

5to SEMINARIO NACIONAL DE ENERGIA Y SU USO EFICIENTE CIUDAD DE CUTRAL-CO, NEUQUEN

Modelado y Simulación de Conversión de Energía Eólica PMSG

Bufanio, Ruben*, De Villaflor Alejandro ⁽¹⁾, Damián Marasco ⁽²⁾

*Facultad Regional del Neuquén y Haedo, Universidad Tecnológica Nacional
ruben.bufanio@speedy.com.ar*

*(1), Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional
devillab@speedy.com.ar*

*(2), Facultad Regional del Neuquén, Universidad Tecnológica Nacional
damian.n.marasco@gmail.com*

Expositor : Ruben D. Bufanio



Objetivo:

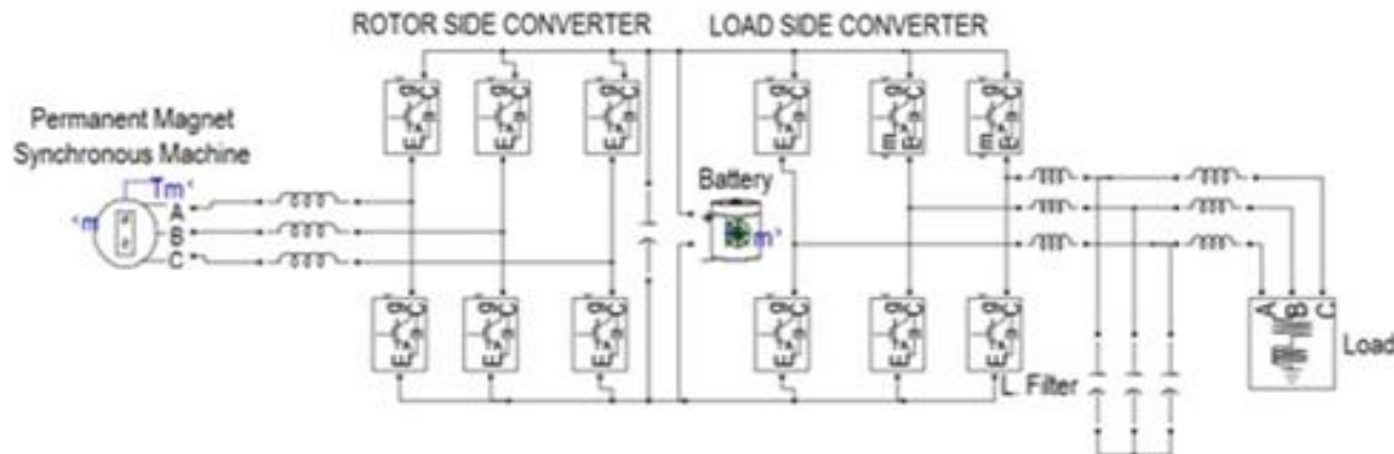
- Modelar y simular un aerogenerador de baja potencia (50kW), con WECS para generador sincrónico a imanes permanentes (PMSG) polos no salientes, acoplamiento directo, velocidad variable y paso de pala.

❖ Características:

- Control MPPT (máxima captura de energía)
- Control ZDC (corriente en eje directo $I_d=0$)
- Conversión de potencia eléctrica espalda con espalda
- Barra de DC con respaldo de banco de baterías
- Arreglo vectorial para conmutación de interruptores de potencia (SVM)



Sistemas de Conversión de Energía (WECS)



Rotor Side Converter :

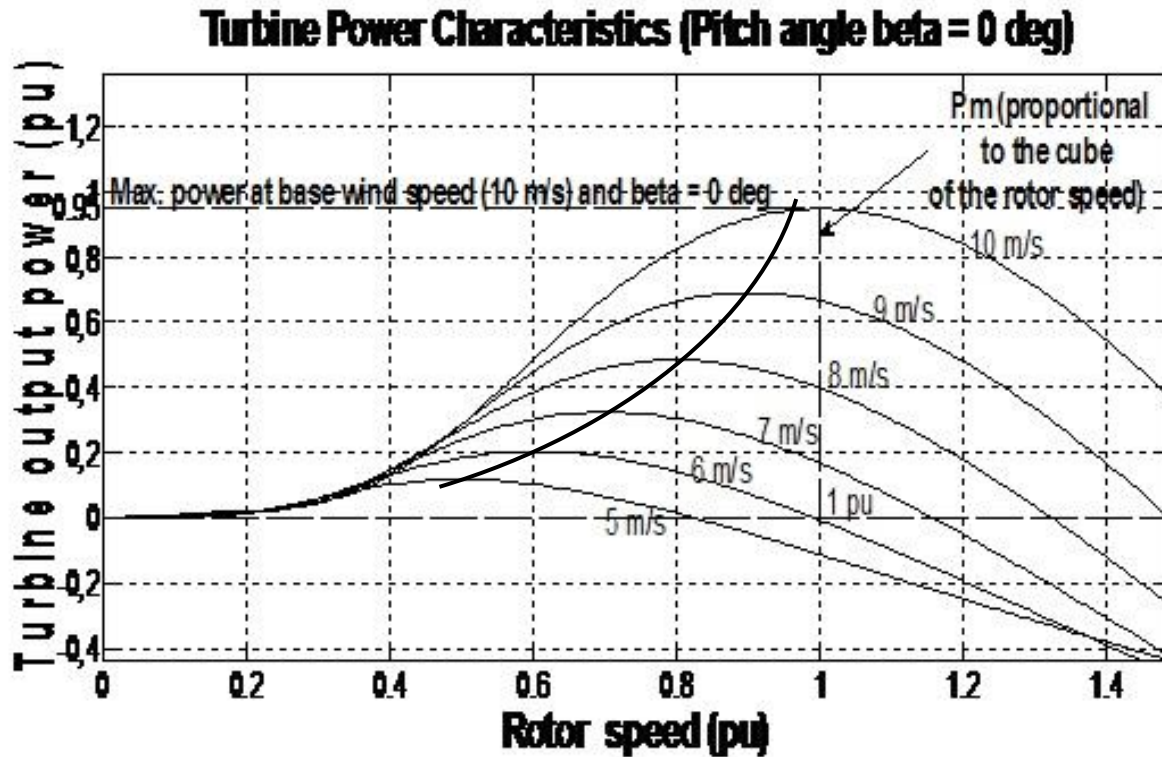
- Maximizar captura de energía del viento (MPPT)
- Controlar flujo de potencia hacia lado carga
- Velocidad de giro óptima

Load Side Converter :

- Suministrar potencia Controlada hacia la carga (Producto técnico según normas)



Familia de curvas de potencia aerodinámica en función de la velocidad del viento y ubicación de potencia mecánica (MPPT)



Fuente: Toolbox Simulink de Matlab (R2010a)



Control WECS

- ❖ Corriente estatórica en marco síncrono “d q” , ZDC (zero direct current)

$$\vec{i}_s = i_{ds} + j i_{qs} = j i_{qs} \quad \text{para} \quad i_{ds} = 0$$

- ❖ Torque electromagnético

$$T_e = \frac{3}{2} * P * (\phi_r * i_{qs} - (L_d - L_q) * i_{qs} * i_{ds})$$

$$T_e = \frac{3}{2} * P * \phi_r * i_{qs}$$

- ❖ Conversión con MPPT

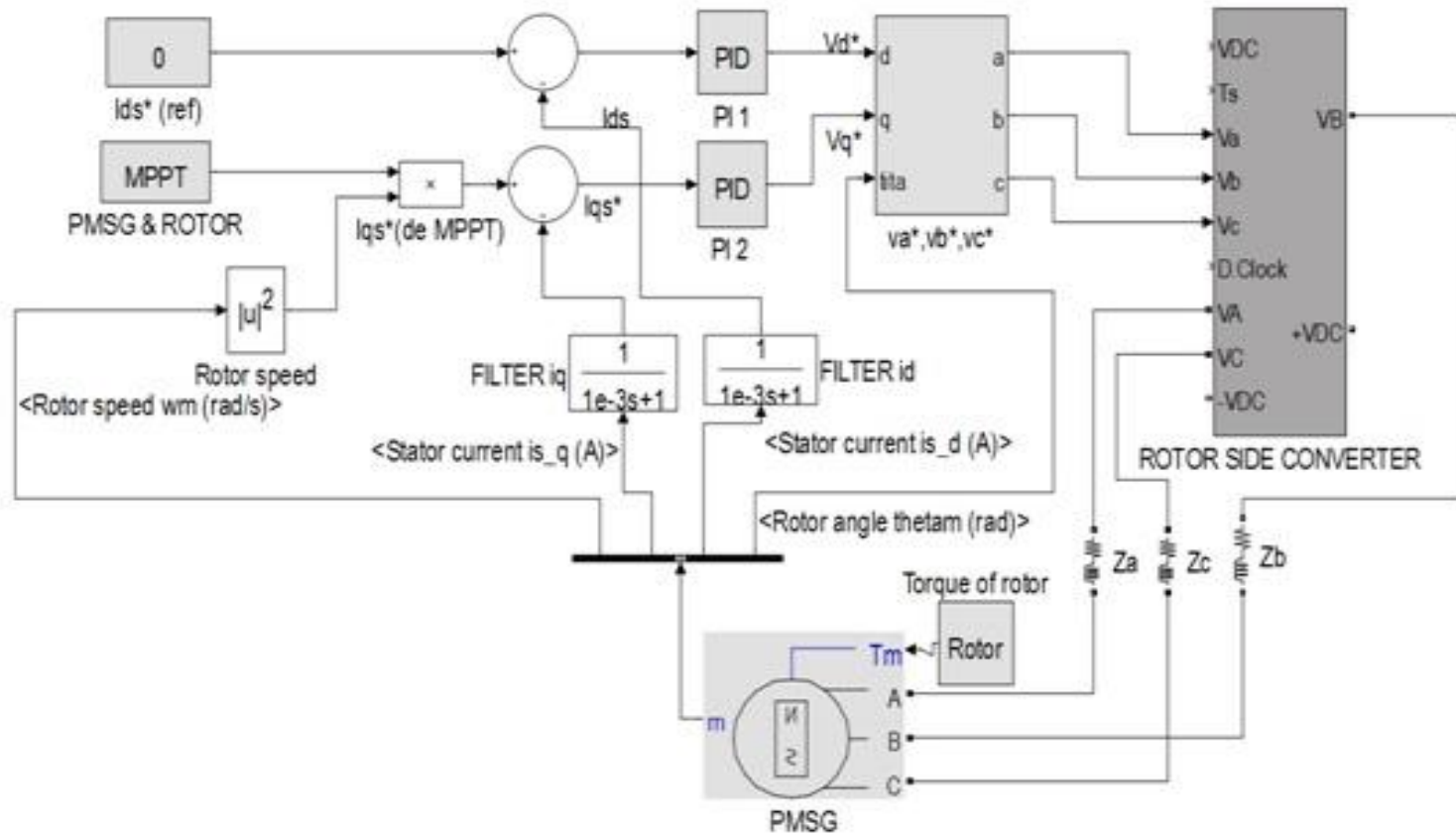
$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J} * (T_m - T_e)$$

$$T_m = \frac{1}{2} * CP * \rho * \pi * R^5 * \frac{\omega^2}{\lambda^3}$$

$$i_{qs}^* = \frac{CP_{opt} * \rho * \pi * R^5}{3 * P * \phi_r * \lambda_{opt}^3} * \omega_r^2$$



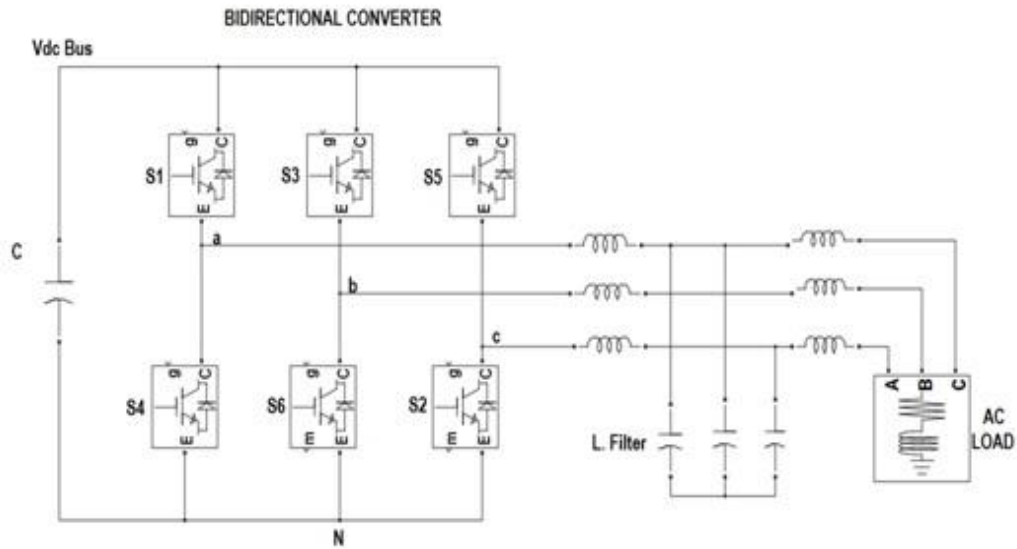
Control ZDC para conversión de energía eólica PMSG





Conversión Espalda con Espalda

- Modulación "SVM"
- Dos niveles



	Rama a			Rama b			Rama c		
Est. Interruptores	S1	S4	VaN	S3	S6	VbN	S5	S2	VcN
1	On	Off	Vdc	On	Off	Vdc	On	Off	Vdc
0	Off	On	0	Off	On	0	Off	On	0



Conversión Espalda con Espalda (Dos Niveles)

➤ Transformación de la señal de referencia

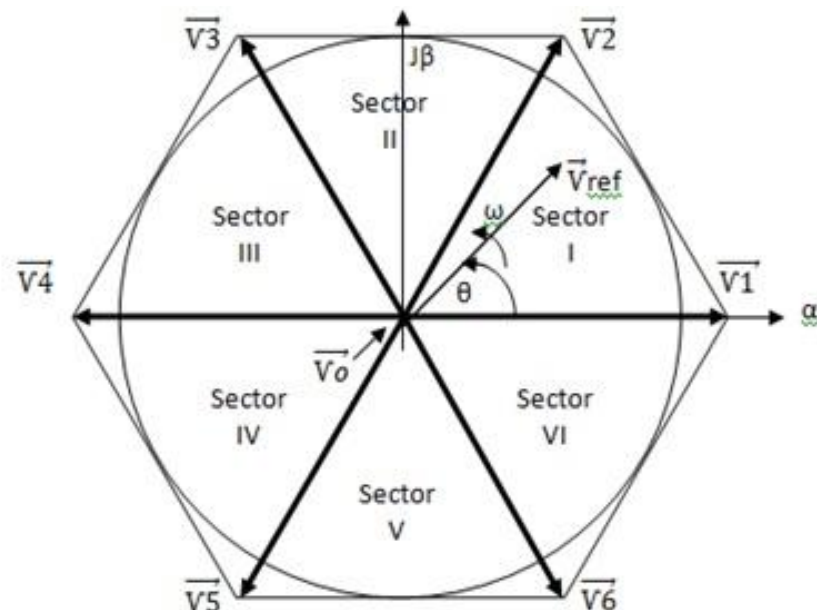
$$V_a(t) + V_b(t) + V_c(t) = 0$$

$$\vec{V}(t) = \frac{2}{3} (V_a(t)e^{j0} + V_b(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_c(t)e^{j\frac{4\pi}{3}})$$

$$\vec{V}(t) = V_\alpha(t) + jV_\beta(t)$$

➤ 6 estados activos, “dos nulos”

$$\vec{V}(t = t_k) = \vec{V}_{ref} = V_{ref} e^{j\theta} = \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(k-1)\pi/3}$$



Espacio vectorial	Definición vectorial	estado de conmutación	interruptores en ON
Nulo o Cero			
\vec{V}_0	$\vec{V}_0 = 0$	111, 000	S1, S3, S5 y S4, S6, S2
Activo			
\vec{V}_1	$\vec{V}_1 = \frac{2}{3} V_{dc} \cdot e^{j0}$	100	S1, S6, S2
\vec{V}_2	$\vec{V}_2 = \frac{2}{3} V_{dc} \cdot e^{j\pi/3}$	110	S1, S3, S2
\vec{V}_3	$\vec{V}_3 = \frac{2}{3} V_{dc} \cdot e^{j2\pi/3}$	010	S4, S3, S2
\vec{V}_4	$\vec{V}_4 = \frac{2}{3} V_{dc} \cdot e^{j\pi/3}$	011	S4, S3, S5
\vec{V}_5	$\vec{V}_5 = \frac{2}{3} V_{dc} \cdot e^{j4\pi/3}$	001	S4, S6, S5
\vec{V}_6	$\vec{V}_6 = \frac{2}{3} V_{dc} \cdot e^{j5\pi/3}$	101	S1, S6, S5



Cálculo de los tiempos de permanencia interruptores de potencia

➤ **Muestras "Ts"**

$$T_s = T_a + T_b + T_o$$

➤ **Cálculo de los tiempos de estados activos y nulos dentro de una muestra**

$$T_a = \frac{\sqrt{3} V_{ref} T_s}{V_{dc}} \text{sen} \left(\frac{\pi}{3} - \theta' \right) \quad T_b = \frac{\sqrt{3} V_{ref} T_s}{V_{dc}} \text{sen} \theta' \quad T_o = T_s - T_a - T_b \quad \theta' = \theta - (k-1) \frac{\pi}{3} \quad 0 < \theta' < \frac{\pi}{3}$$

➤ **Indice de Modulación**

$$m_a = \frac{\sqrt{3}}{V_{dc}} V_{ref}$$

	To/4	Tb/2	Ta/2	To/2	Ta/2	Tb/2	To/4
Sector I	111	110	100	000	100	110	111
Sector III	111	011	010	000	010	011	111
Sector V	111	101	001	000	001	101	111

←----- Ts ----->

	To/4	Ta/2	Tb/2	To/2	Tb/2	Ta/2	To/4
Sector II	111	110	010	000	010	110	111
Sector IV	111	011	001	000	001	011	111
Sector VI	111	101	100	000	100	101	111

←----- Ts ----->

➤ **Se divide el tiempo de muestra en 7 "segmentos"**

Con arreglo de tabla para minimizar frecuencia

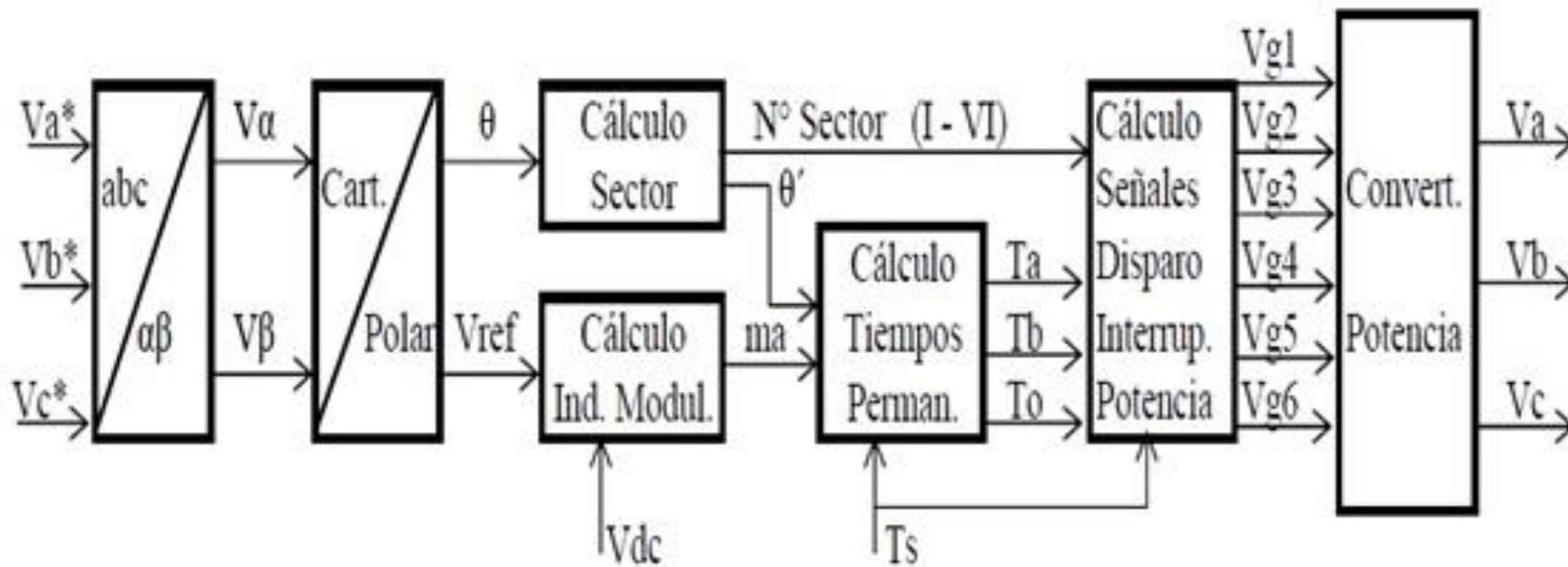
de conmutación y distorsión armónica

$$T_a = m_a T_s \text{sen} \left(\frac{\pi}{3} - \theta' \right)$$

$$T_b = m_a T_s \text{sen} \theta'$$



Diagrama de bloques utilizado para modelar y simular los convertidores bidireccionales





Esquema de modelado de conversión de energía eólica PMSG

Datos principales nominales

Rotor :

$P_m = 51.5 \text{ kW}$
 $\beta = 0^\circ$
 $V = 10.27 \text{ m/s}$
 $\omega = 10.3 \text{ r/s}$
 $R = 7.17 \text{ m}$
 $T_m = 5000 \text{ Nm}$
 $J = 2100 \text{ kgm}^2$

Generador

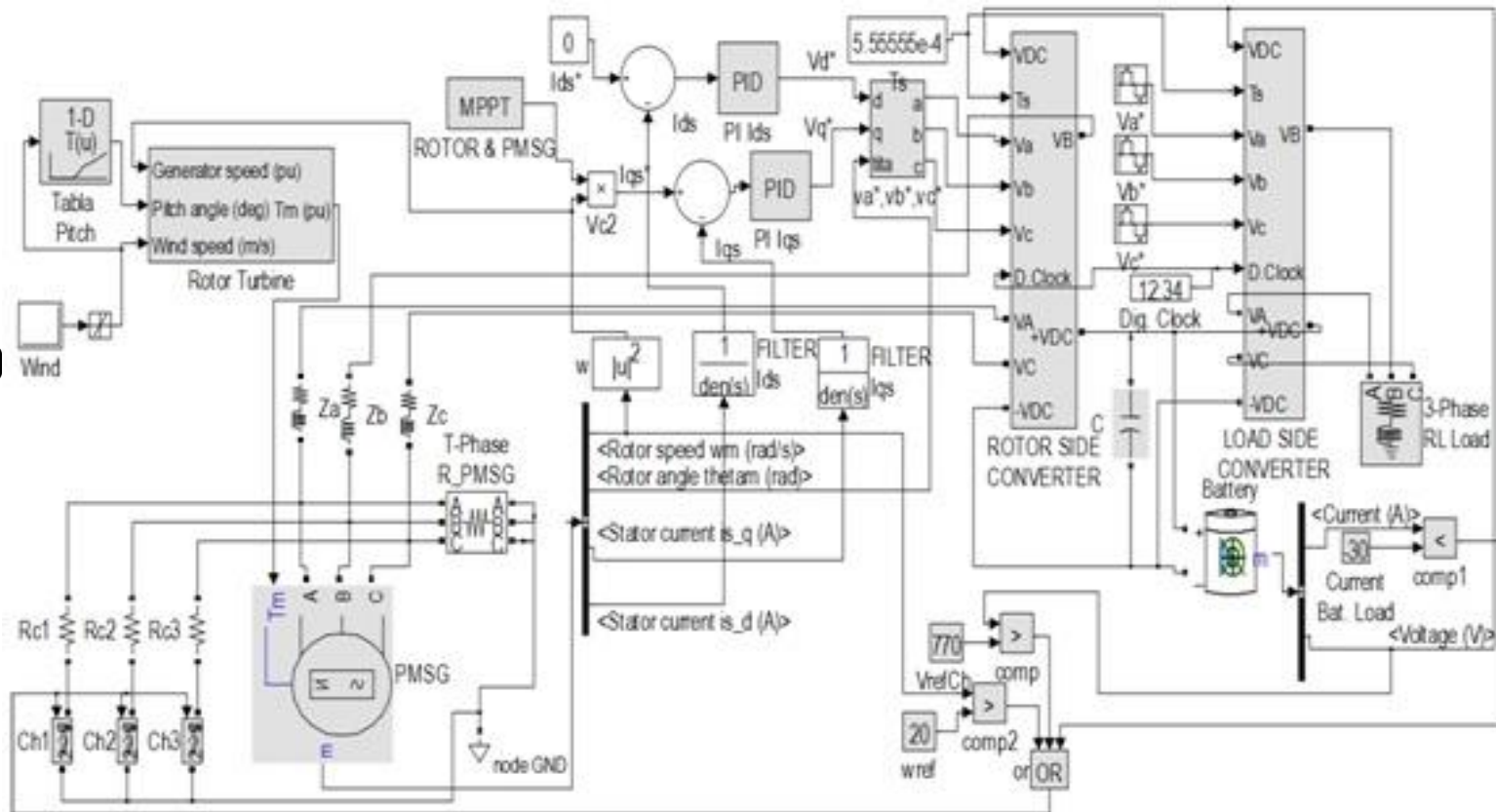
$P = 12 \text{ (pares de polos)}$
 $L_d = L_q = 5 \text{ mHy}$
 $\Phi_r = 3 \text{ V.S}$
 $K_v = 6530 \text{ V L-L/krpm}$

Convertidor

$M_a = 0.8$
 $V \text{ L-L} = 380 \text{ V}$
 $f_s = 1800 \text{ Hz}$
 $Bat = 648 \text{ V (150 AH)}$

Carga

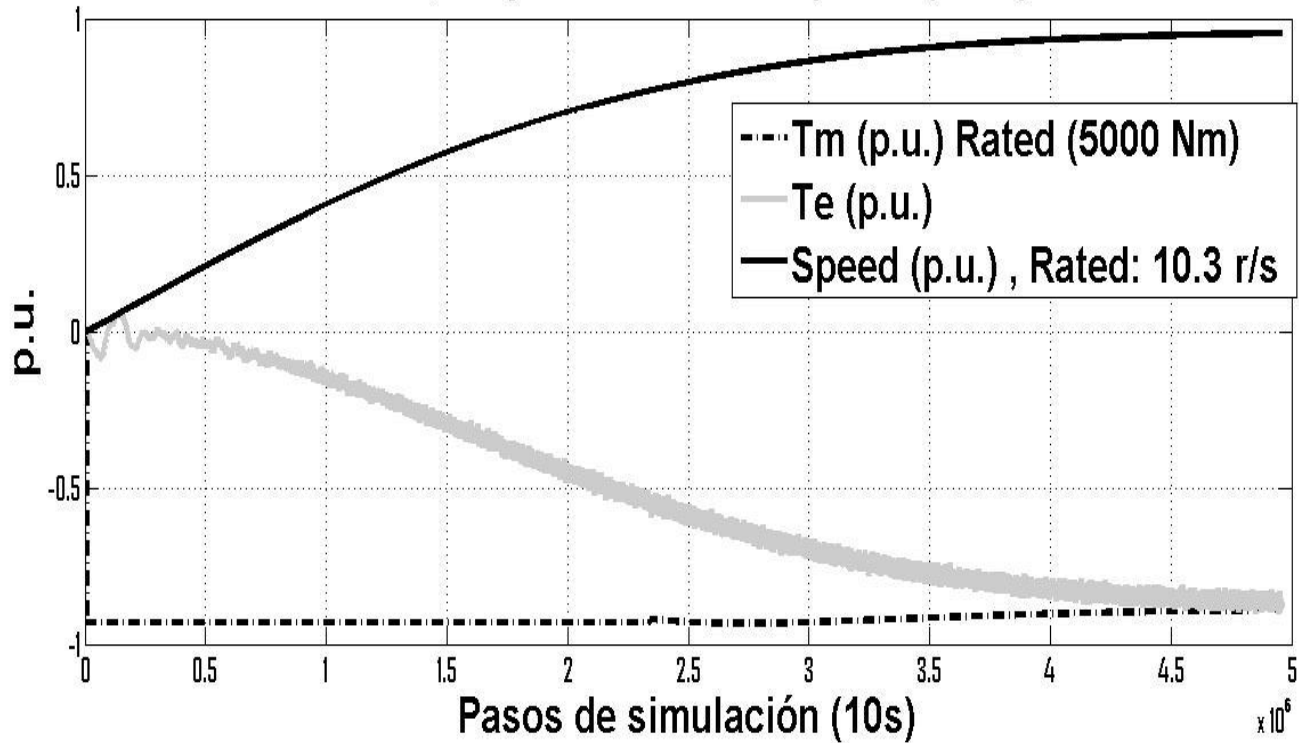
$FP = 0.9$
 $P = 40 \text{ kW}$





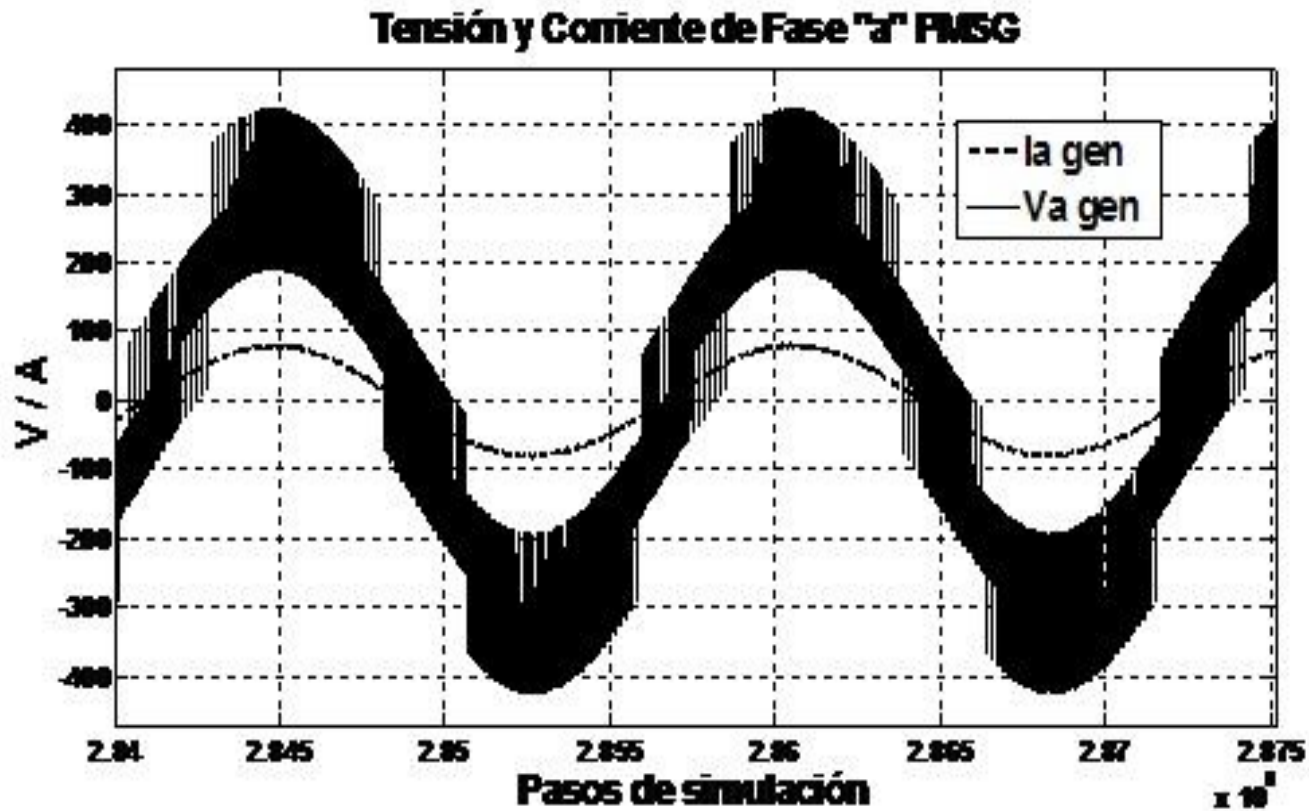
Desempeño de modelo WECS PMSG

Salidas de T_m , T_e y velocidad rotor para $V(\text{wind}) = 10 \text{ m/s}$



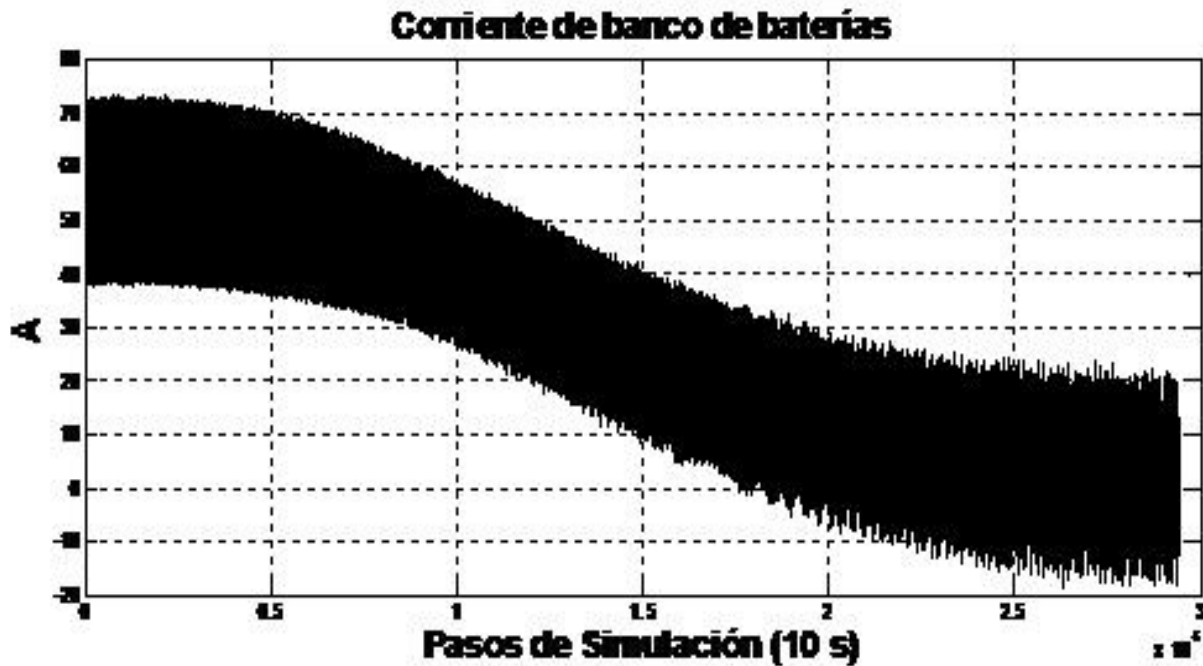


Desempeño de modelo WECS PMSG





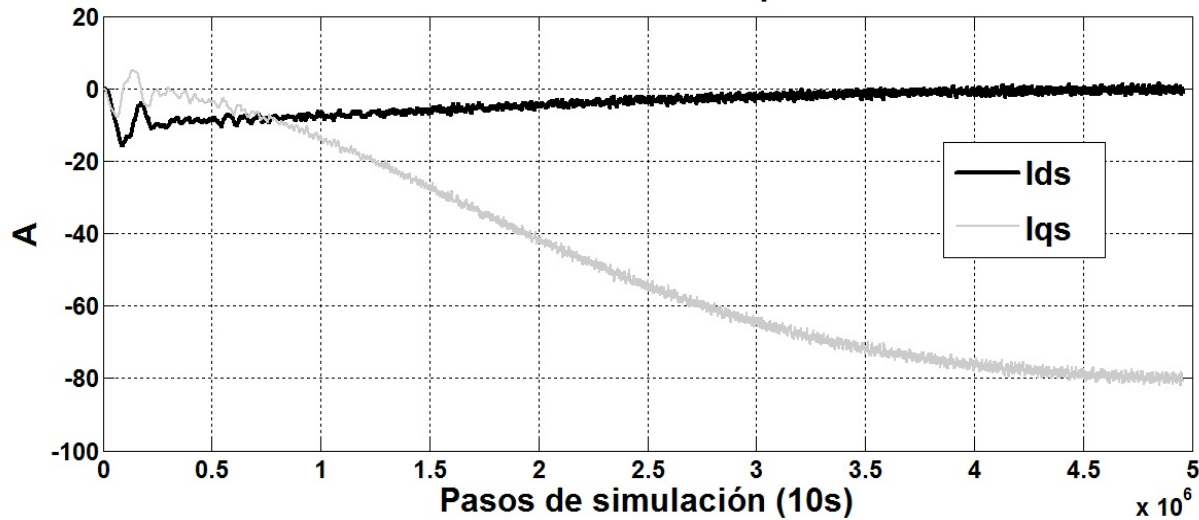
Desempeño de modelo WECS PMSG



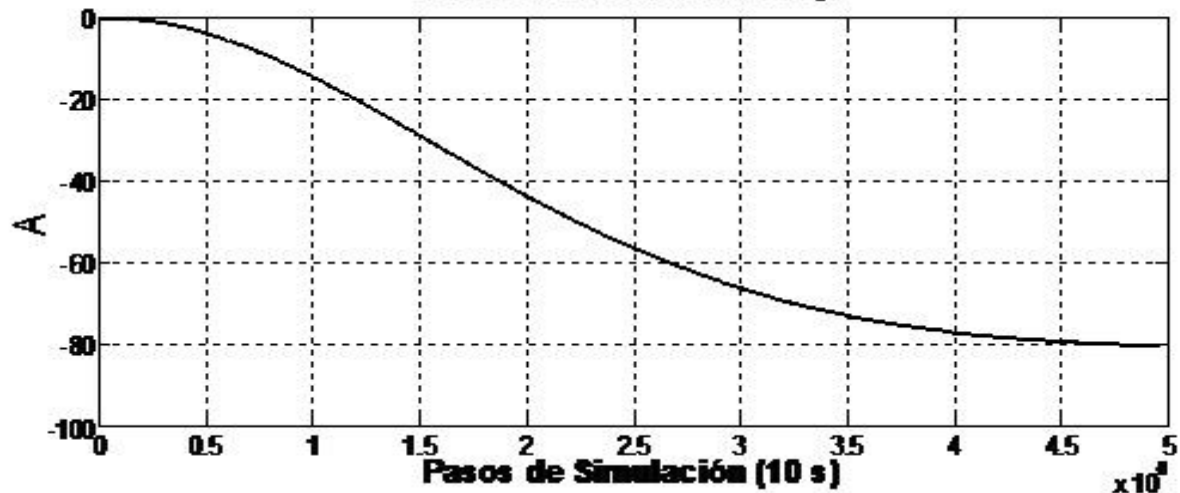


Desempeño de modelo WECS PMSG

Corriente en marco sincrónico "d q" medidas en PMSG

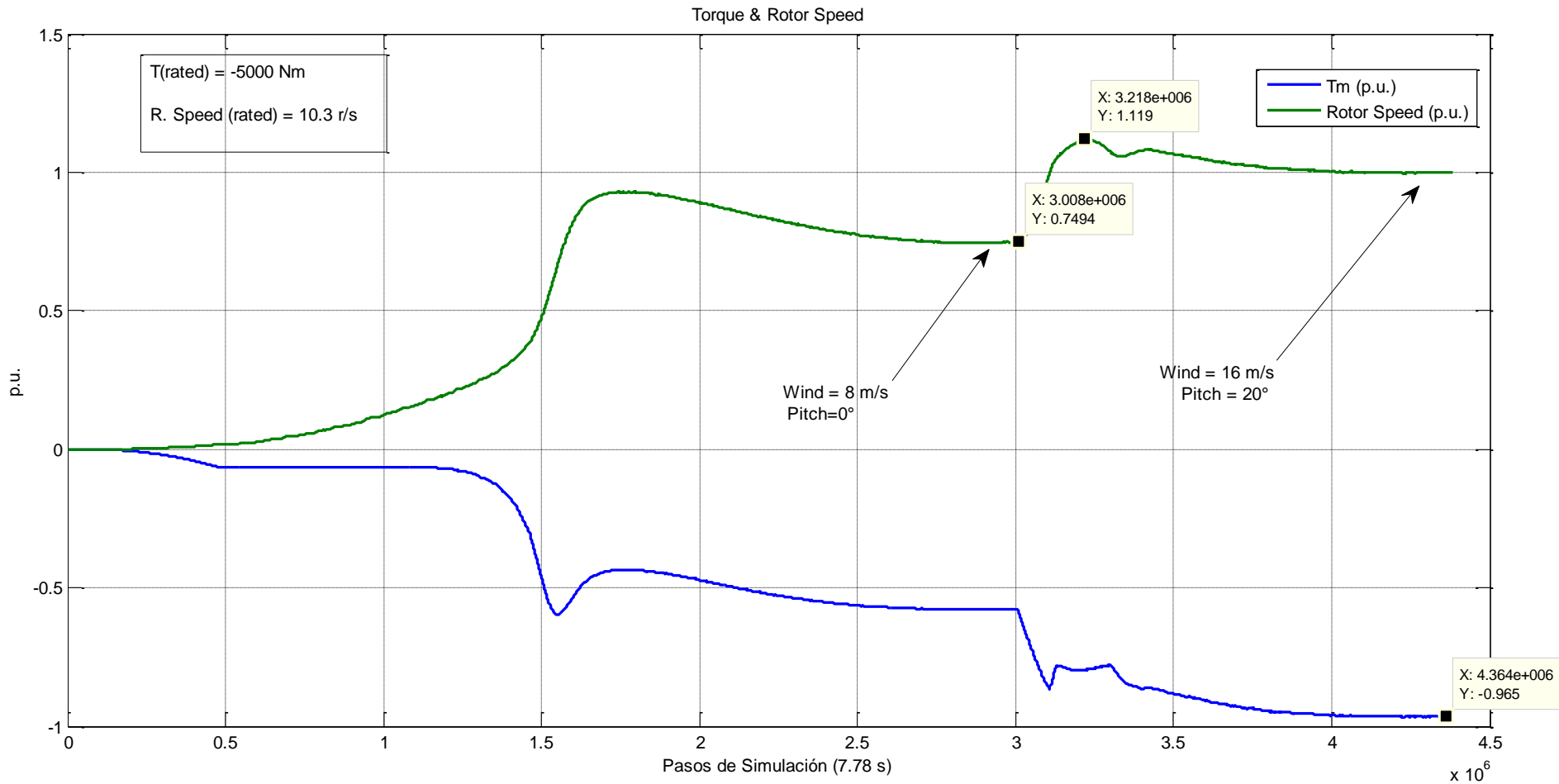


Corriente de Referencia I_{qs}





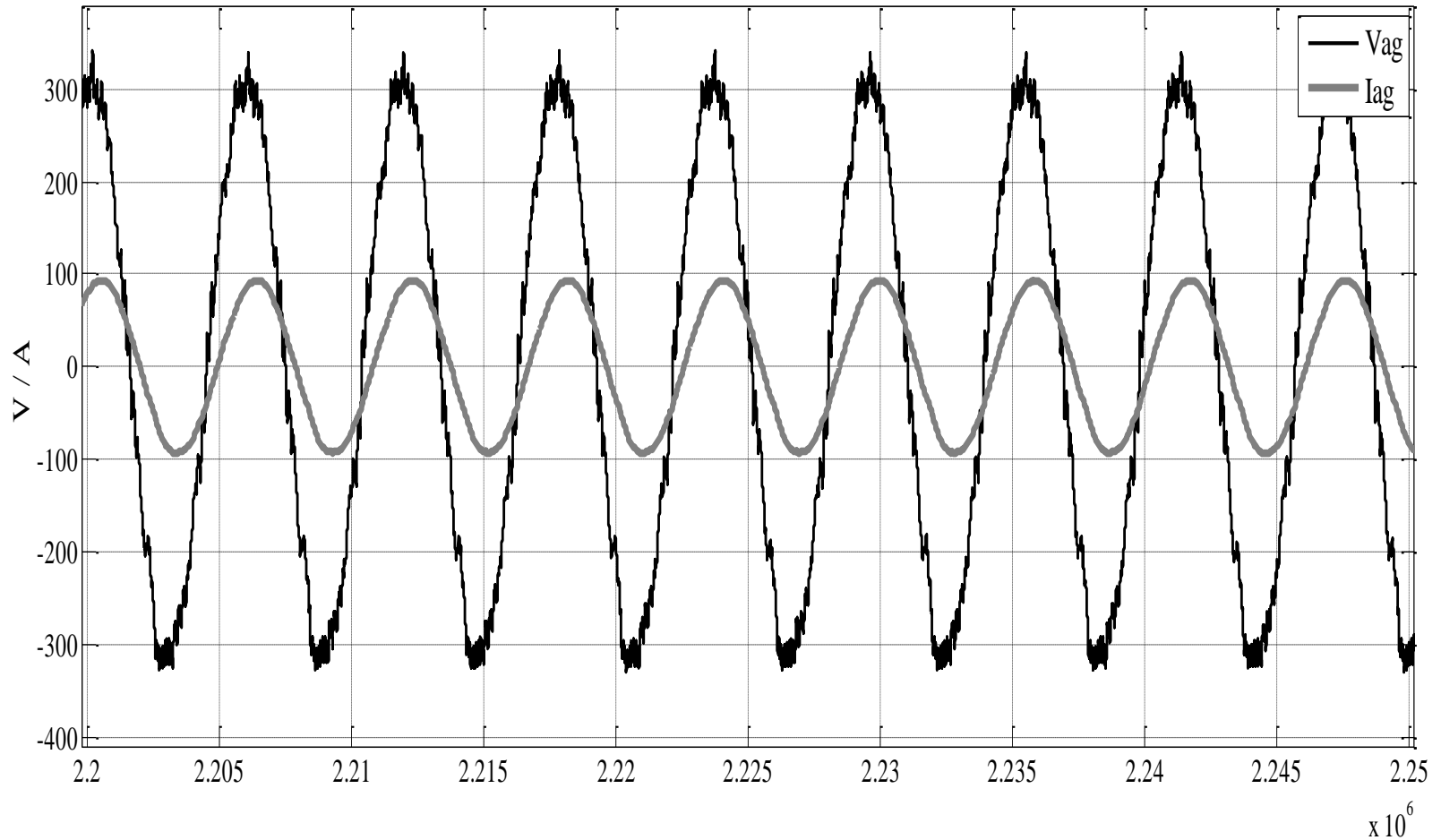
Desempeño de modelo WECS PMSG





Desempeño de modelo WECS PMSG

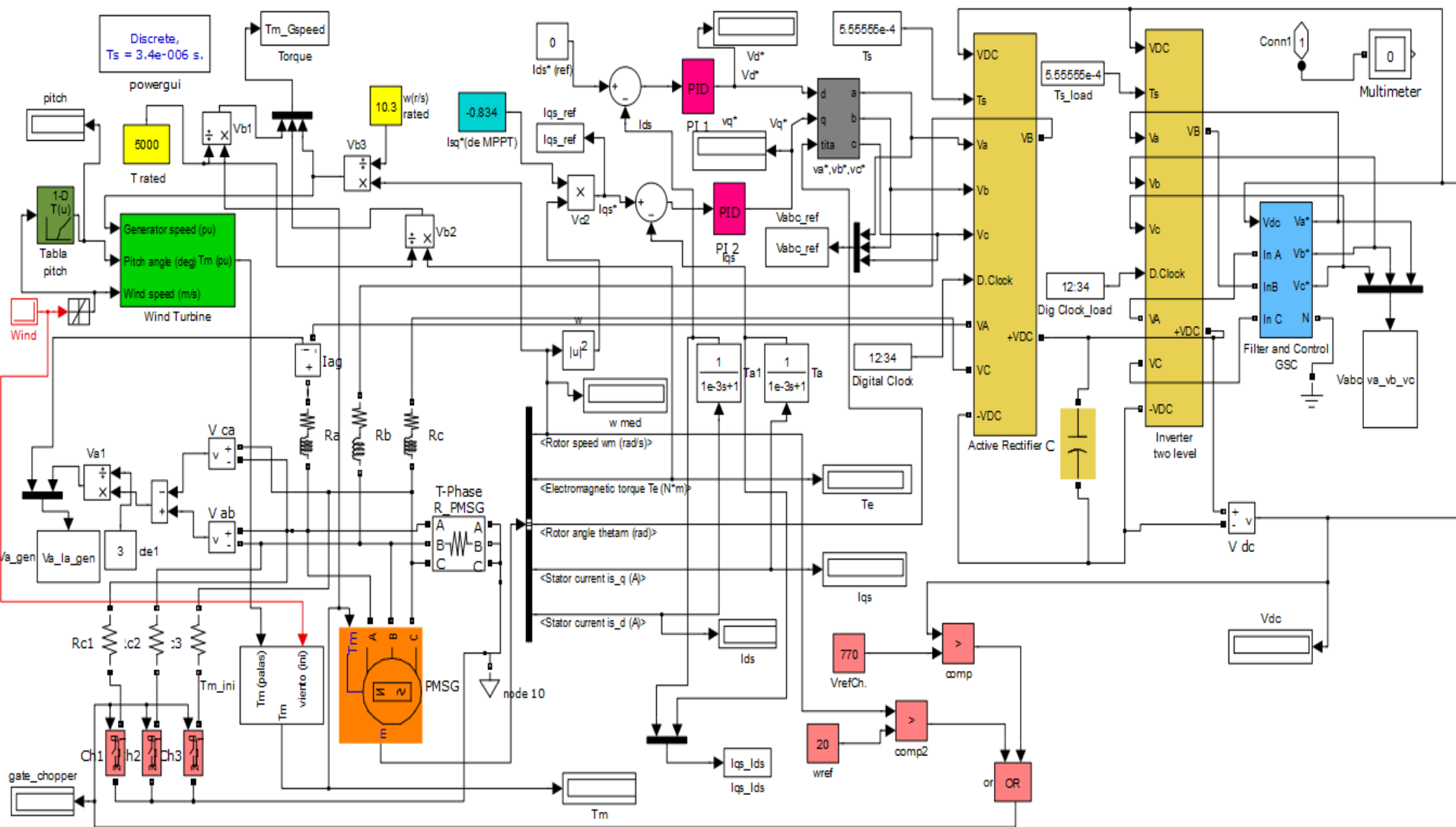
Tensión y Corriente de Fase en la Carga (0.9 L)





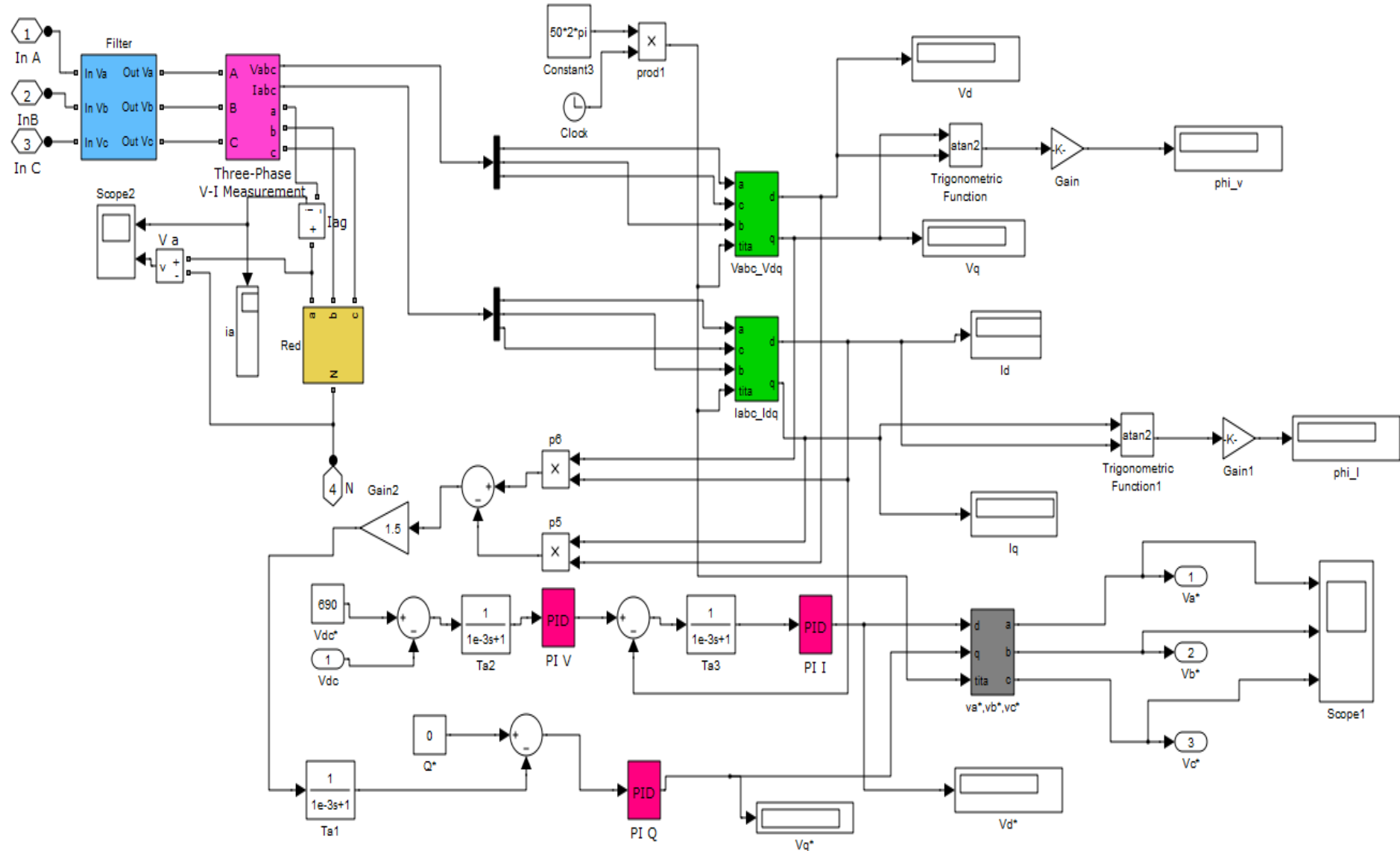
UTN FRN-FRH

Esquema de modelado de conversión de energía eólica PMSG con Conexión a la Red



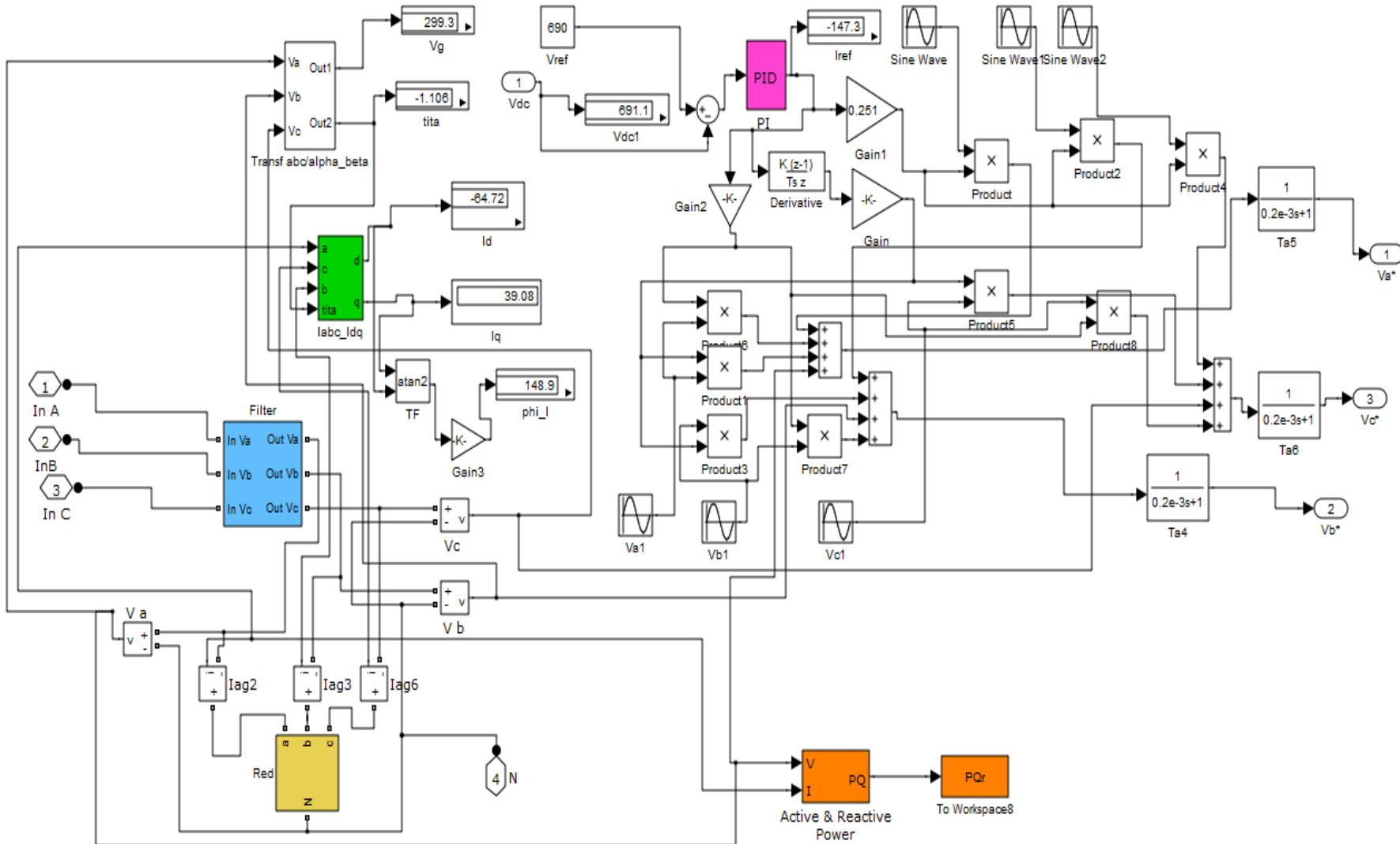


Filter and Control GSC (Grid Side Converter), VOC



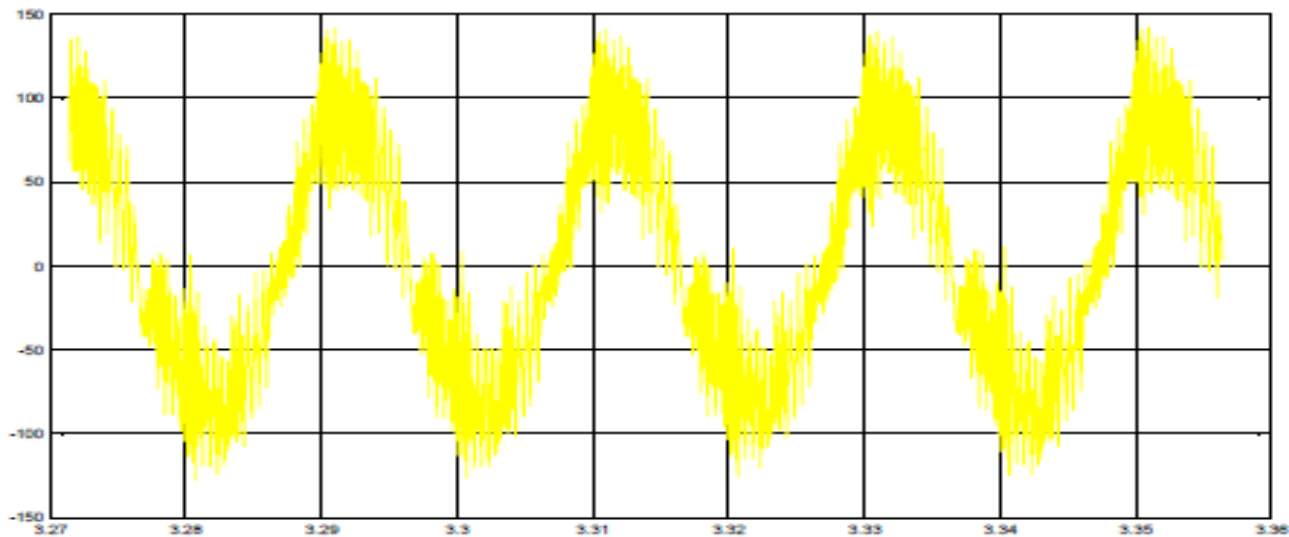
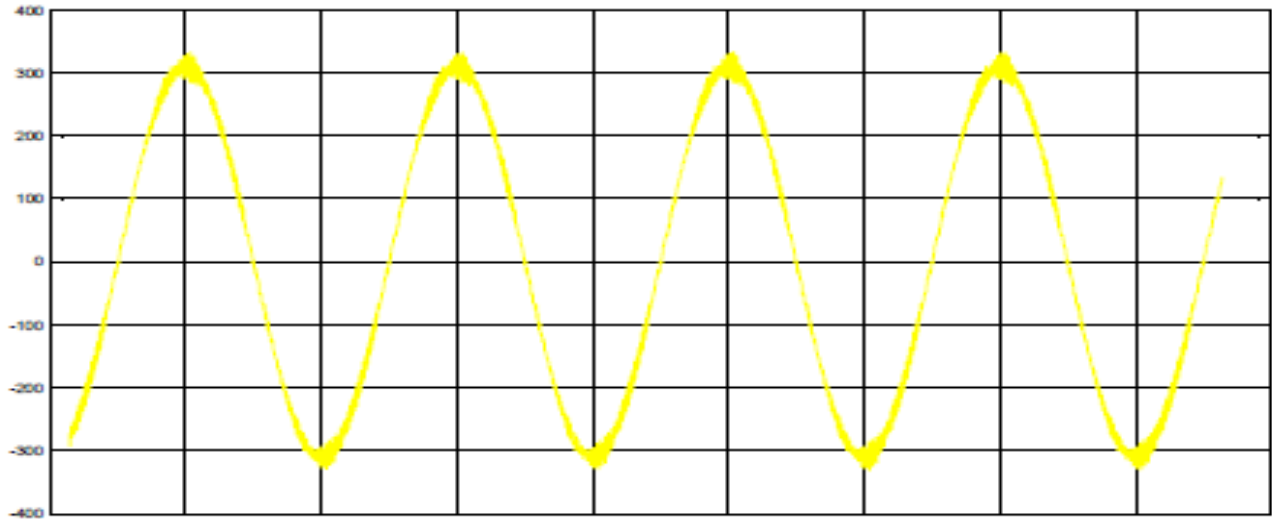


Control orientado al voltaje con medición indirecta de la corriente (Grid Side Converter)





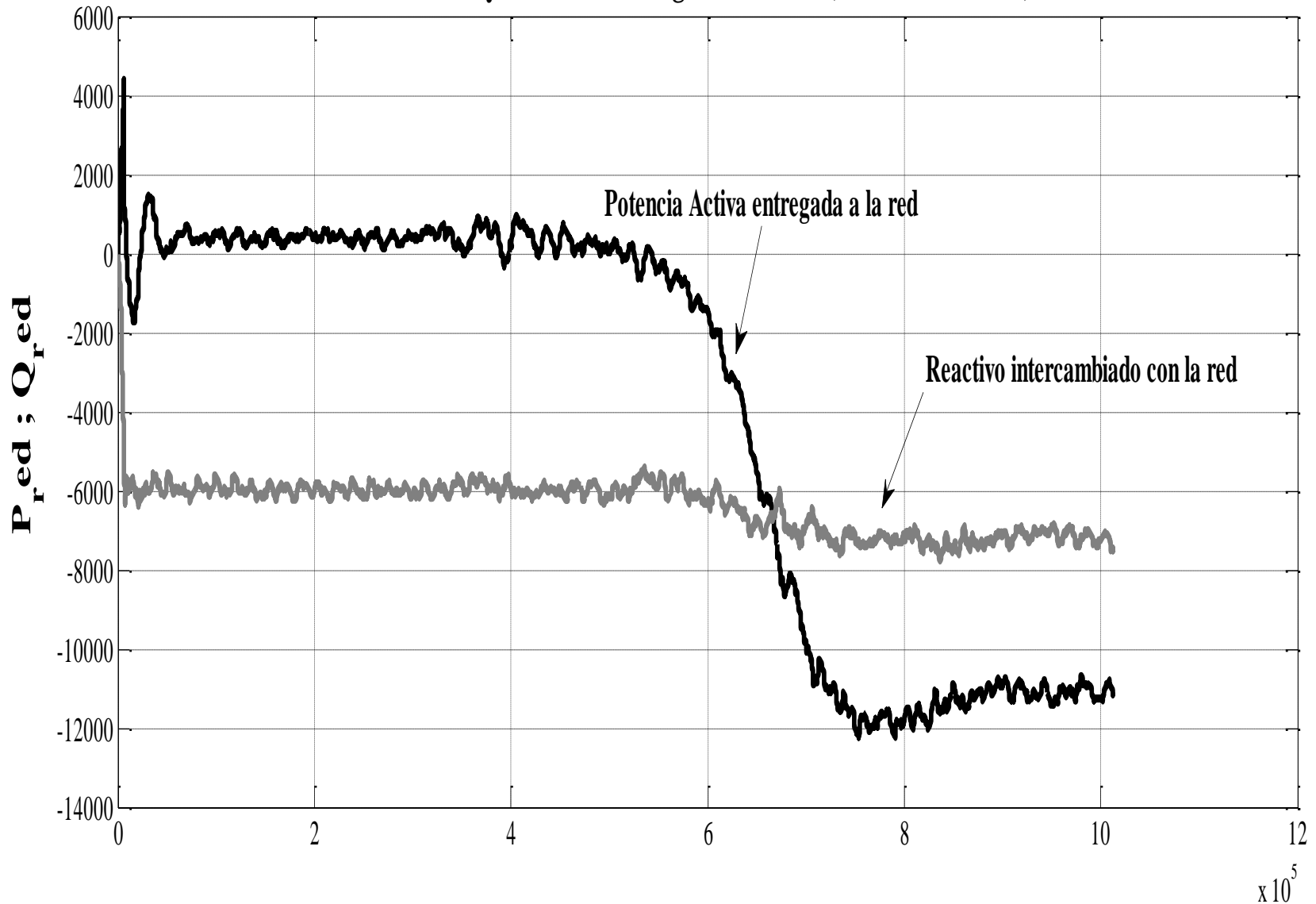
Desempeño sistema conectado a la red (una fase)





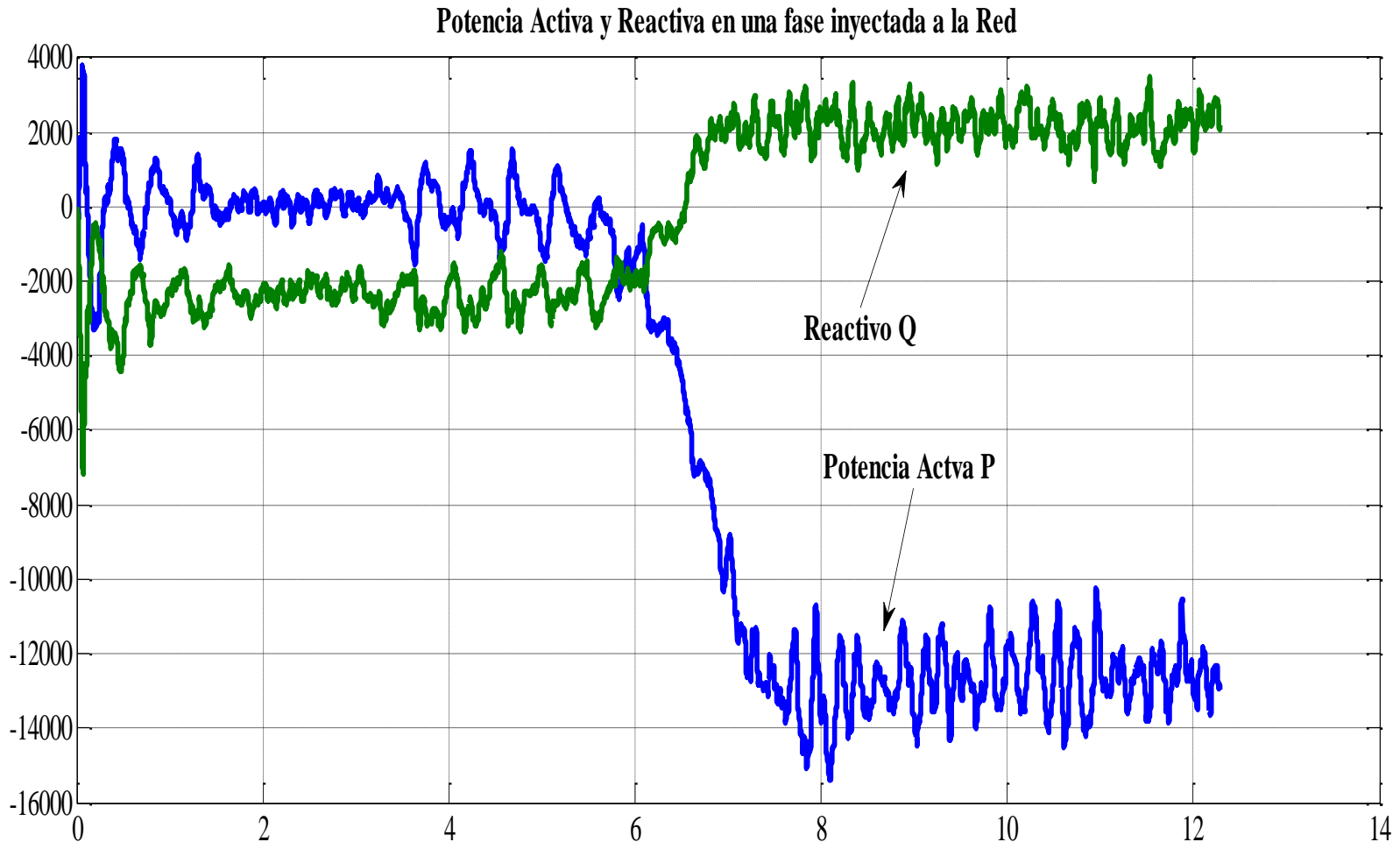
Desempeño sistema conectado a la red (una fase)

Potencia y Reactivo entregado a la red (Simulación 3.5 S)





Desempeño sistema conectado a la red (una fase)





CONCLUSIONES

- ✓ El modelo, en etapa de simulación, entrega índices que validan la bondad de la propuesta desarrollada (Wu, B., Yongqiang, L., Zargari, N. & Kouro, S. (2011). Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc..)
- ✓ Permite, en principio dado los costos, realizar pruebas de desempeño a través de prototipo en potencia menor a la planteada (del orden del kW).
- ✓ Una mayor frecuencia de muestreo permitirá mejor desempeño global del sistema (10 kHz). Se trabaja a menor valor (1.8 kHz) con el fin de disminuir el consumo de recurso informático y por ende reducir los tiempos de las corridas. Dicho valor de muestreo sin embargo es indicador del buen funcionamiento del modelo elaborado.
- ✓ Aplica y verifica lo hecho en trabajo anterior (tesis de maestría), donde se modela y simula una propuesta de convertidor en dos niveles en modulación SVM con arreglo de disparo de los interruptores de potencia que brinda resultados satisfactorios de THD a la salida del convertidor.
- ✓ Corrobora el buen desempeño del control de potencia tanto en carga parcial como total, en donde en la primera (por debajo del viento nominal) el MPPT permite adquirir la máxima potencia del viento incidente. Superado dicho límite el control de paso de pala actúa correctamente de manera de mantener la potencia a la nominal
- ✓ El control adoptado, para la conexión a la red, cumple con el objetivo de mantener la barra de DC en su referencia (690V) y permite la inyección del activo generado por el rotor. Más allá de esto se debe seguir trabajando para un mejor desempeño del reactivo intercambiado.



Muchas Gracias

¿CONSULTAS?