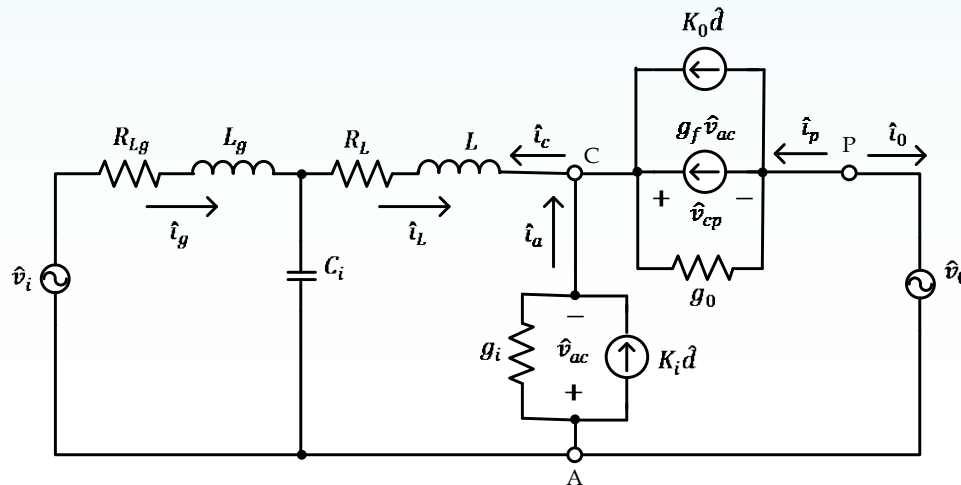
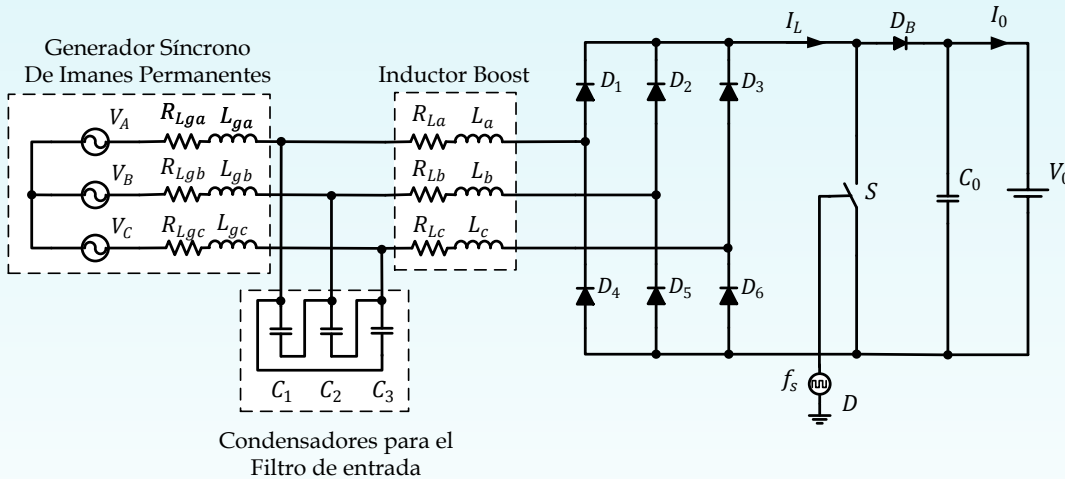


Estructuras de Control del Sistema de Generación Eólica

Estructura de Control de Velocidad



Modelo del Rectificador Boost Trifásico Con filtro de entrada LCL



Parámetros

$$g_i = \frac{D^2 T_s}{2L}$$

$$g_o = \frac{2LP_o^2}{D^2 V_o^2 T_s [-V_i + I_L (R_L + R_{Lg})]^2}$$

$$g_f = -\frac{2P_o}{[-V_i + I_L (R_L + R_{Lg})] V_o}$$

$$K_i = \frac{DT_s [-V_i I_L (R_L + R_{Lg})]}{L}$$

$$K_o = -\frac{2P_o}{DV_o}$$

Relación de la corriente del inductor boost en función del ciclo de trabajo

$$G_{id}(s) = \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_i=0, \hat{v}_0=0}$$

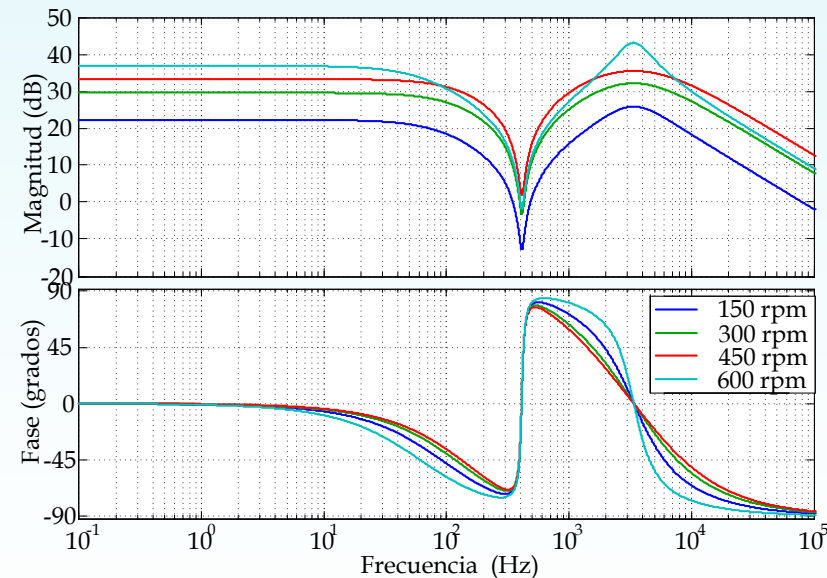
$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{-\left(s^2 C_i L_g + s C_i R_g + 1\right) (K_i + K_o)}{s^3 B_3 + s^2 B_2 + s B_1 + B_0}$$

$$B_3 = C_i L_g L (g_i + g_o + g_f)$$

$$B_2 = C_i \left[L_g + (g_i + g_o + g_f) (L R_{L_g} + L_g R_L) \right]$$

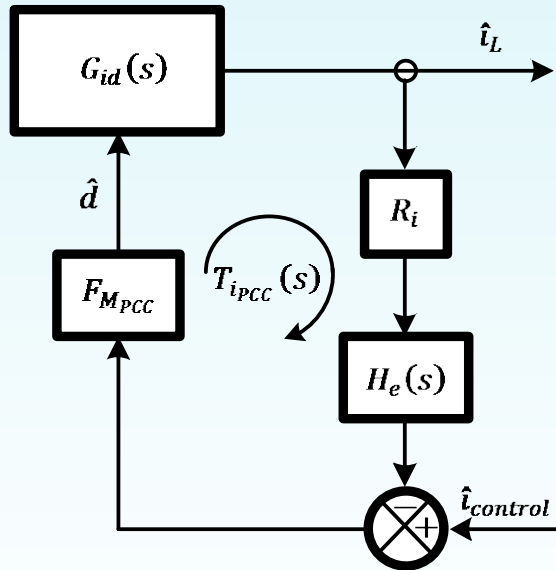
$$B_1 = \left[C_i R_{L_g} + (g_i + g_o + g_f) (L_g + L + C_i R_L R_{L_g}) \right]$$

$$B_0 = (g_i + g_o + g_f) (R_{L_g} + R_L) + 1$$



Control Modo Corriente Pico

ETAPA DE POTENCIA

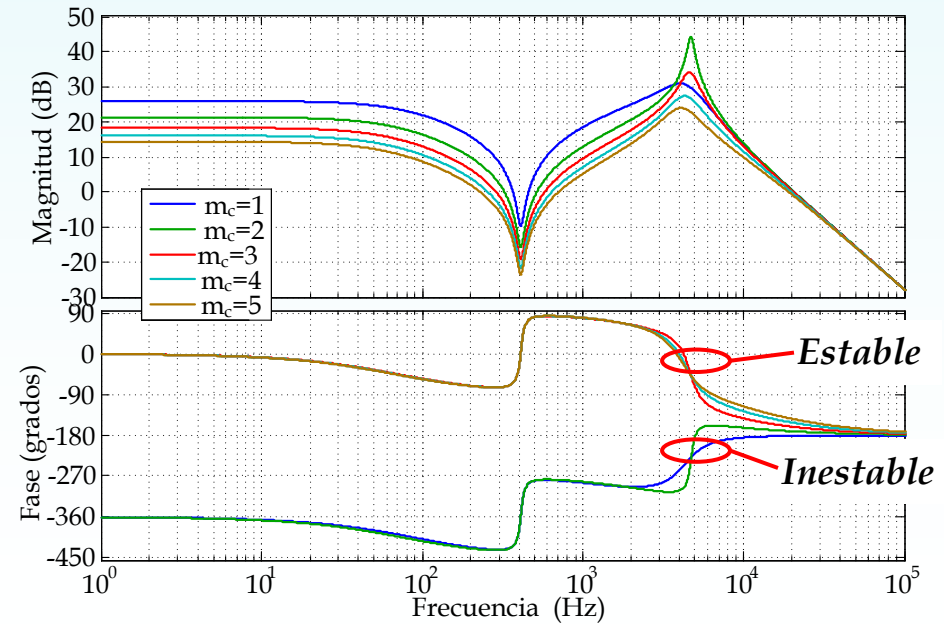


$$H_e(s) = 1 + \frac{s}{\omega_z Q_z} + \frac{s^2}{\omega_z^2} \quad s_n = \frac{V_i}{L} R_i$$

$$F_{M_{PCC}} = \frac{1}{(S_n + S_e)T_s} \quad m_c = 1 + \frac{S_e}{S_n}$$

$$T_{i_{PCC}}(s) = G_{id}(s)H_e(s)R_i F_{M_{PCC}}$$

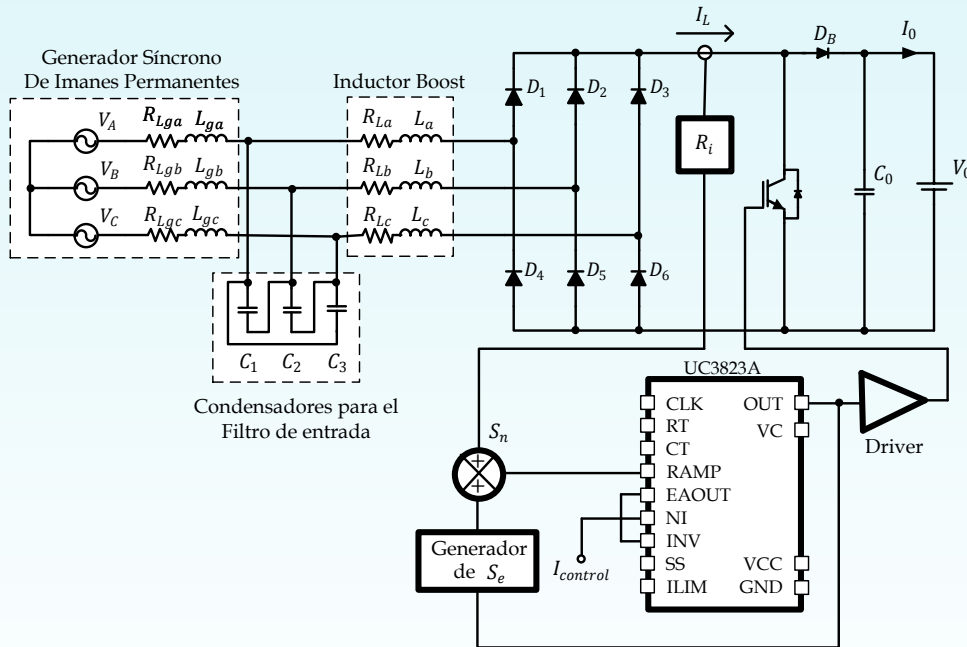
$$G_{ic}(s) = \frac{G_{id}(s)F_{M_{PCC}}}{1 + T_{i_{PCC}}(s)}$$



$$R_i = 0.015$$

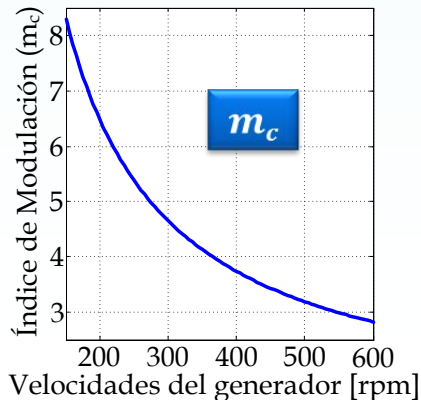
$$m_c \geq 2.24$$

Control Modo Corriente Pico

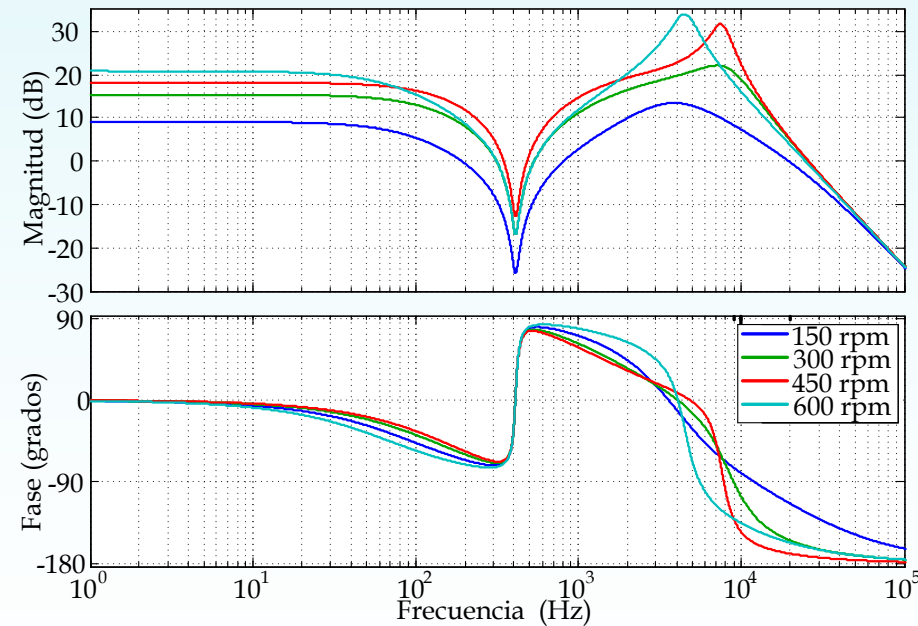


Condensadores para el Filtro de entrada

Generador de S_e

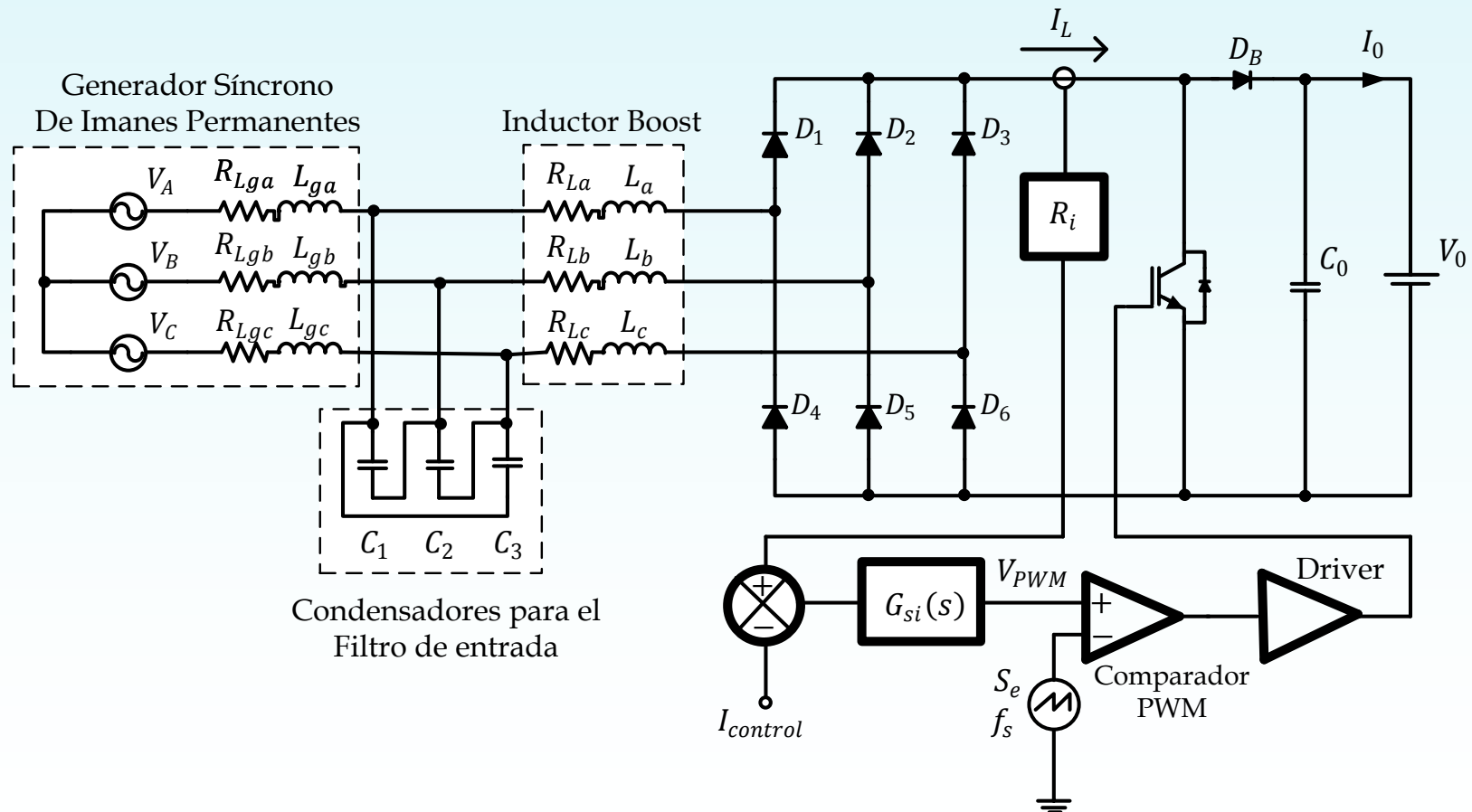


$$S_e = 22.5 \text{ kV/s}$$

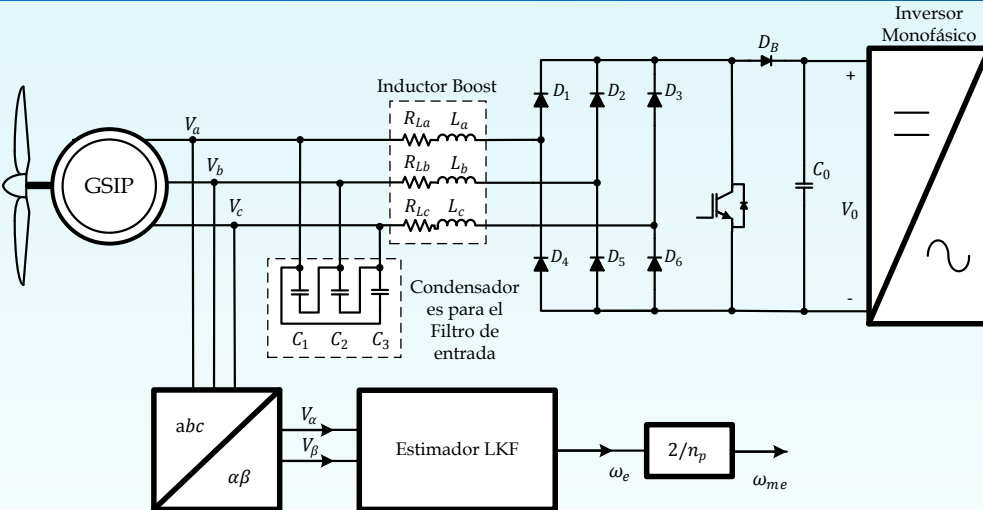


Control Modo Corriente Media

Sensado en el inductor de potencia



Estimador empleando Filtro Lineal de Kalman



$$\varepsilon(k) = V_\beta(k) \cos \tilde{\theta}(k) - V_\alpha(k) \sin \tilde{\theta}(k)$$

$$\tilde{\theta}(k+1) = [\tilde{\theta}(k) + T_s \tilde{\omega}_e(k) + K_{s1} \varepsilon(k)]_{-\pi}^{\pi}$$

$$\tilde{\omega}_e(k+1) = \tilde{\omega}_e(k) + \dot{\rho}(k) + K_{s2} \varepsilon(k)$$

$$\dot{\rho}(k+1) = \dot{\rho}(k) + K_{s3} \varepsilon(k)$$

$$\theta(k+1) = \theta(k) + T_s \omega_e(k)$$

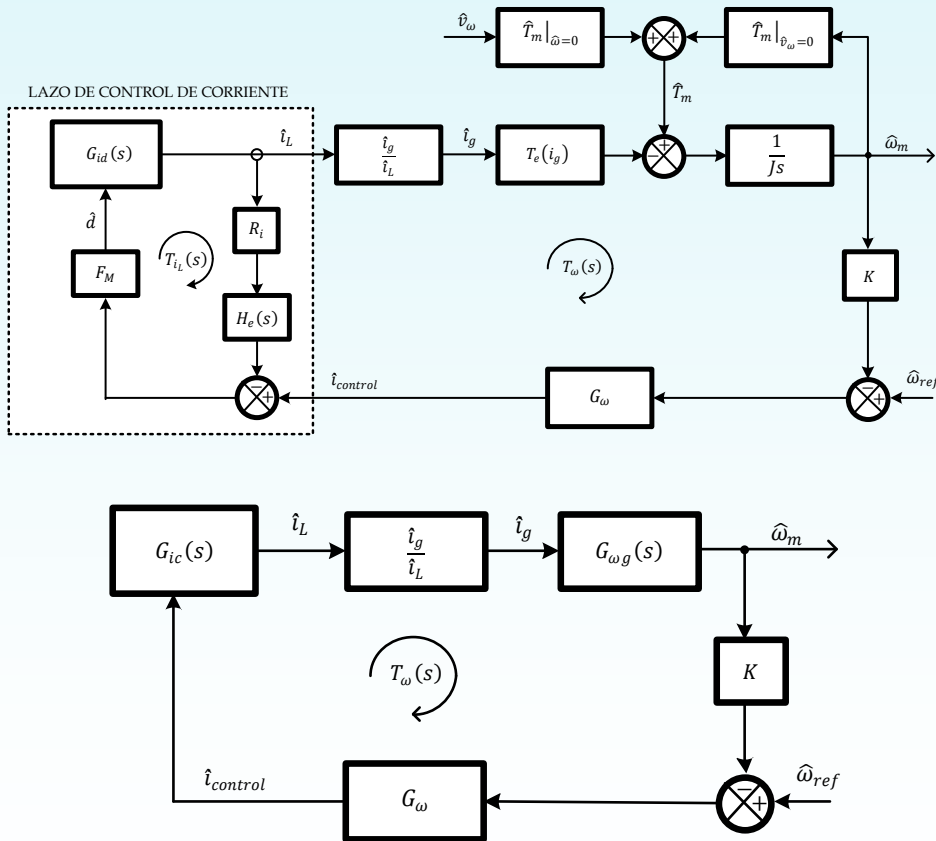
$$\omega_e(k+1) = \omega_e(k) + \dot{\rho}(k)$$

$$\dot{\rho}(k+1) = \dot{\rho}(k) + \rho(k)$$

$$K_{s1}, K_{s2} \text{ y } K_{s3} \rightarrow \text{DLQE } (A_s, G_s, H_s, Q_s, R_s)$$

δ permite ajustar el rechazo al ruido

Lazo de Velocidad

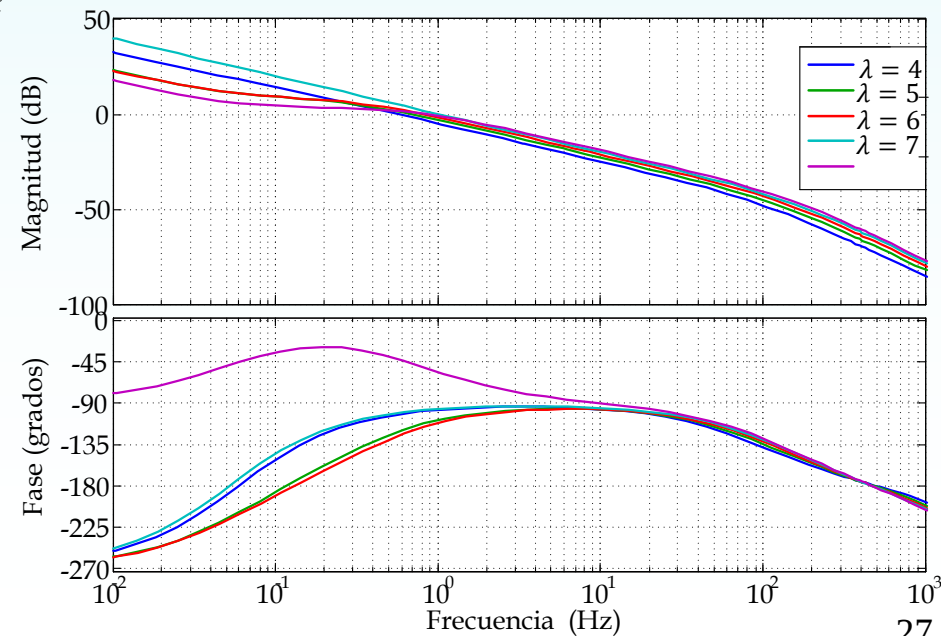


$$G_{\omega c}(s) = \frac{i_L(s)}{i_c(s)} \cdot \frac{i_g(s)}{i_L(s)} \cdot \frac{\omega_m(s)}{i_g(s)}$$

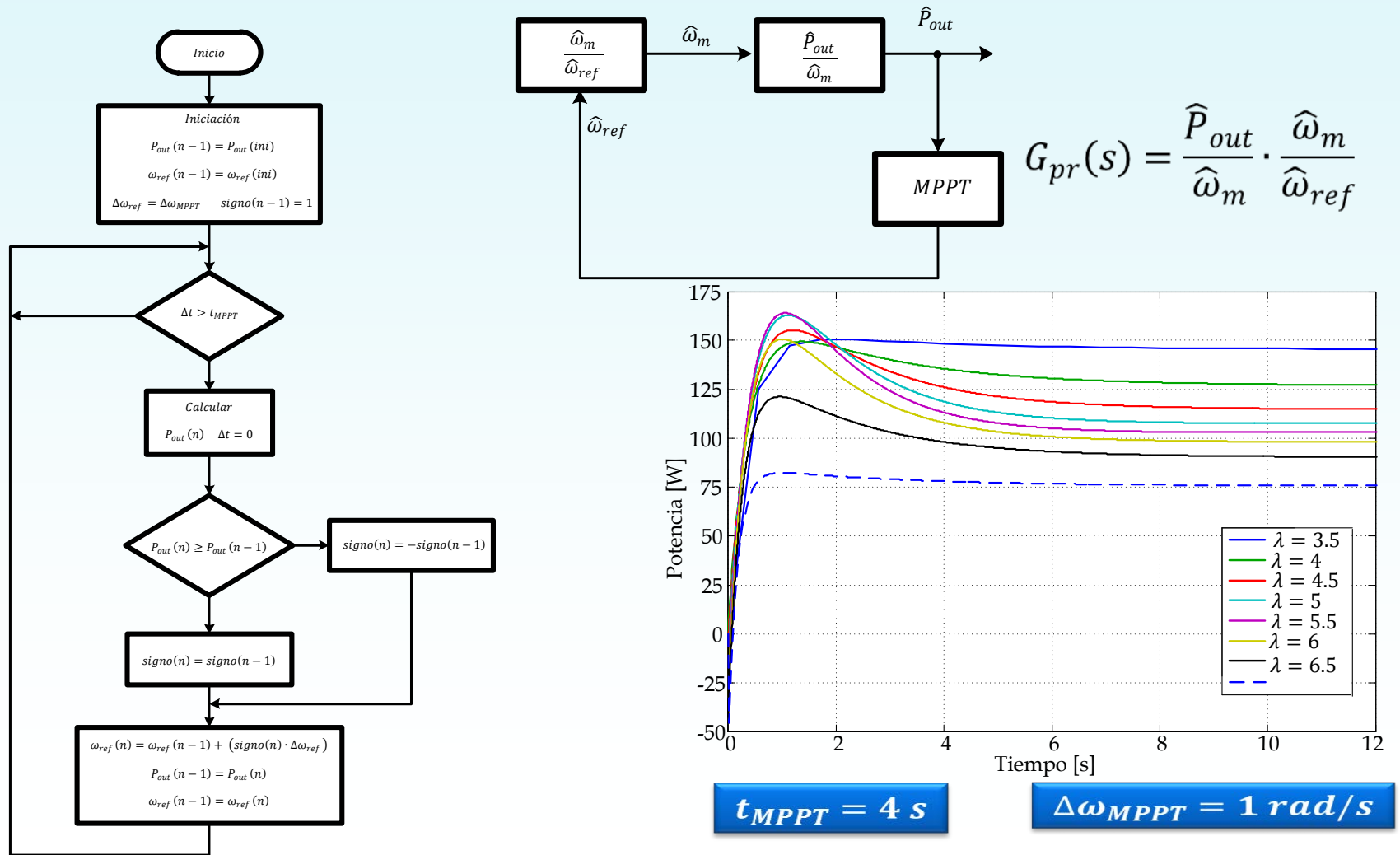
$$T_\omega(s) = G_{\omega c}(s)KG_\omega(s)$$

$$G_{\omega r}(s) = \frac{\hat{\omega}_m}{\hat{\omega}_{ref}} = \frac{G_{\omega c}(s)G_\omega}{1 + T_\omega}$$

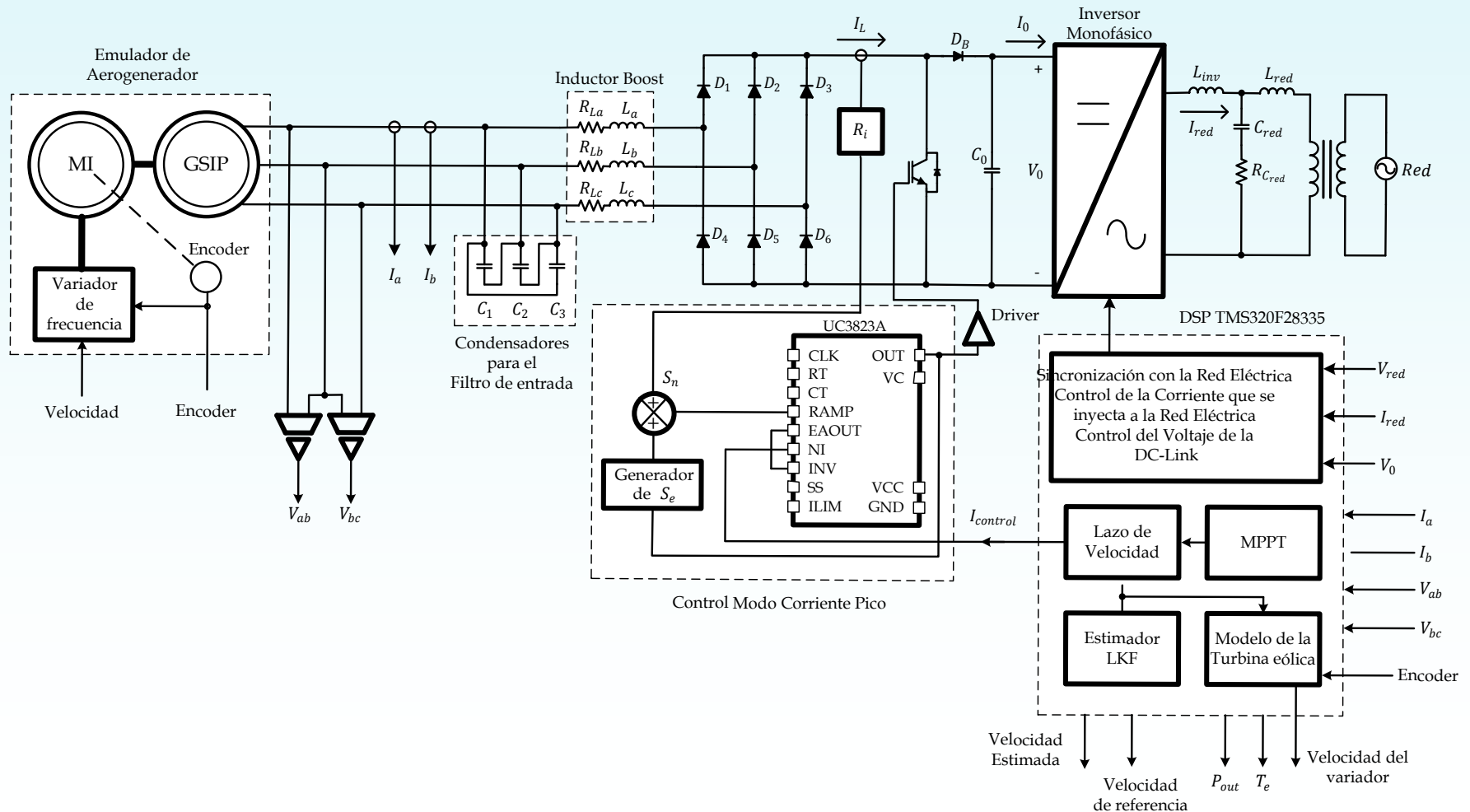
$$K_{p\omega} = -0.05777 \text{ y } K_{i\omega} = -0.0187752 \text{ rad/s}$$



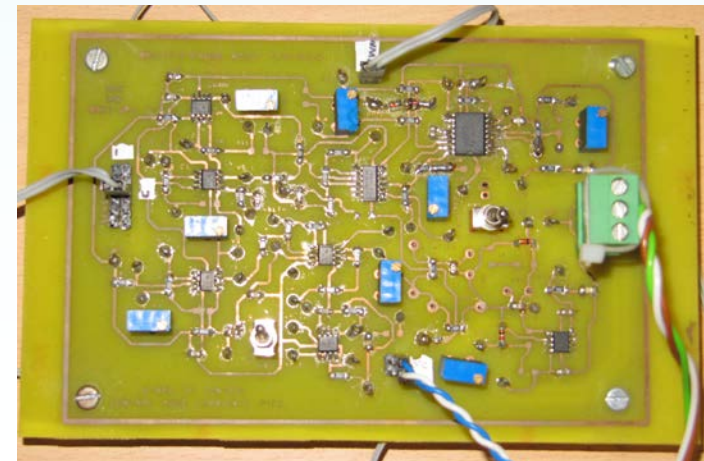
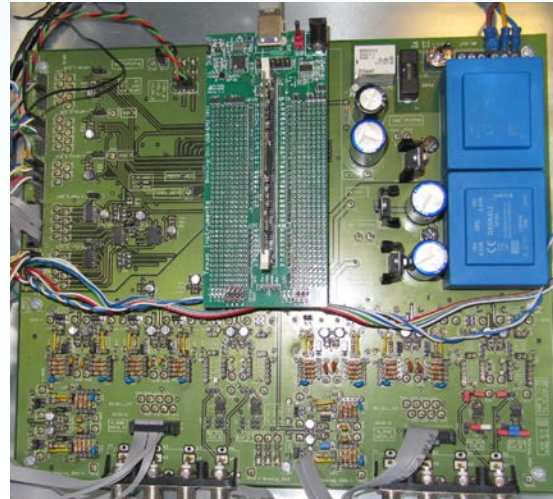
Algoritmo de Búsqueda del Punto de Máxima Potencia del SGE



Sistema de Generación Eólica Experimental



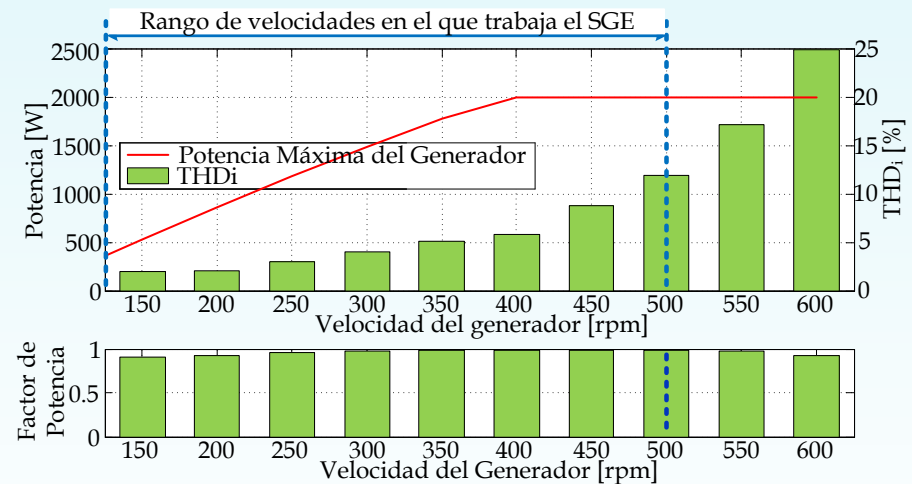
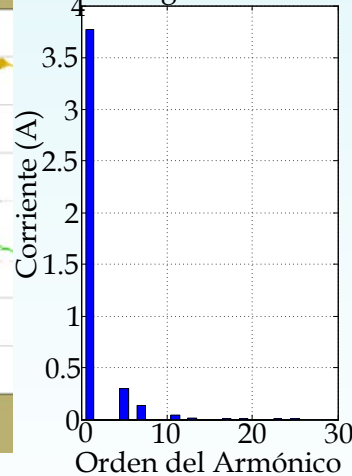
Prototipo Experimental



Control Modo Corriente Pico

Resultados Experimentales

Espectro Armónico de la corriente a la salida del generador



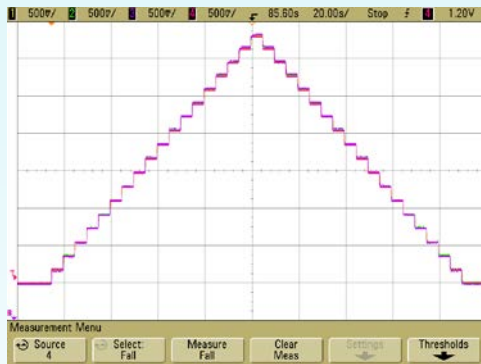
THD_i entre 1.93% y 11.93 %

Velocidad de 450 rpm y Potencia de 2 kW

FP entre 0.9 hasta 0.98

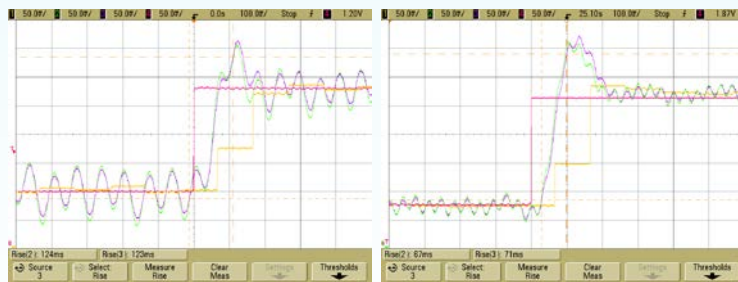
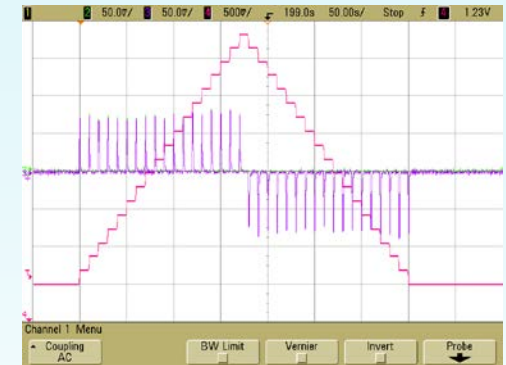
Estimador de Velocidad empleando LKF

Resultados Experimentales



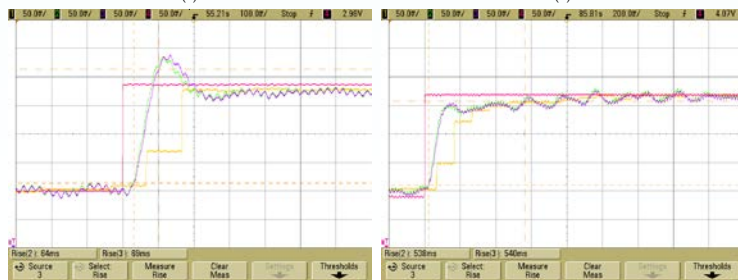
$\delta = 5 \times 10^6 \rightarrow \text{Verde}$

$\delta = 1 \times 10^7 \rightarrow \text{Azul}$



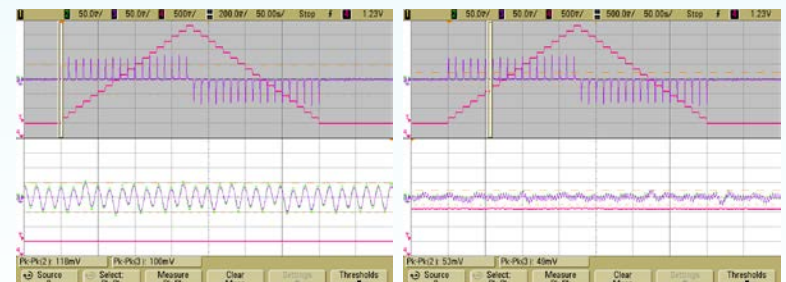
(a)

(b)



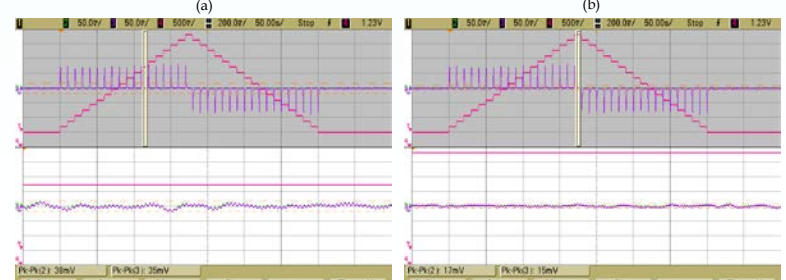
(c)

(d)



(a)

(b)



(c)

(d)

Lazo de Velocidad

Respuesta Experimental

Torque → Azul

Potencia → Rojo

Velocidad → Verde

10 m/s

(a)

(b)

(a)

(b)

$THDi = 4.51\%$

$THDi = 7.61\%$

$THDi = 5.41\%$

$THDi = 7.61\%$

(a)

(b)

$THDi = 8.24\%$

$THDi = 12.1\%$

$THDi = 8.24\%$

$THDi = 12.1\%$

Sistema de Generación Eólica Experimental

Viento → Azul

Velocidad → Verde

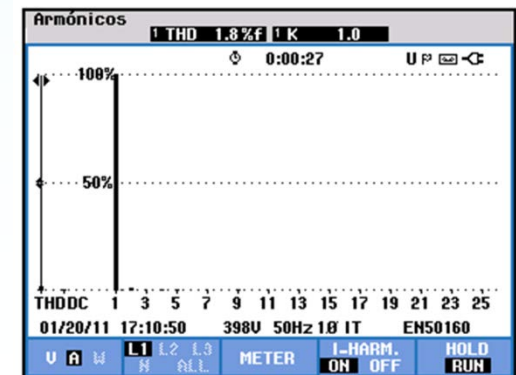
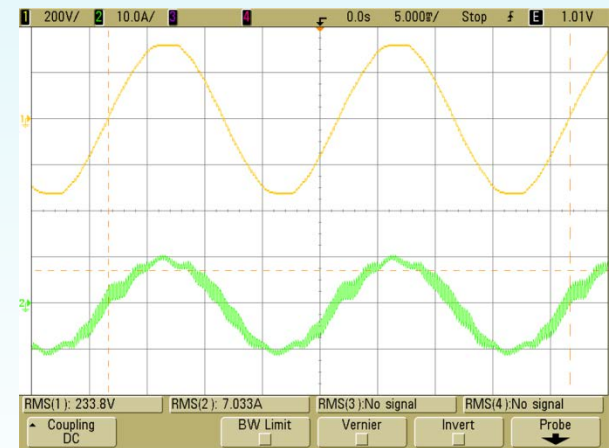
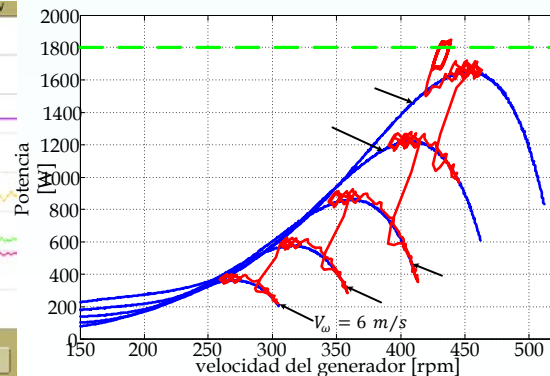
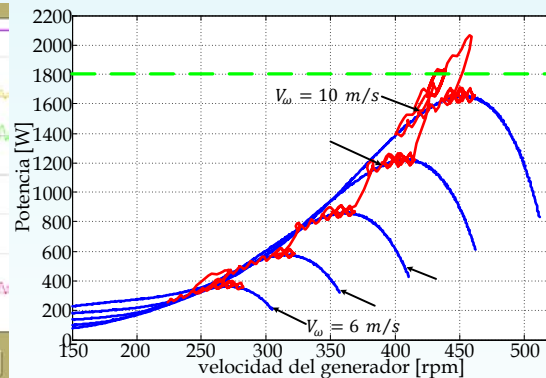
Potencia → Verde

C_p → Rojo

Energía Inyectada
a la red



(a)



Muchas Gracias

