



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Titulació:

MÁSTER EN INGENIERIA DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS

**Título del trabajo
de fin de Máster**

Estudio del accionamiento electromecánico basado en el control vectorial de un motor síncrono de imanes permanentes superficiales de 376W para una máquina hiladora de fibra de alpaca en el contexto andino rural del Perú

Presentado por:

Wohler Gonzales Saenz

Directores:

**Dr. Gabriel Garcerá Sanfeliú
Dr. Emilio Figueres Amorós**

Valencia, julio 2018.

1. Descripción del problema.

2. Requerimientos mecánicos de la Máquina hiladora

3. Caracterización y modelado en «dq0» del SPMSM 1FK7-SIEMENS

4. Controladores de los lazos de corriente y velocidad del esquema de control vectorial

5. Resultados de la simulación del control del accionamiento electromecánico

6. Análisis térmico del inversor

Descripción del problema



Producción artesanal de hilo.



Región andina rural Huancavelica.
Habitantes: 310 775.
Población alpacas, ≈ 308 mil
Diámetro fibra de alpaca, $\approx 23 \mu\text{m}$
Uso artesanal de la fibra = $\approx 30\%$
Costo: 1 Kilo \approx (S/ 17.62 \approx 5eu)
Hilo: 1 Kilo \approx (S/ 75.50 \approx 20.43eu)
Aplicaciones: Tejido a punto y plano.

Fuente: Censo Inei, cicca,
vecinos Perú, otros(Ref. bibliog.1-6)



Problema:

Producción artesanal de hilo de fibra de alpaca con reducida calidad.

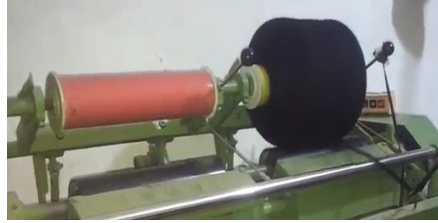
- Sin Título o numeración del hilo(número métrico o tex).
- Torsión irregular del hilo (vueltas-metro).
- Velocidad de torsión no definido (rpm).
- Diámetro heterogéneo del hilo y susceptible a la fractura(mm).
- 01 sentido de torsión, (S)

Objetivo:

Estudiar el accionamiento electromecánico basado en el control vectorial de un motor de imanes permanentes para accionar una máquina hiladora, tal que su velocidad de torsión del hilo sea constante frente al incremento de par de carga.

Requerimientos: La máquina hiladora

Partes de la hiladora: Torcedor y bobinadora



Requerimientos: Ref. bibl.(6-10)

- Hilo para tejido a punto y tejido plano.
- Titulo del hilo : 5nm (número métrico)
- Diámetro del hilo : 1.063 mm (5km- 1kg de fibra)
- Torsión del hilo : 213 vueltas/metro
- Sentido de torsión : S, Z
- Carrete en la bobinadora : 3 Und.
- Total de torcedores : 3 Unid.
- Total de hilo : 30kg.

Velocidad del motor

6400 rpm

Velocidad de la bobinadora

240.62 rpm

Velocidad del torcedor

213 rps

Momento de inercia de la torcedora, $J_{torcedora}$

136.0 e-6 kgm²

Momento de la inercia de la bobinadora, $J_1 + J_{(r2)}$

151.14 e-3 kgm²

Momento de inercia del motor, J_m

28.0 e-6 kgm²

Par de torsión bobinadora, $T_{mbobinadora}$

0.179 Nm

Par de la torcedora, $T_{torcedora}$

0.3650 Nm

Par de inercia del motor, $T_{inercia_motor}$

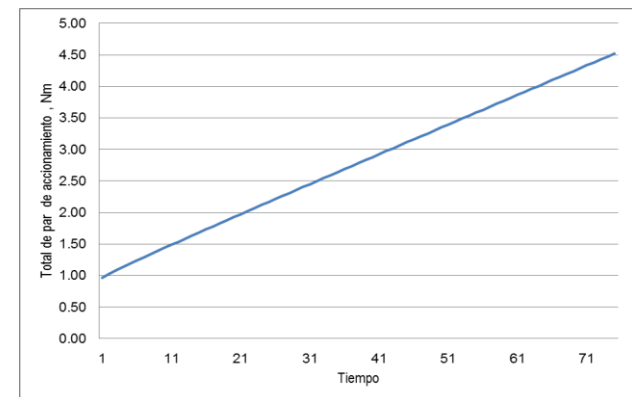
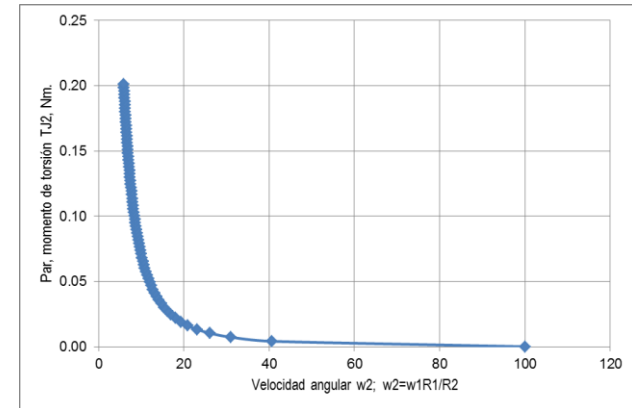
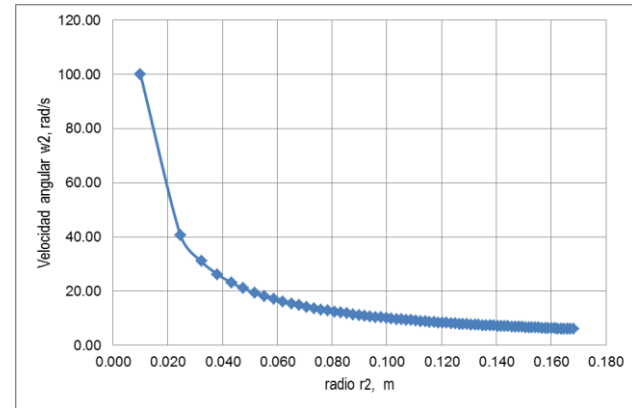
0.0188 Nm

Par de accionamiento electromecánico T_{em}

0.563 Nm

Potencia mecánica, P

377.32 W



Motor SPMSM 1FK7-SIEMENS

Ficha técnica: Asociada a la maquina hiladora

Datos técnicos	Unidad	Cantidad
Velocidad de giro nominal, Nr_{nom}	rev/min ó rpm	6000
Número de polos, PP	Par de polos	3
Par nominal (100°K), Te	Newton metro, Nm	0.6
Corriente nominal, Is	Amperio, A	1.4
Corriente rotor parado(100°K), Is_{max}	Amperio, A	1.8
Par máximo, T_{max}	Newton metro, Nm	2.4
Momento de inercia, sin freno	10e-4 kgm ²	0.28
Potencia óptima,	Kilo Watt, kW	0.376
Velocidad mecánica máxima, Nr_{mm}	rev/min ó rpm	10000

Tensión de fcm inducida

$$E_{FF} = kE \cdot \frac{Nr_{nom}}{1000} = 174 \text{ V.}$$

$$E = \frac{E_{FF}}{\sqrt{3}} = 100.4589 \text{ V}$$

Flujo magnetizante (λ_f) e inductancia sincr. (L_s)

$$\lambda_f = \frac{E \sqrt{2}}{\omega_r} = 0.07537 \text{ wb} \cdot \text{vuelta}$$

$$L_s = L_k + L_m = 6.57 \text{ mH}$$

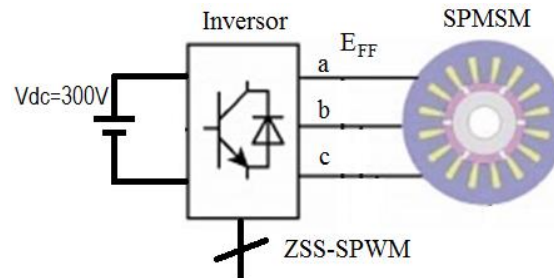
Voltaje mínimo del accionamiento

Tabla 3.4. Tensión mínima de línea E_{FF}

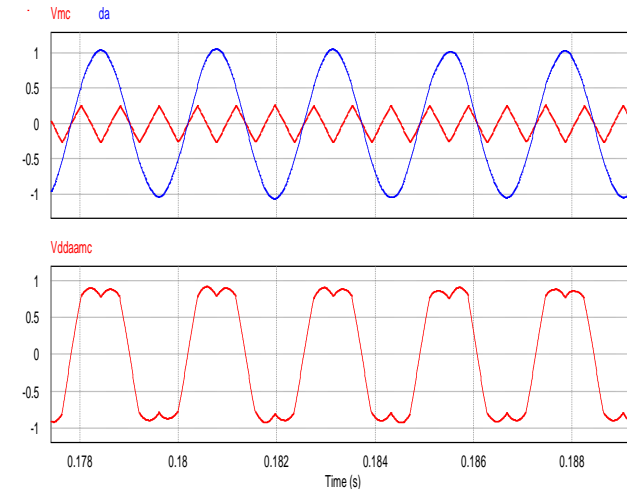
Nr (rpm)	$\sqrt{3} \cdot Vs$ (Is, Nr) $Is=1.4 \text{ A}$	$\sqrt{3} Vs$ (Is_{max}, Nr) $Is_{max}=1.8 \text{ A}$
2500	73.5718	74.2634
6000	176.5724	178.2322
6400	188.3439	190.1144
7000	206.0009	207.9375

Límites: Tensiones, corrientes rms
 $Vs_{lim} = 1.1$. $Vs_{nom} = 110.50 \text{ V}$
 $Is_{lim} = 1.29$. $Is_{nom} = 1.806 \text{ A}$

Tensión Vdc $E_{FF} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} k_{inv} \cdot Vdc \cdot ma$



Nr (rpm)	Vdc $Is=1.4 \text{ A}$	Vdc $Is_{max}=1.8 \text{ A}$
6000	250.7318	253.0887
6400	267.4472	269.9613
7000	292.5201	295.2700



Modelado del motor en dq0



$$V_d = r_s \cdot I_d - \omega_r L_s I_q$$

$$V_q = r_s \cdot I_q + \omega_r L_s I_d + \omega_r \lambda_f$$

$$V_{dq} = V_d + jV_q = r_s \cdot I_d - \omega_r L_s I_q + j r_s \cdot I_q + j \omega_r L_s I_d + j \omega_r \lambda_f$$

$$V_{max} = \sqrt{2} V_{s_lim} = 156.27V$$

$$I_{max} = \sqrt{2} I_{s_lim} = 2.554A$$

$$P = \frac{3}{2} (V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q) = \frac{3}{2} r_s [(I_d)^2 + (I_q)^2] + \frac{3}{2} \omega_r \cdot \lambda_f I_q$$

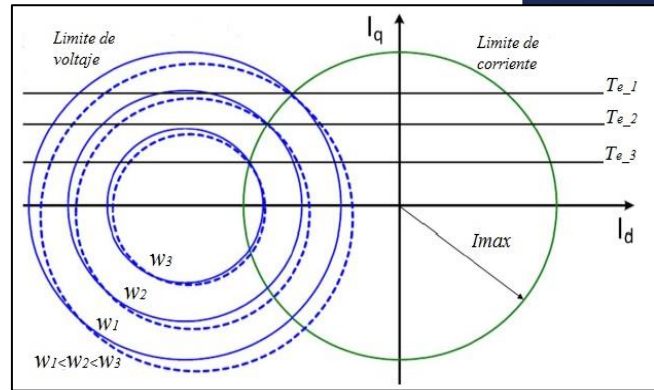
$$T_e = PP \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{3}{2} \cdot PP \cdot \lambda_f I_q$$

Par del accionamiento

$$I_{max}^2 \geq I_d^2 + I_q^2 ;$$

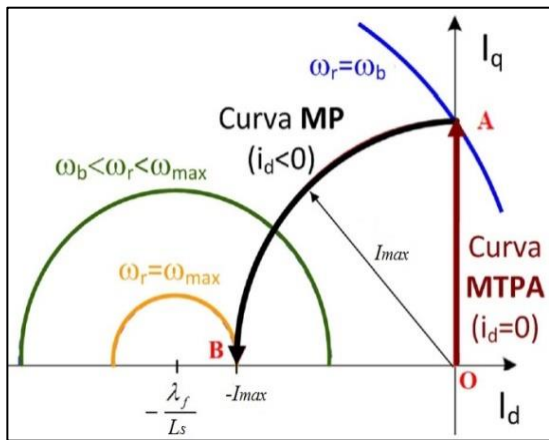
$$V_{max}^2 \geq V_d^2 + V_q^2$$

$$\frac{V_{max}^2}{(\omega_r L_s)^2} \geq \left(i_d + \frac{\lambda_f}{L_s} \right)^2 + (i_q)^2$$

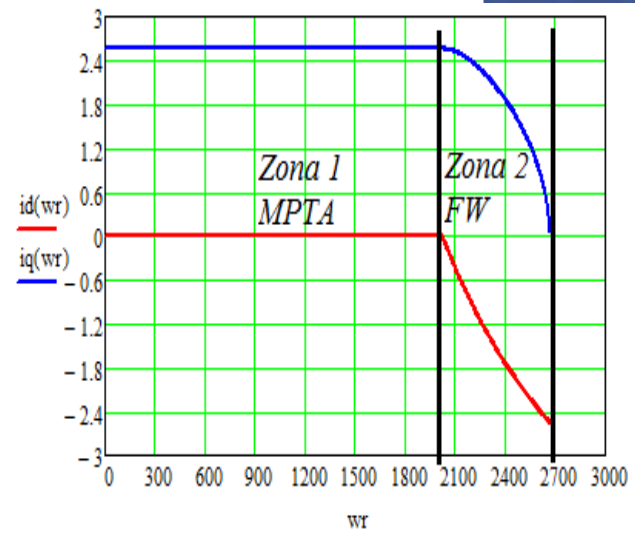


Control FOC, Velocidad finita, 2 regiones de funcionamiento del SPMSM

Variable	Zona 1 MPTA	Zona 2 FW
ω_r (rad/s)	2023	2667
f_r (Hz)	322	424
N_r (rpm)	6442	8490
i_d (A)	0	-2.5533
i_q (A)	2.5540	0.0615
T_{em_max} (Nm)	0.866	0.0209



FOC, Ref. Iq(par), id(flujo)



Esquema del control FOC

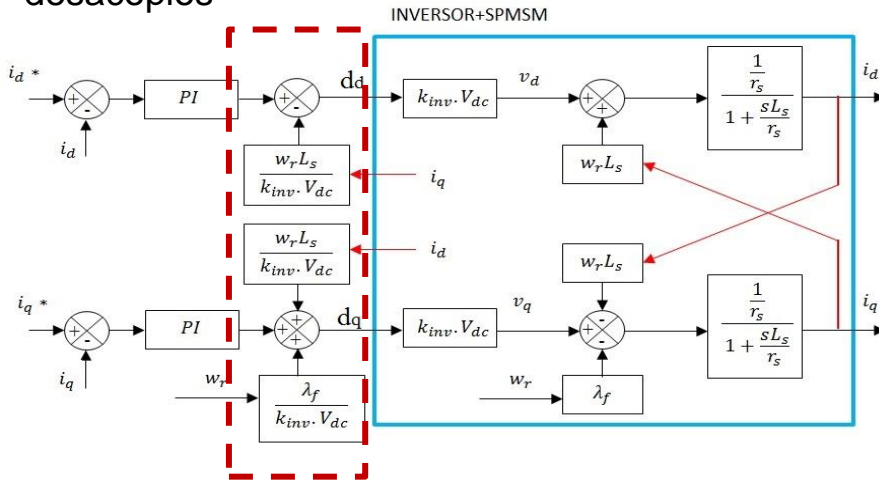


LAZO DE CORRIENTE

Programación de referencia: MPTA, FW

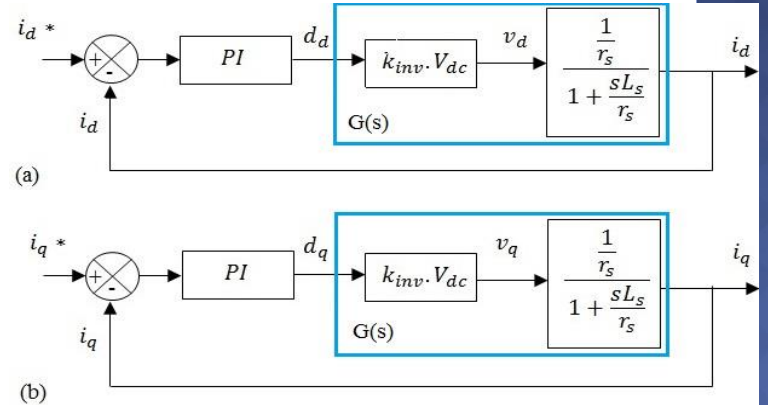
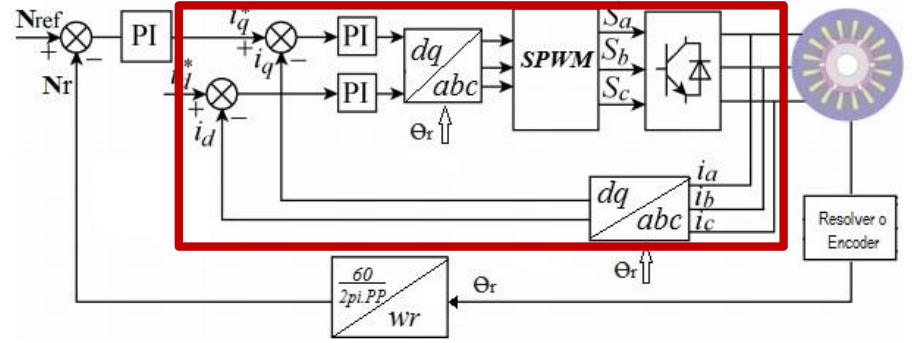
1. $i_d^* = I_{d_ref} = 0 - 2.55A$
2. Limite de $i_q^* = i_{q_Lim} = 2.55A$
3. Frecuencia de corte, $f_{ci} = f_{sw}/20 = 500Hz$

Adición de desacoplos



$$\begin{aligned} v_d &= r_s \cdot i_d + sL_s i_d - w_r L_s i_q \\ v_q &= r_s \cdot i_q + sL_s i_q + w_r L_s i_d + w_r \lambda_f \end{aligned}$$

Planta (SPMSM) con componentes acopladas



$$FT i_{lazo_abierto} = PI \cdot k_{inv} \cdot V_{dc} \frac{\frac{1}{r_s}}{1 + \frac{sL_s}{r_s}}$$

$$FT i_{lazo_cerrado}; \frac{i_d}{i_d^*} = \frac{i_q}{i_q^*} = \frac{PI \cdot k_{inv} \cdot V_{dc}}{r_s + sL_s + PI \cdot k_{inv} \cdot V_{dc}}$$

Esquema del control FOC



LAZO DE VELOCIDAD

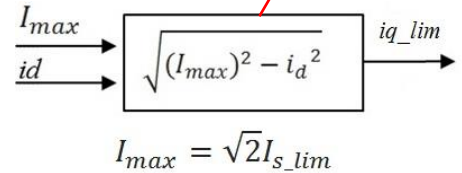
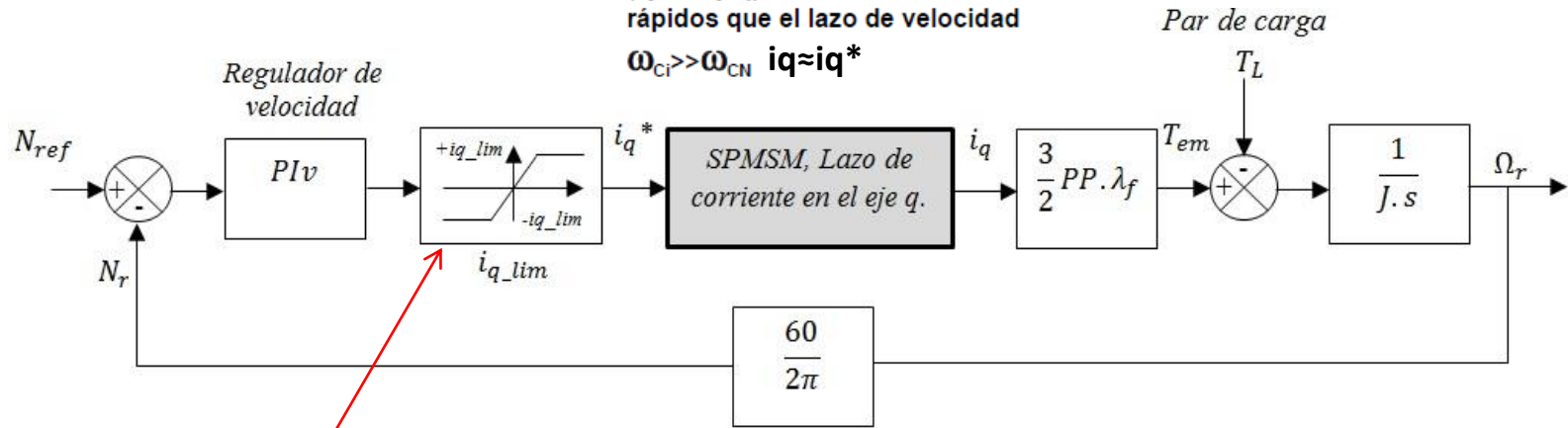
Variable	Zona 1 MPTA	Zona 2 FW
w _r (rad/s)	2023	2667
f _r (Hz)	322	424
N _r (rpm)	6442	8490
i _q (A)	2.5540	0.0615
Tem_max (Nm)	0.866	0.0209

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot PP \cdot \lambda_f I_q$$

$$N_r = \frac{w_r}{PP} \frac{60}{2\pi} = \Omega_r \cdot \frac{60}{2\pi}$$

$$f_{cv} = f_{ci} / 20 = 25 \text{ Hz}$$

CONDICIÓN: los lazos de corriente (ejes d y q) son mucho más rápidos que el lazo de velocidad
 $\omega_{Ci} \gg \omega_{CN}$ $i_q \approx i_q^*$



$$FTv_{lazo_abierto} = PIv \cdot \frac{3}{2} PP \cdot \lambda_f \cdot \frac{1}{J \cdot s} \cdot \frac{60}{2\pi}$$

$$FTv_{lazo_cerrado}; \frac{N_r}{N_{ref}} = \frac{PIv \cdot 3 \cdot PP \cdot \lambda_f \cdot 60}{2 \cdot J \cdot s \cdot 2\pi + PIv \cdot 3 \cdot PP \cdot \lambda_f \cdot 60}$$

Diseño de reguladores-FOC



LAZO DE CORRIENTE

1. Frec. Conmut. VSI, fsw=10kHz;
2. Frec.corte fci=fsw/20, fci=500Hz;
3. Discretización, Frec. muestreo, fs=20kHz
4. Pendiente fci; -20dB/dec
5. Margen de fase=90°

$$G(s) = \frac{173.2}{0.00657 s + 4.2}$$

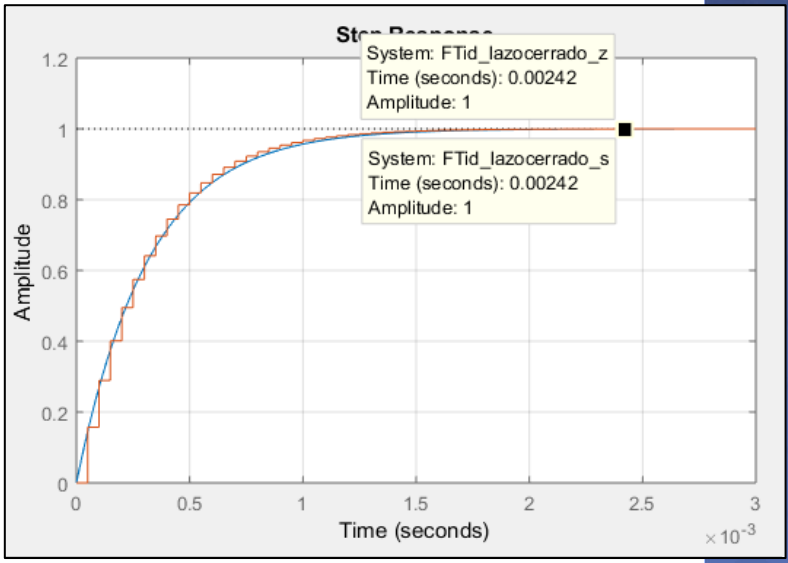
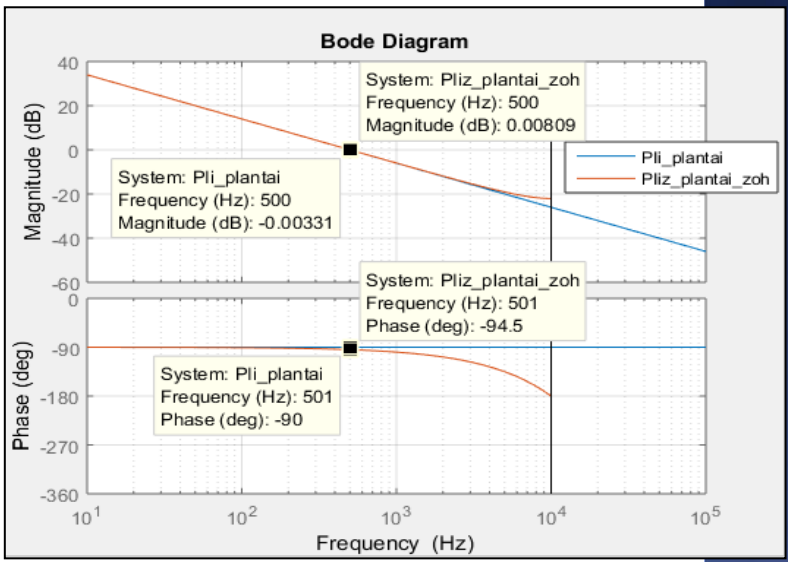
$$PI_{id}(s) = PI_{iq}(s) = \frac{9.078 s + 5803}{76.18 s}$$

$$K_{pd} = K_{pq} \approx 0.1192$$

$$K_{id} = K_{iq} \approx 76.1796$$

$$FT_{id}(s) = FT_{iq}(s) = \frac{3142}{s}$$

$$FT_{id}(z) = FT_{iq}(z) = \frac{0.1571 z^{-1} - 0.1521 z^{-2}}{1 - 1.969 z^{-1} + 0.9685 z^{-2}}$$



LAZO DE VELOCIDAD

1. Inercia de la carga: $J_{max}, J_{min}, J_{media}$
2. Frec.corte $f_{cv}=f_{ci}/20, f_{ci}=25$ Hz
3. Frec.corte minimo; $f_{cv_min}=12.5$ Hz
4. Frec.corte maxima; $f_{cv_max}=136$ Hz
5. Margen de fase $\approx 90^\circ$ [$f_{vc_min}-f_{vc_max}$]
6. Pendiente en f_{ci} ; -20 dB/dec
7. Margen de fase= 90°
8. Discretización, $f_s=20$ kHz

$$H(s)_{J_{media}} = \frac{20.35}{0.0009676s}$$

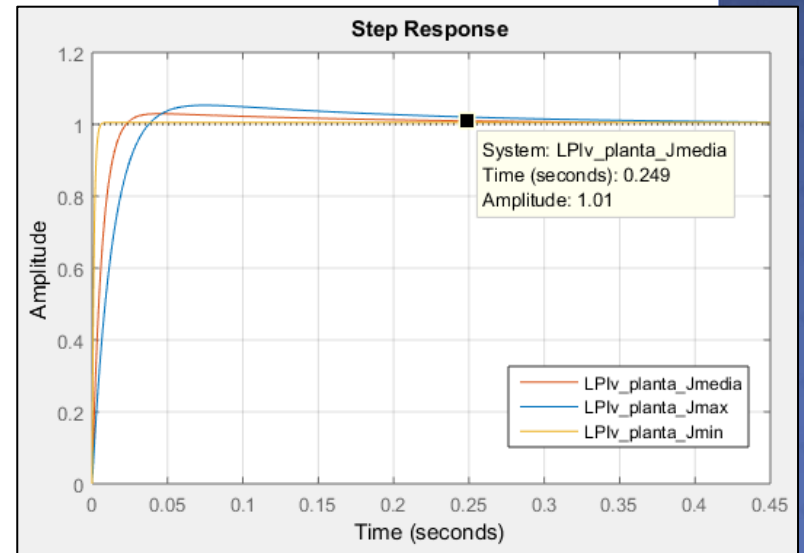
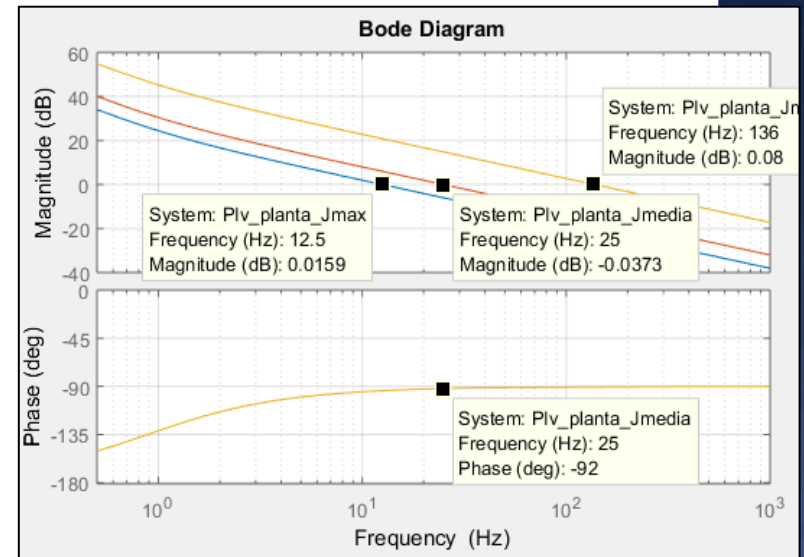
$$PI_v(s) = \frac{0.00744588s + 0.041366}{s}$$

$$k_{pv} = 0.00744588$$

$$k_{iv} = 0.041366$$

$$FT_{v_Lazo_abierto}(s) = \frac{156.6s + 869.9}{s^2}$$

$$FT_v(z)_{J_{media}} = \frac{0.00783z^{-1} - 0.007828z^{-2}}{1 - 2z^{-1} + z^{-2}}$$

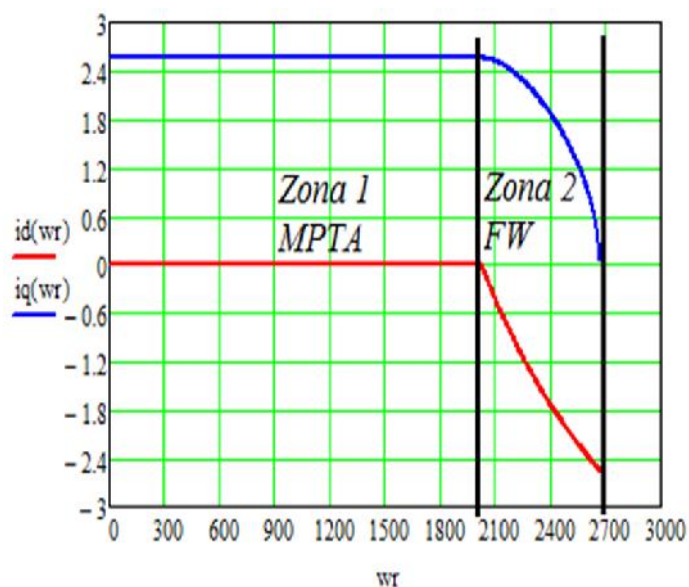


Resultados del Control Vectorial



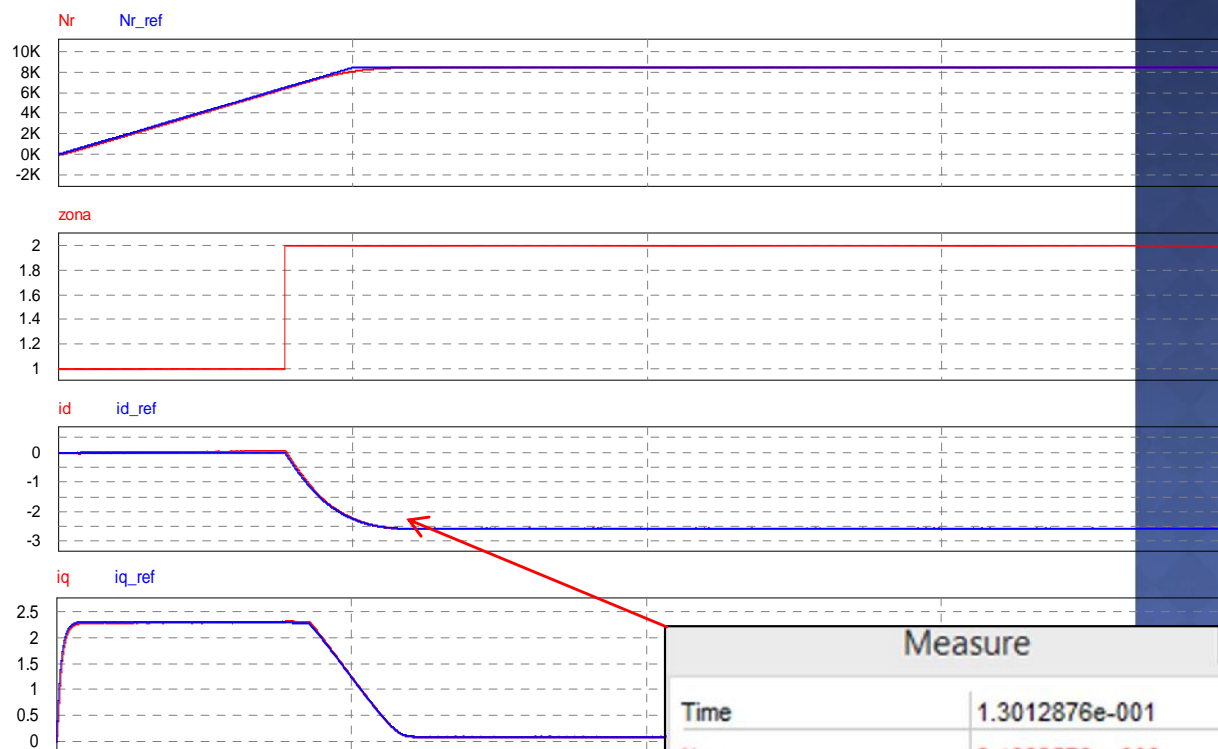
SEGUIMIENTO DE REFERENCIAS

Estrategia de control FOC
MPTA, FW (Velocidad finita)



Variable	Zona 1 MPTA	Zona 2 FW
wr (rad/s)	2023	2667
fr (Hz)	322	424
Nr (rpm)	6442	8490
id (A)	0	-2.5533
iq (A)	2.5540	0.0615

Ref. PAR iq_ref vs iq
Ref. FLUJO id_ref vs id .



Measure	
Time	1.3012876e-001
Nr	8.4882578e+003
Nr_ref	8.4900000e+003
zona	2.0000000e+000
id	-2.5527563e+000
id_ref	-2.5523744e+000
iq	9.2177190e-002
iq_ref	9.3045451e-002

SEGUIMIENTO A CAMBIOS DE PAR DE CARGA (A modo de escalones)

Zona 1, MPTA

Nr= 0 - 5153 rpm

Tcarga= 0.06Nm - 0.6 Nm (10%-100%)

Jcarga=0.56e-4 kgm2

Measure	
Time	3.9298881e-001
Nr	5.1597998e+003
Nr_ref	5.1536000e+003
Tcarga_1	6.0000048e-002
Tem_PMSM1	9.5951528e-002
iq	1.9146250e-001
iq_ref	1.9440812e-001
id	-4.7493726e-003
id_ref	0.0000000e+000



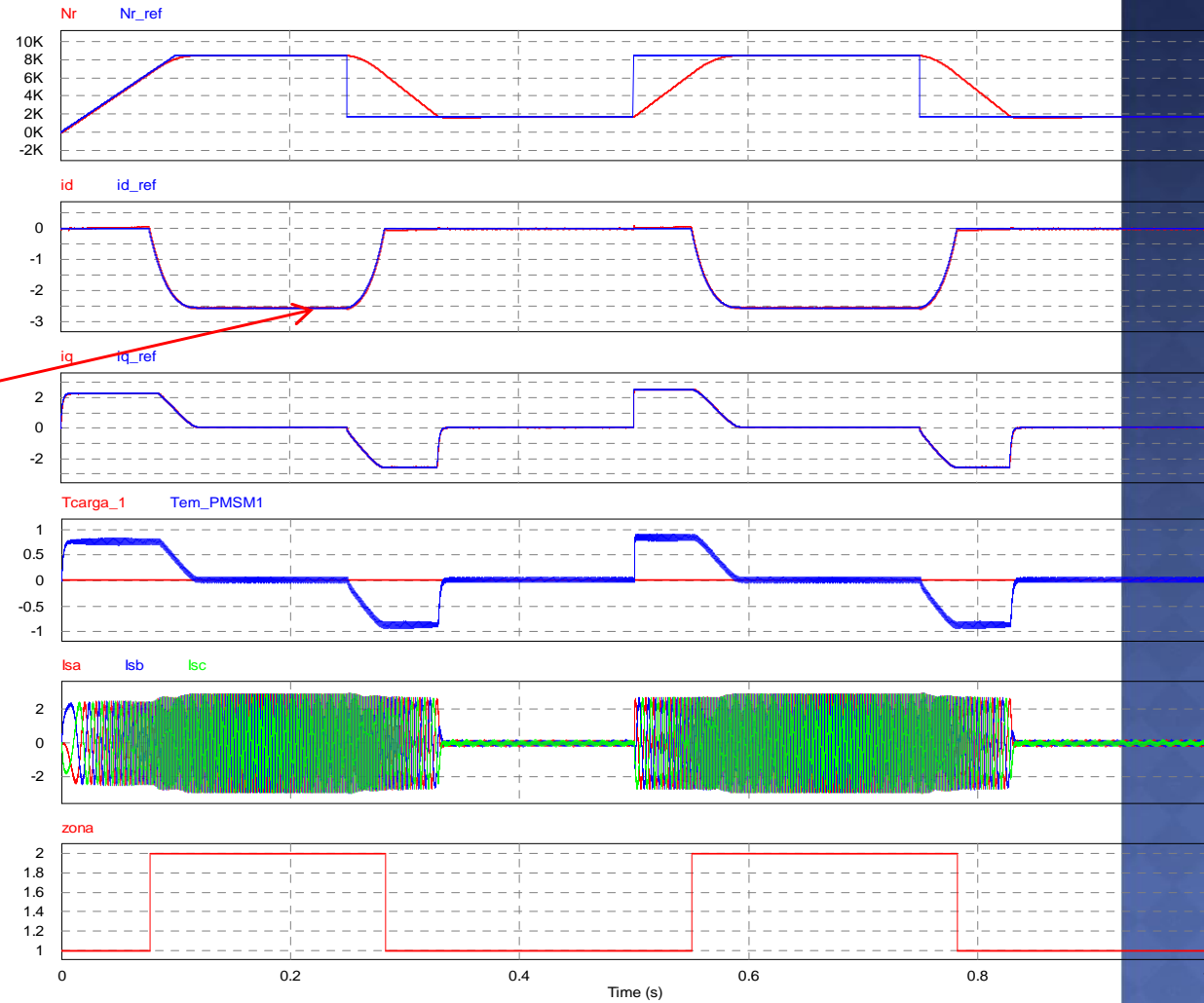
Resultados del Control Vectorial



SEGUIMIENTO A CAMBIOS DE VELOCIDAD (A modo de escalones)

Zona 1, 2, MPTA, FW
Nr=1698rpm-8490 rpm (20% - 100%)
Tcarga= 0.02Nm
Jcarga=0.56e-4 kgm²

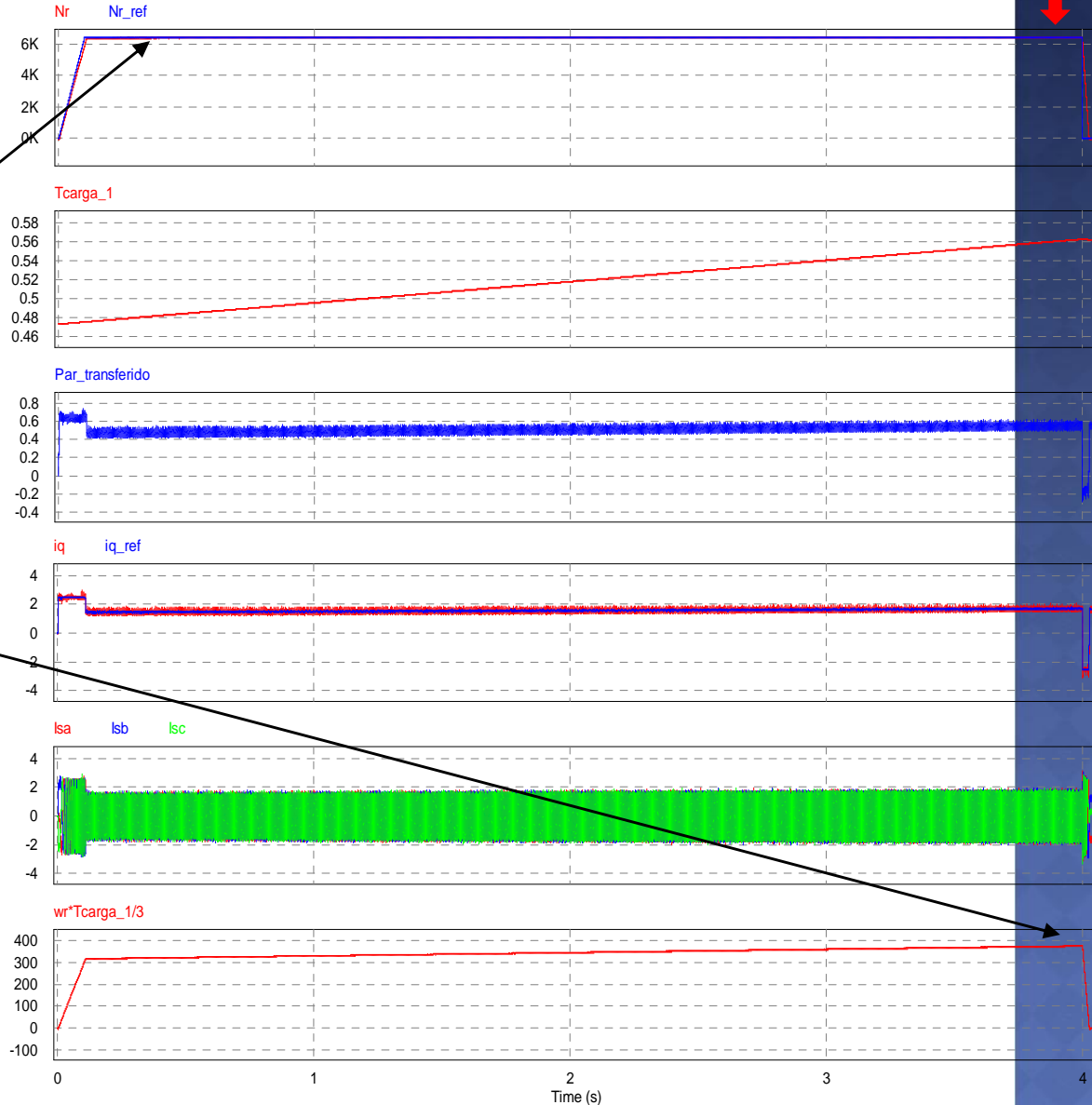
Measure	
Time	2.3862661e-001
Nr	8.4880329e+003
Nr_ref	8.4900000e+003
id	-2.5512578e+000
id_ref	-2.5521915e+000
iq	9.3869209e-002
iq_ref	9.7934172e-002
Tcarga_1	2.0000016e-002
Tem_PMSM1	3.9427579e-002
Isa	6.8363004e-001
Isb	-2.2154900e+000



ACCIONAMIENTO ELECTROMECHANICO DE LA MÁQUINA HILADORA

Measure	
Time	5.3579915e-001
Nr	6.4006361e+003
Nr_ref	6.4000000e+003
Tcarga_1	4.8548848e-001
Par_transferido	4.8599677e-001
iq	1.5243586e+000
iq_ref	1.4551841e+000
Isa	1.1215959e+000
Isb	-1.3108865e+000
Isc	1.8929058e-001
wr*Tcarga_1/3	3.2540998e+002

Measure	
Time	3.9830905e+000
Nr	6.3988213e+003
Nr_ref	6.4000000e+003
Tcarga_1	5.6262162e-001
Par_transferido	5.3094319e-001
iq	1.5432204e+000
iq_ref	1.7355539e+000
Isa	1.1414261e+000
Isb	-1.4563960e+000
Isc	3.1496998e-001
wr*Tcarga_1/3	3.7700334e+002



Análisis térmico del inversor



Pérdidas por conducción y conmutación IGBT FNB41060 , ZONA 1, 2

Pérdidas en el transistor:

$$P_{cond_Q} = V_{ce(sat)} * I_c * D$$

$$P_{sw_Q_on} = E_{on} * f * V_{cc} / V_{cc_datasheet}$$

$$P_{sw_Q_off} = E_{off} * f * V_{cc} / V_{cc_datasheet}$$

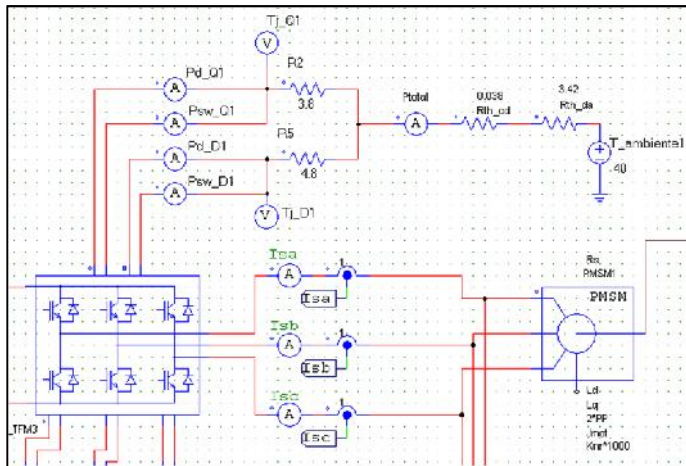
Pérdidas en el diodo

$$P_{cond_d} = V_d * I_f * D$$

$$P_{sw_d} = Err * f * V_R / V_{R_datasheet}$$

Pérdida total

$$P_{total} \approx P_{cond} + P_{sw}$$



$$P_{cond_Q} = 2.63 \text{ W.}$$

$$P_{cond_d} = 2.35 \text{ W.}$$

$$P_{sw_Q_on} = 4.27 \text{ W.}$$

$$P_{sw_Q_off} = 3.42 \text{ W.}$$

$$P_{sw_d} = 0.57 \text{ W.}$$

$$P_{cod} = 4.98 \text{ W.}$$

$$P_{sw} = 8.26 \text{ W.}$$

$$P_{total} = 13.24 \text{ W.}$$

$$N_r = 0-8490 \text{ rpm}$$

Zona 1,2.

$$T_{carga} = 0.02 \text{ Nm}$$

$$I_{c_max} = 1.806$$

$$f_{sw} = 10 \text{ kHz}$$

$$T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$$

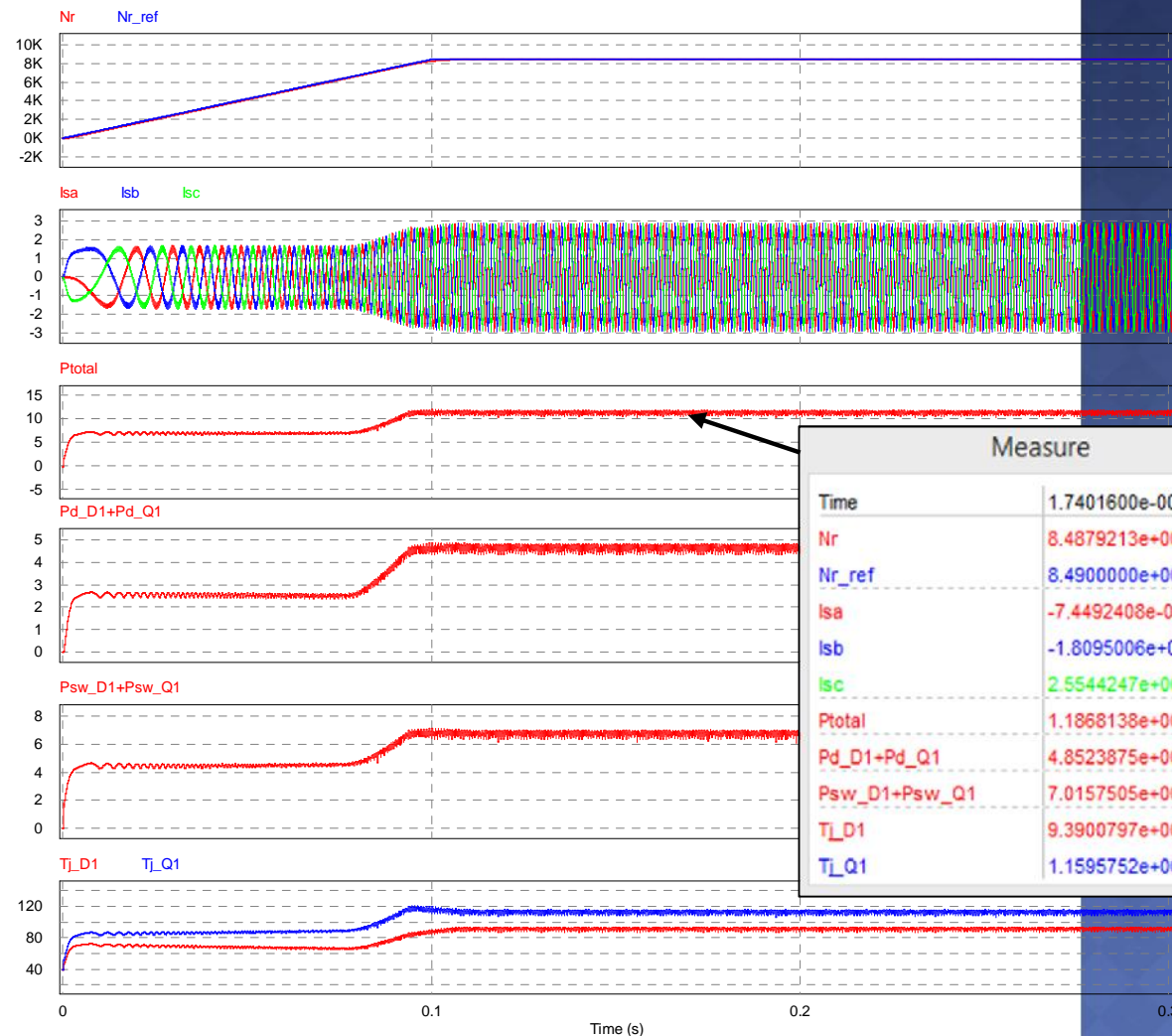
$$T_{seg.} = T_{jmax} - 25^\circ\text{C}$$

$$R_{th_da} = 3.42^\circ\text{C/W.}$$

$$P_{total} = 11.86 \text{ W.}$$

$$T_{j_D} = 93.9^\circ\text{C}$$

$$T_{j_Q} = 115.95^\circ\text{C}$$



En el Accionamiento electromecánico de la máquina hiladora

Condiciones:

Zona=1

Nr=6400rpm

Tcarga= 0.384Nm - 0.563Nm.

Fsw=10 kHz

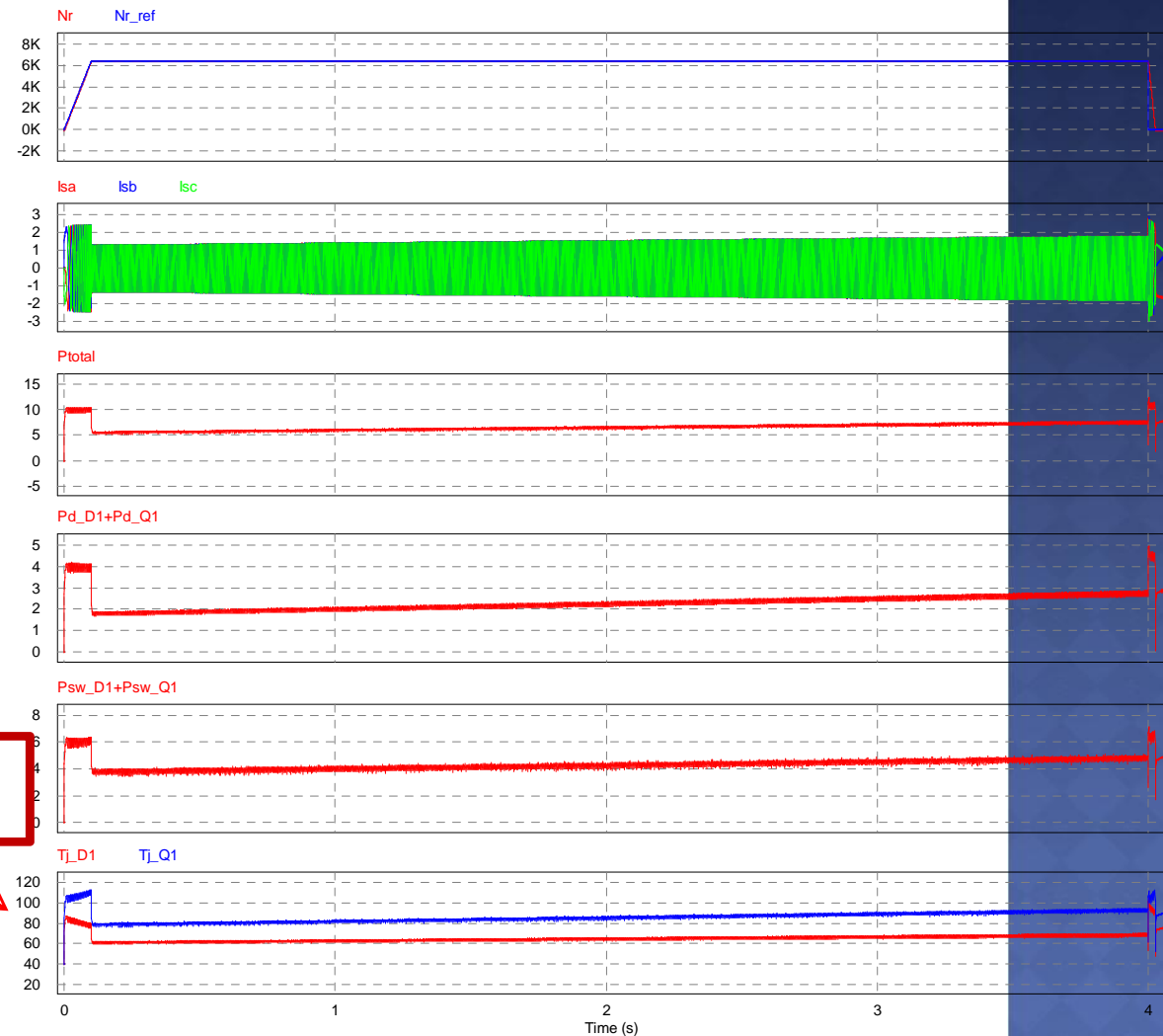
Tjmax=150°C

Tseg.= Tjmax-25°C = 125°C

Rth_da=3.42°C/W

Average Value	
Time To	4.0185590e+000
Isa	-4.2637567e-003
Isb	6.0211134e-003
Isc	-2.9422997e-003
Ptotal	6.6841495e+000
Pd_D1+Pd_Q1	2.3259122e+000
Psw_D1+Psw_Q1	4.3569240e+000
Pd_Q1+Psw_Q1	6.1767671e+000
Pd_D1+Psw_D1	5.0606910e-001
Tj_D1	6.5548682e+001
Tj_Q1	8.6582142e+001

Tj_Q = 112 °C
Tj_D = 90 °C



%Pérdidas IGBT = 6.68W/377W = 1.77 %

%Rendimiento IGBT= 98.2 %

Selección del radiador

$T_{jmax}=150^{\circ}\text{C}$

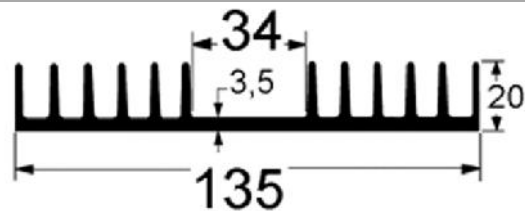
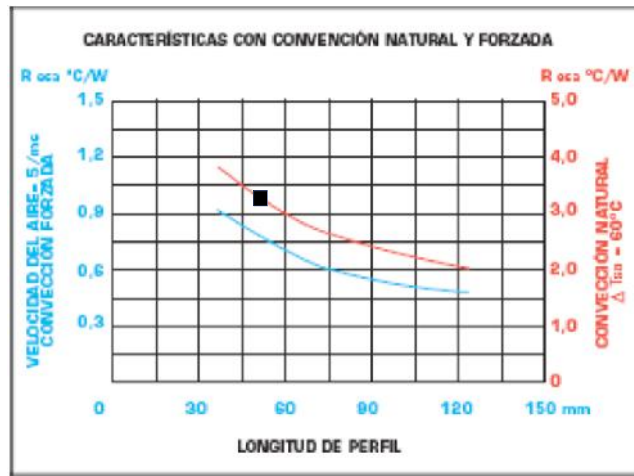
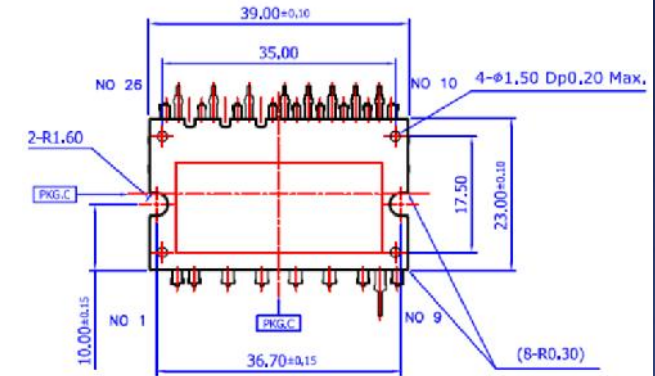
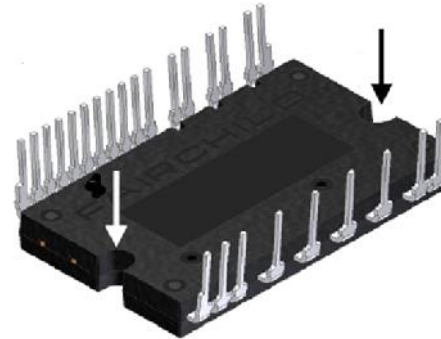
$R_{th_da}=3.42^{\circ}\text{C/W}$

Dimensiones IGBT: 39.00mm x 23.00mm

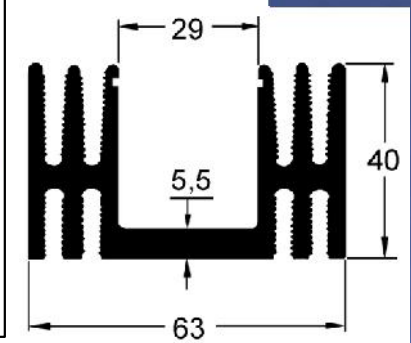
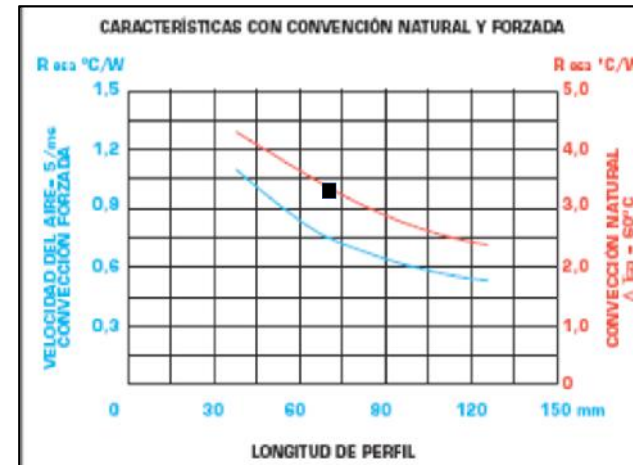
Posición espacial: Vertical

Evacuación del calor: Convección natural

Material: Aluminio anodizado Al Mg Si 0,5-T6



Disipador modelo U13520
Largo 135mm, ancho 48mm, altura 20mm.



Disipador modelo U6340
Largo 63mm, ancho 68mm, altura 40mm.

GRACIAS