

CONTROL ELECTRÓNICO DE ACCIONAMIENTOS Y SISTEMAS DE TRACCIÓN.

PRÁCTICA 3: Control por orientación de flujo (FOC: *Field Oriented Control*) de una máquina de inducción.

OBJETIVOS: En práctica los alumnos diseñarán los lazos de regulación de corriente (lazo de flujo en el rotor y lazo de par) de una máquina de inducción con **control FOC indirecto por orientación del flujo en el rotor** excitada por un VSI, así como el lazo externo de velocidad. El estudio estático de la máquina se realizó en la práctica 1. Para validar el ajuste del accionamiento se usará el software de simulación PSIMTM. Se simulará el control electrónico del accionamiento tanto en la zona 1 (zona de par y flujo en el rotor constantes), como en las zonas 2 y 3, correspondientes a velocidades mucho mayores que la nominal.

La máquina de inducción a la que se aplica el control FOC indirecto es una máquina de tracción de gran potencia en un tren eléctrico, cuyas características se muestran a continuación. Los devanados de estator se conectan en estrella, por lo que la tensión de excitación del estator es la tensión fase-neutro generada por el VSI trifásico, que trabaja a partir de una fuente de tensión DC de valor V_{dc} . Se dan tanto los valores nominales de la máquina como los de su circuito equivalente visto desde el estator, recogidos en la Tabla 1. Esta tabla también recoge los valores de la etapa de potencia y de la estrategia de debilitamiento de flujo (*flux weakening*) **con los límites $I_{s_lim0}=1,5 \cdot I_{s_nom}$, $V_{s_lim}=1,1 \cdot V_{s_nom}$** , tal como se calcularon en la práctica 1. La figura 1.1 recuerda las zonas de *flux weakening* que se obtienen con FOC.

Tabla 1. Valores nominales de la máquina de inducción y valores de la estrategia de *flux weakening* con la que se realiza el control FOC, sometido a los límites: $I_{s_lim0}=1,5 \cdot I_{s_nom}$, $V_{s_lim}=1,1 \cdot V_{s_nom}$.

DATOS MÁQUINA 1: Máquina de tracción de tren eléctrico	DATOS del control FOC
<ul style="list-style-type: none">- $P_{nom}=1,6785$ MW (2250 Hp)- $N_{r_nom}=1786$ rpm.- $V_{ff_nom}=2300$ V_{rms} \rightarrow $V_{s_nom}=1328$ V_{rms}- $f_{e_nom}=60$ Hz- $PP=2$- $R_s=29$ mΩ, $L_s=599,6$ μH- $L_m=34,59$ mH- $R_r=22$ mΩ, $L_r=599,6$ μH- Inercia de la máquina: $J_m=63,87$ kg·m²	<ul style="list-style-type: none">- Etapa de potencia: VSI trifásico con modulación PWM senoidal.- $V_{dc}=4200$ V- $f_{sw}=1$ kHz (frec. de conmutación)- $I_{s_lim0}=704$ A, $V_{s_lim}=1461$ V_{rms}- ZONA 1: $f_b=73,17$ Hz, $N_{r_b}=2171$ rpm, $\lambda_{dr_b}=4,26$ Wb, $T_{em_b}=12425$ Nm, $f_{slip_b}=0,8$ Hz, $S_b=0,011$, $P_{mec_b}=2,7533$ MW- ZONA 2: $f_1=196,41$ Hz, $N_{r1}=5804$ rpm, $\lambda_{dr_1}=1,16$ Wb, $T_{em_1}=3416$ Nm, $f_{slip_1}=2,95$ Hz, $S_1=0,015$- Inercia de la carga: hasta 10 veces J_m

<ul style="list-style-type: none"> - $I_{s_nom}=470$ A - $T_{em_nom}=8974,5$ Nm - $S_{nom}=0,0078$ - $f_{slip_nom}=0,468$ Hz 	
---	--

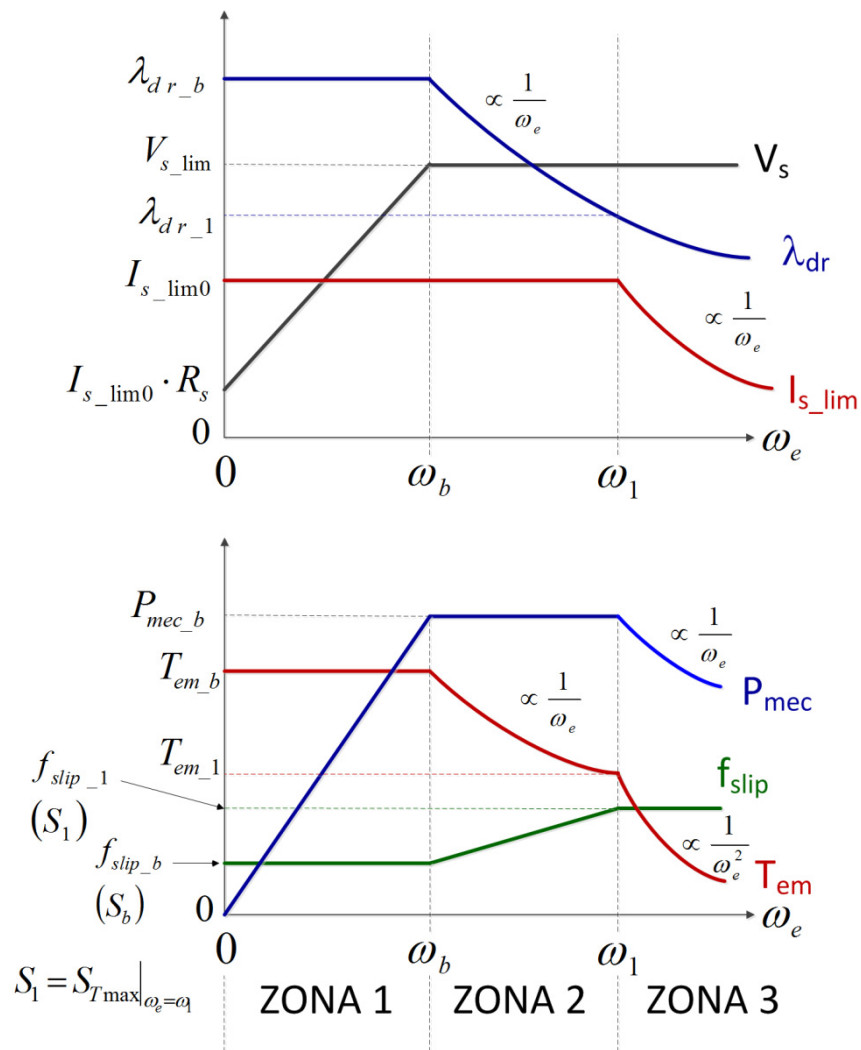


Fig.1.1. Zonas del *flux weakening* de una máquina de inducción con control FOC por orientación del flujo en el rotor para la máxima potencia que se puede extraer de la máquina.

1. Ajuste y simulación del control de par y flujo de la máquina de inducción (lazos de corriente)

1.1. La figura 1.2 muestra el esquema de los lazos de control de la corriente de estator, donde la referencia de corriente en el eje d, i_{ds}^* , procede de la programación de la referencia de flujo en función de f_e : $\lambda_{dr}^* = \lambda_{dr}^*(f_e)$.

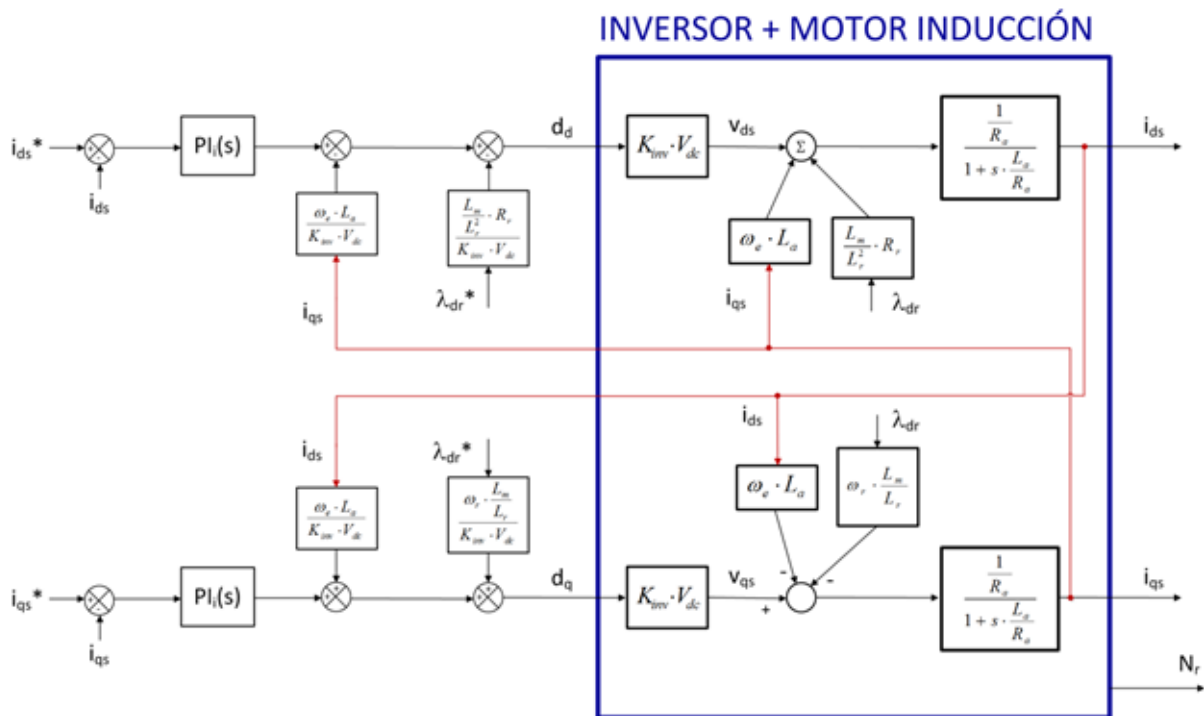


Fig. 1.2. Lazos de corriente con control FOC. Se incluyen desacoplos.

La relación entre ambas referencias procede de la expresión (1.1), que se simplifica según (1.2) siempre que las variaciones de i_{ds} sean más lentas que $\tau_r = L_r/R_r$. Esto equivale a que los componentes frecuenciales de i_{ds} sean de menor frecuencia que $1/\tau_r$. En ese caso se puede obtener i_{ds}^* a partir de λ_{dr}^* según la aproximación estática (1.3). Este es el **caso habitual válido cuando la máquina no requiere aceleraciones bruscas**.

Por otro lado, la referencia de corriente en el eje q, i_{qs}^* , procede en la práctica del lazo externo de regulación de velocidad. Si no hay una lazo de velocidad por realizarse un simple control de par, el valor de i_{qs}^* sería directamente proporcional a la referencia de par, T_{em}^* , según la ecuación (1.4).

$\lambda_{d_r}^e(s) = \frac{L_m}{1 + s \cdot \frac{L_r}{R_r}} \cdot i_{d_s}^e(s) = \frac{L_m}{1 + s \cdot \tau_r} \cdot i_{d_s}^e(s)$	(1.1)
$\lambda_{d_r}^e(s) \approx L_m \cdot i_{d_s}^e(s)$	(1.2)
$i_{d_s}^{e*} = \frac{\lambda_{d_r}^{e*}}{L_m}$	(1.3)
$T_{em}^* = \underbrace{\frac{3}{2} \cdot PP \cdot \frac{L_m}{L_r}}_{K_T} \cdot i_{q_s}^{e*} \cdot \lambda_{d_r}^{e*} = K_T \cdot i_{q_s}^{e*} \cdot \lambda_{d_r}^{e*} \Rightarrow i_{q_s}^{e*} = \frac{T_{em}^*}{K_T \cdot \lambda_{d_r}^{e*}}$	(1.4)

En el control FOC indirecto la estimación de la frecuencia de deslizamiento se calcula a partir de $i_{q_s}^*$ y de $\lambda_{d_r}^*$ mediante la ecuación (1.5). La frecuencia que el VSI debe imponer al estator de la máquina, ω_e , se calcula a partir de ω_{slip_estim} y de N_r (medida de la velocidad del rotor en rpm) según (1.6). El ángulo θ_e necesario para la transformación de Park se obtiene aplicando un integrador con reset a la señal ω_e . La salida del integrador con reset puede ser positiva (variando entre 0 y 2π) o negativa (variando entre 0 y -2π).

Si se tiene en cuenta la figura 1.2 y que las corrientes de estator pueden ser sensadas con una cierta ganancia R_i , la expresión de la ganancia de lazo de los lazos de corriente (ejes d y q), $T_i(s)$, se expresa mediante (1.7). Las ecuaciones (1.8) muestran los valores de los diferentes parámetros que intervienen en (1.7).

$\omega_{slip_estim} = \frac{L_m}{\frac{L_r}{R_r}} \cdot \frac{i_{q_s}^{e*}}{\lambda_{d_r}^{e*}}$	(1.5)
$\omega_e = \omega_{slip_estim} + \omega_r = \omega_{slip_estim} + N_r \cdot PP \cdot \frac{2\pi}{60}$	(1.6)
$T_i(s) = R_i \cdot PI_i(s) \cdot K_{inv} \cdot V_{dc} \cdot \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + s \cdot \frac{L_a}{R_a}}$	(1.7)

$K_{inv} = \frac{\hat{V}_{FN}}{V_{dc}} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{V_{dc}} = \begin{cases} \frac{1}{2} & PWM \text{ senoidal} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & SVM \end{cases}$			(1.8a)
$R_a = R_s + R_r \cdot \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2$	$L_a = \sigma \cdot L_s$	$\sigma \equiv 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}$	(1.8b)

• **Diseñar los reguladores $PI_i(s)$** del lazo de corriente para que $T_i(s)$ tenga una frecuencia de cruce $f_{Ci} \leq f_{sw}/20$. **Suponer para ello que $R_i=1$.**

• **Simular el control de par mediante PSIM™** en las siguientes condiciones:

- **ZONA 1:** $N_r \leq N_{r_b} = 2171$ rpm, $T_{em} \leq T_{em_b} = 12425$ Nm, $\lambda_{dr}^* = \lambda_{dr_b} = 4,26$ Wb=cte
- $I_s \leq I_{s_lim0} = 704$ A. Para ello se utiliza el esquema para la limitación de la referencia i_{qs}^* a partir de I_{s_lim0} y de i_{ds}^* de la figura 1.3.
- El modelado de la carga se realiza mediante un interface mecánico-eléctrico del PSIM, donde el valor de la capacidad representa la inercia de la carga (J_{carga}) y la fuente corriente el par resistente ejercido por la carga (T_{carga}). Dicho modelado de la carga se muestra en la figura 1.4.
- $J_{carga} = 10 \cdot J_{MOT}$, $T_{carga} = T_{em_b}/10$.
- La referencia de par variará desde el 80% al 100% de T_{em_b} a modo de pulsos, con una frecuencia de 0.1 Hz. Se realiza una arranque en rampa de esta referencia. **Ver figura 1.5**, donde el bloque que genera I_{qs_ref} limita esta referencia al valor de la señal I_{qs_max} , dado por el valor de i_{qs_lim} de la figura 1.3 ($I_{qs_max} = i_{qs_lim}$). Implementar dicho bloque en lenguaje C mediante un **C-script block** del PSIM.

• **Realizar la simulación PSIM de nuevo añadiendo un filtro paso bajo** de 2º orden con frecuencia de corte situada a la mitad de la frecuencia de conmutación (y factor de amortiguamiento 0,7) en el sensado de las corrientes de estator, tal como se observa en el esquema de la figura 1.7. **Comentar los resultados.**

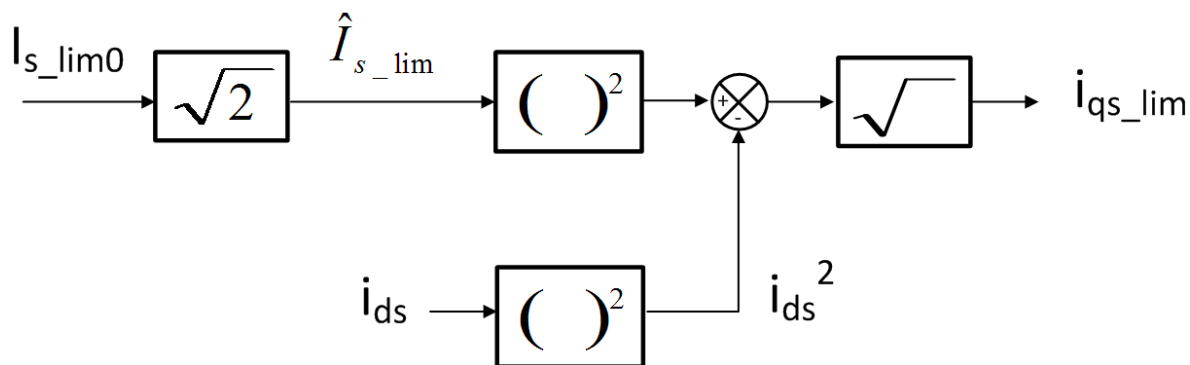


Fig. 1.3. Limitación de i_{qs}^* en el control de par de la máquina de inducción con FOC (ZONA 1).

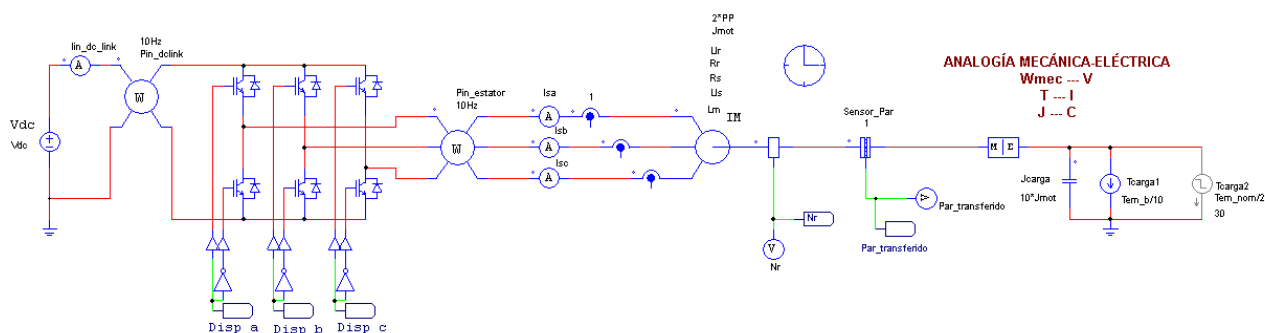


Fig. 1.4. Modelado de la carga mediante el interface mecánico-eléctrico del PSIM.

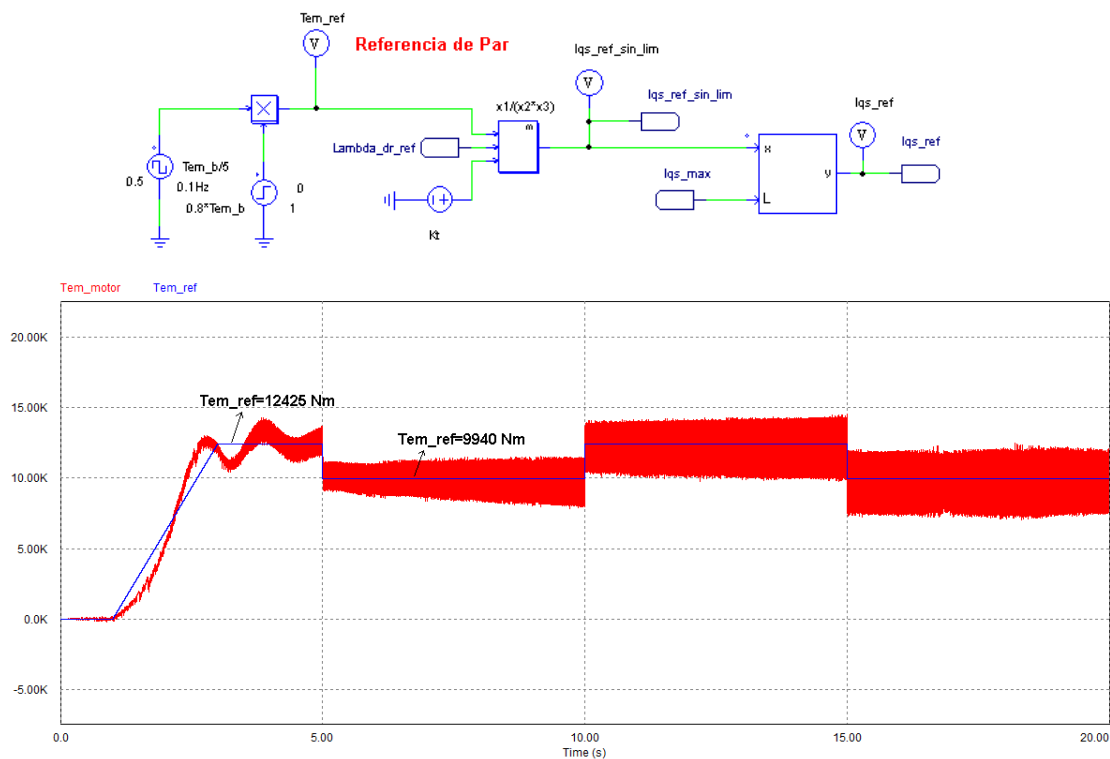


Fig. 1.5. Generación de la referencia de par y de i_{ds} para la simulación del control en la ZONA 1.

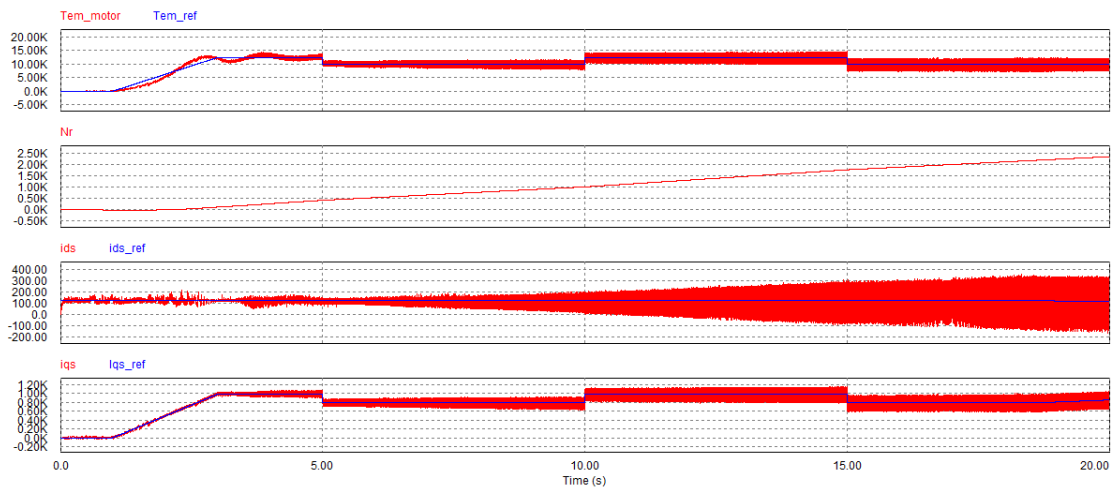


Fig. 1.6. Resultados de simulación del control de par en la ZONA 1.

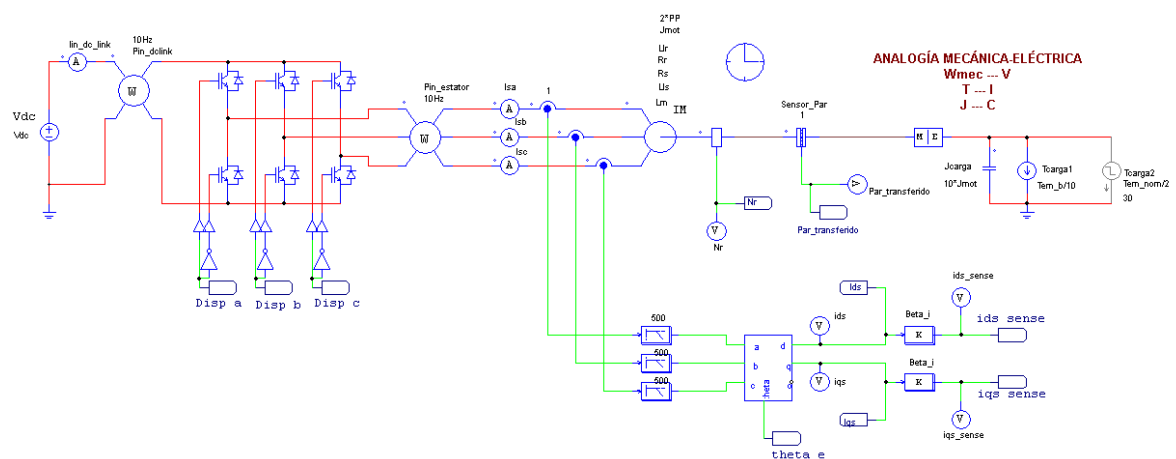


Fig. 1.7. Sensado de las corrientes de estator mediante filtro paso bajo de 2º orden.

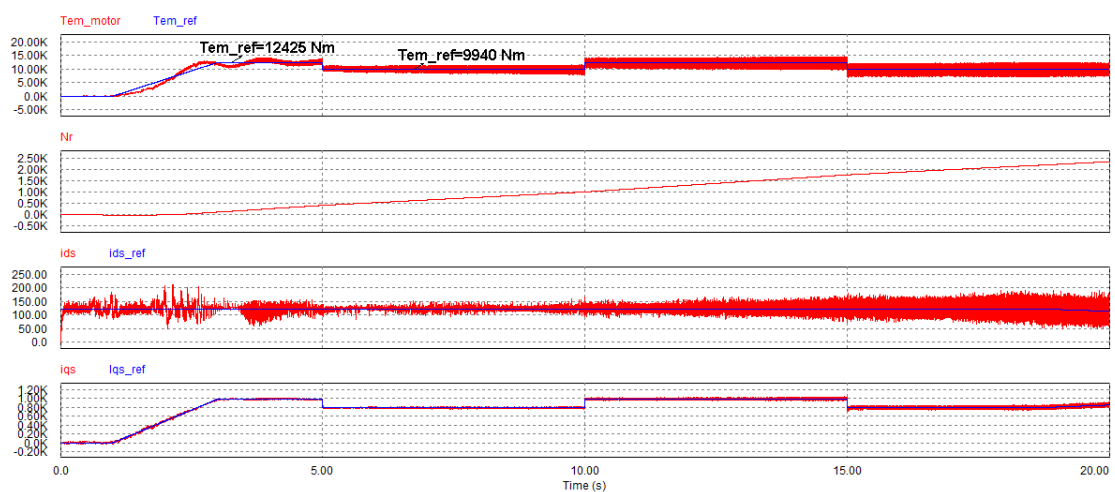


Fig. 1.8. Sensado de las corrientes de estator mediante filtro paso bajo de 2º orden: Resultados de simulación del control de par en la ZONA 1.

2. Ajuste y simulación del control de velocidad de la máquina de inducción en la ZONA 1

2.1. Las figura 2.1 y 2.2 muestran la implementación del lazo de control de velocidad y el diagrama de bloques del este lazo, respectivamente, donde $PI_N(s)$ representa el regulador de velocidad y $T_N(s)$ (ecuación (2.1)) es la ganancia en lazo abierto del lazo de velocidad.

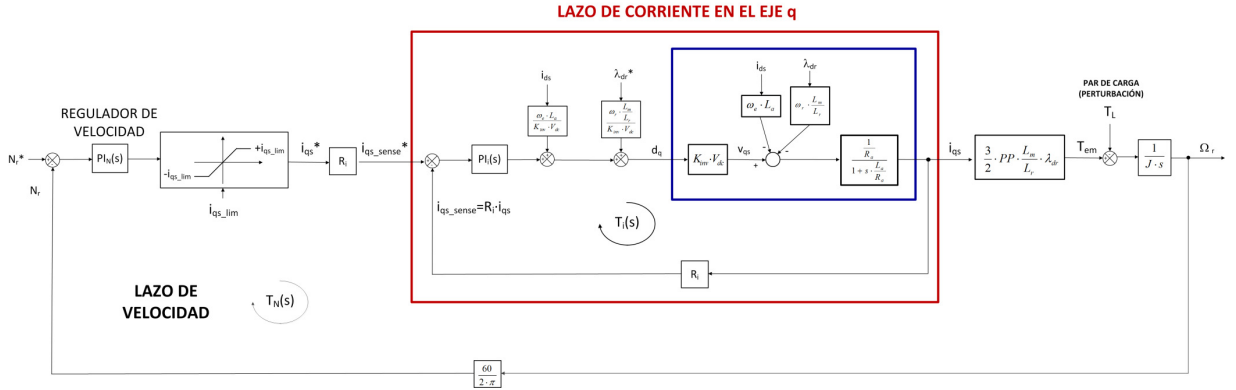


Fig. 2.1. implementación del lazo de control de velocidad.

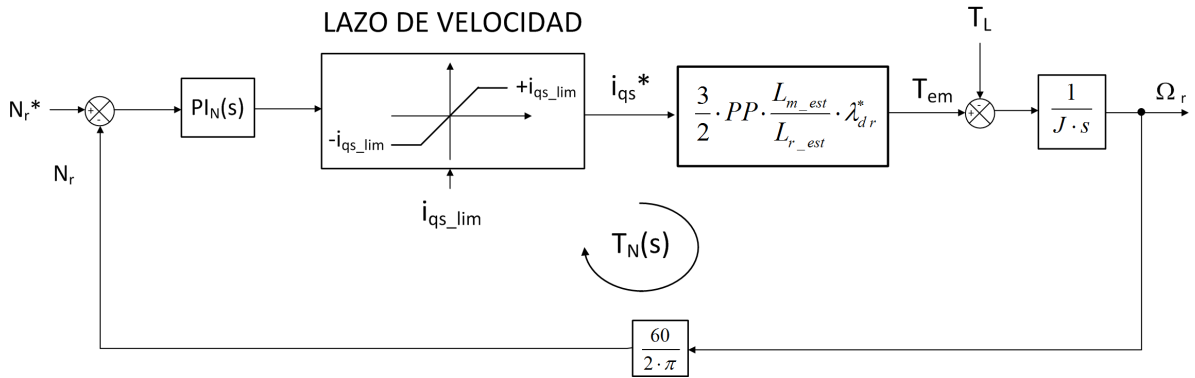


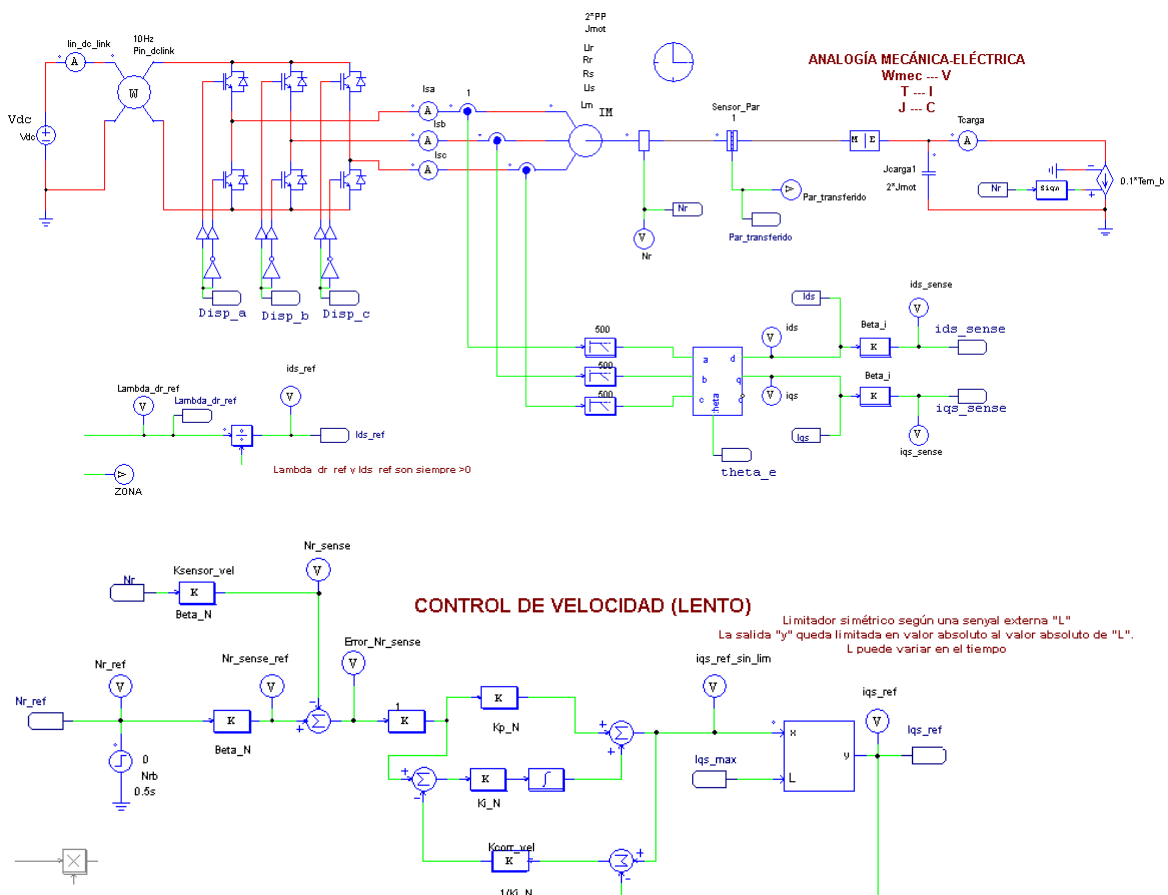
Fig. 2.2. Diagrama de bloques del lazo de velocidad para diseño del regulador de velocidad.

$$T_N(s) = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot PI_N(s) \cdot \frac{3}{2} \cdot PP \cdot \frac{L_{m_est}}{L_{r_est}} \cdot \lambda_{dr}^{e*} \cdot \frac{1}{J \cdot s} \quad (2.1)$$

• Para valores de la referencia de velocidad **dentro de la zona 1** (por tanto: $\lambda_{dr}^* = \lambda_{dr_nom}$), **diseñar el regulador de velocidad** para conseguir una frecuencia de cruce: $f_{CN} \leq f_{Ci}/20$. Tal como se representa en la figura 2.2 y en la ecuación (2.1), se utiliza una ganancia unitaria del sensor de velocidad. Suponer que $J = J_{mot} + J_{carga}$ varía entre J_{mot} y $10 \cdot J_{mot}$. **Representar las curvas de Bode de $T_N(s)$** para estas variaciones de J .

• **Realizar las siguientes simulaciones PSIM** de prueba del lazo de velocidad en la **zona 1**:

1) Arranque suave del motor con una rampa en la referencia de velocidad desde 0 a la velocidad máxima en la zona 1 ($N_{r_b} = 2171$ rpm). Tomar: $J_{carga} = 2 \cdot J_{mot}$, $T_{carga} = 0.1 \cdot T_{em_b}$. Probar con rampas de arranque de duración: 0.5 s y 5s. **Comentar las diferencias entre arrancar con una rampa suave y una rampa abrupta.**



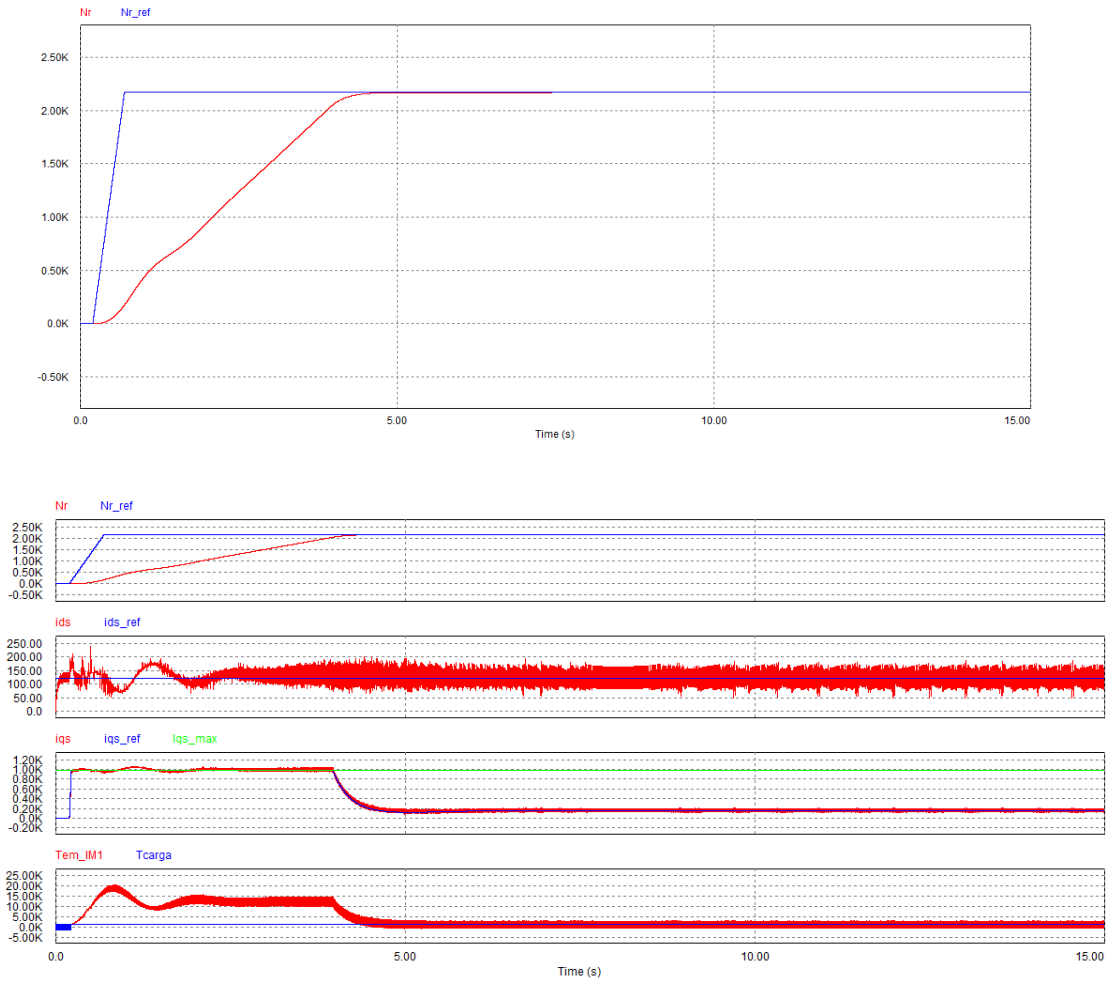


Fig. 2.3. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en la ZONA 1. Arranque desde velocidad 0 hasta $N_{r_b}=2171$ rpm con una rampa de duración 0,5s. $J_{carga}=2 \cdot J_{mot}$, $T_{carga}=0.1 \cdot T_{em_b}$. El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_o=500$ Hz y $\zeta=0.7$.

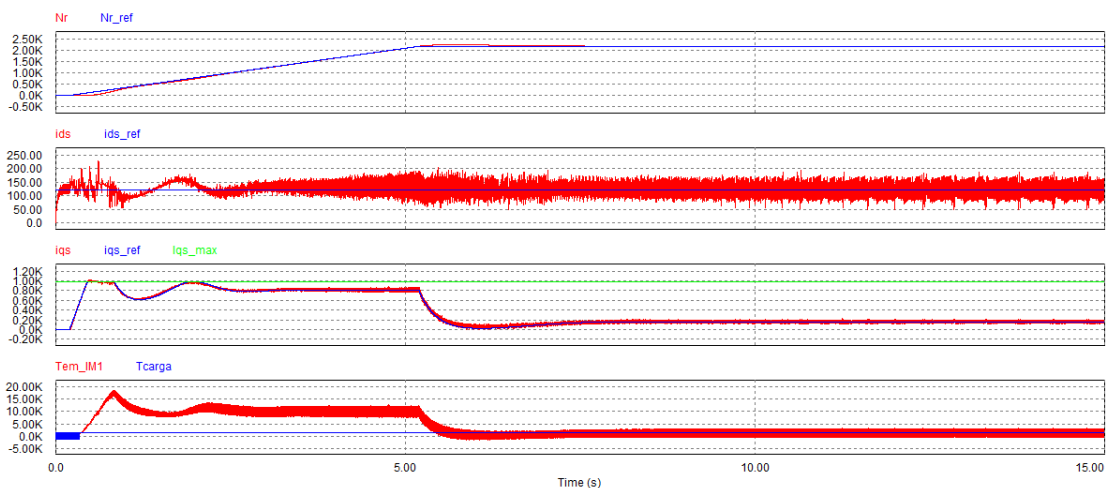
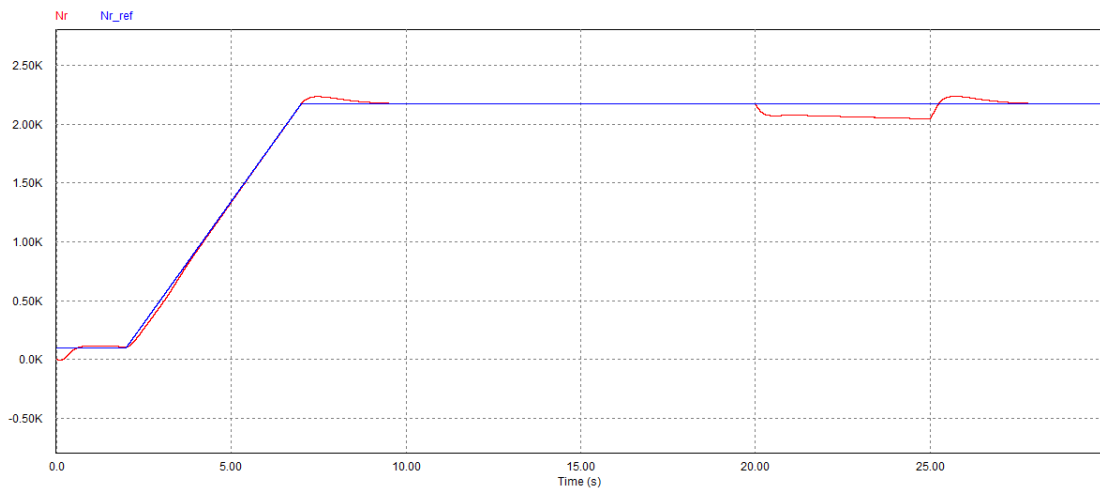
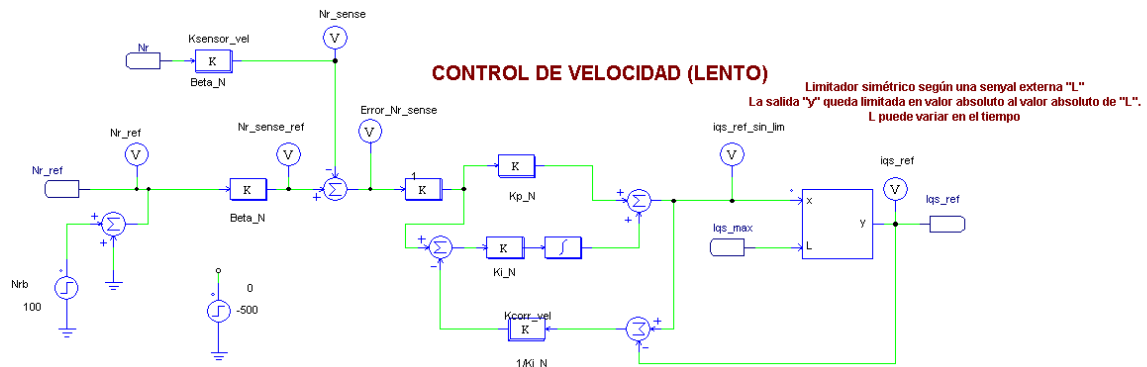
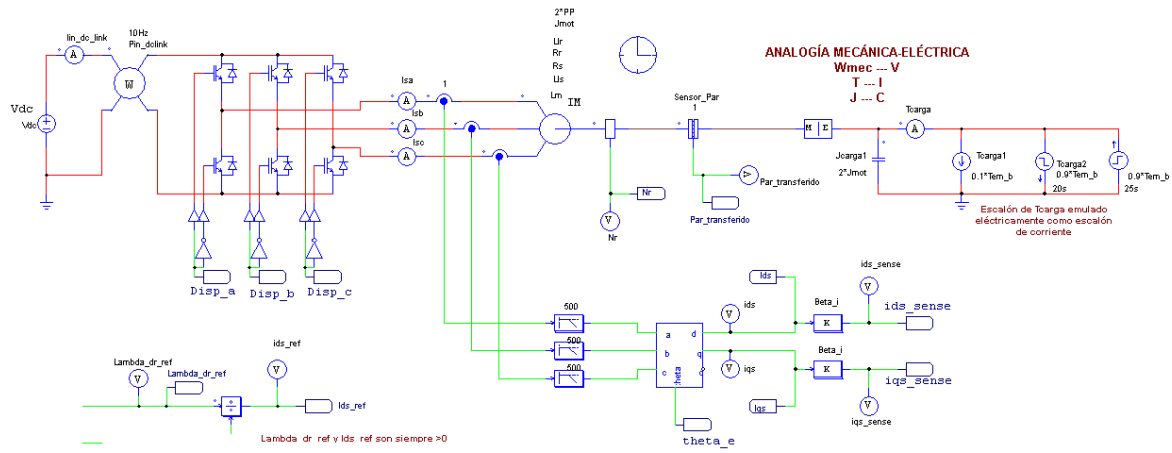


Fig. 2.4. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en la ZONA 1. Arranque desde velocidad 0 hasta $N_{r_b}=2171$ rpm con una rampa de duración 5s. $J_{carga}=2 \cdot J_{mot}$, $T_{carga}=0.1 \cdot T_{em_b}$. El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_o=500$ Hz y $\zeta=0.7$.

2) Simular escalones de carga mecánica con referencia de velocidad constante ($N_{ref} \leq N_{r_b} = 2171 \text{ rpm}$) y con cargas de hasta 10 veces la inercia del motor ($J_{carga} \leq 10 \cdot J_{mot}$) y par resistente $T_{carga} \leq T_{em_b} = 12425 \text{ Nm}$.



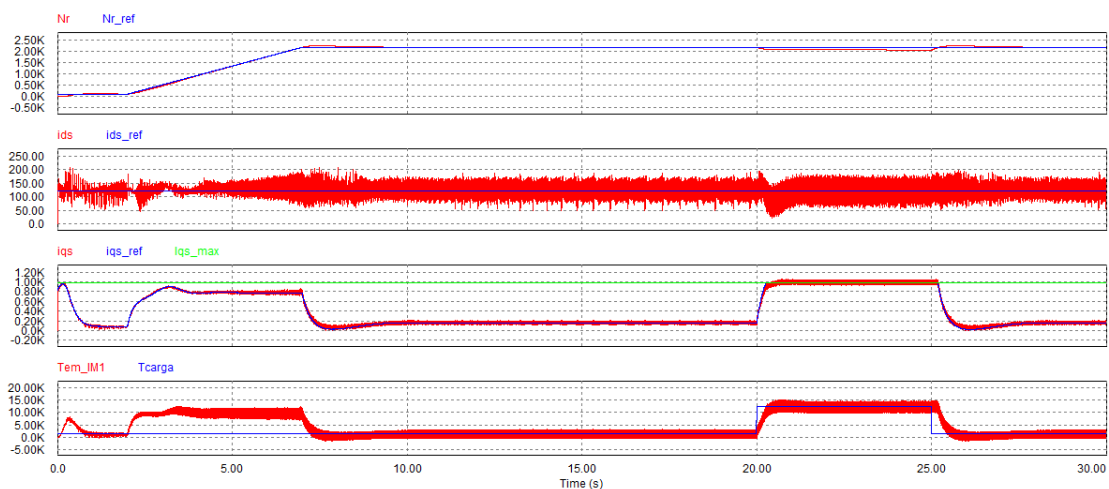
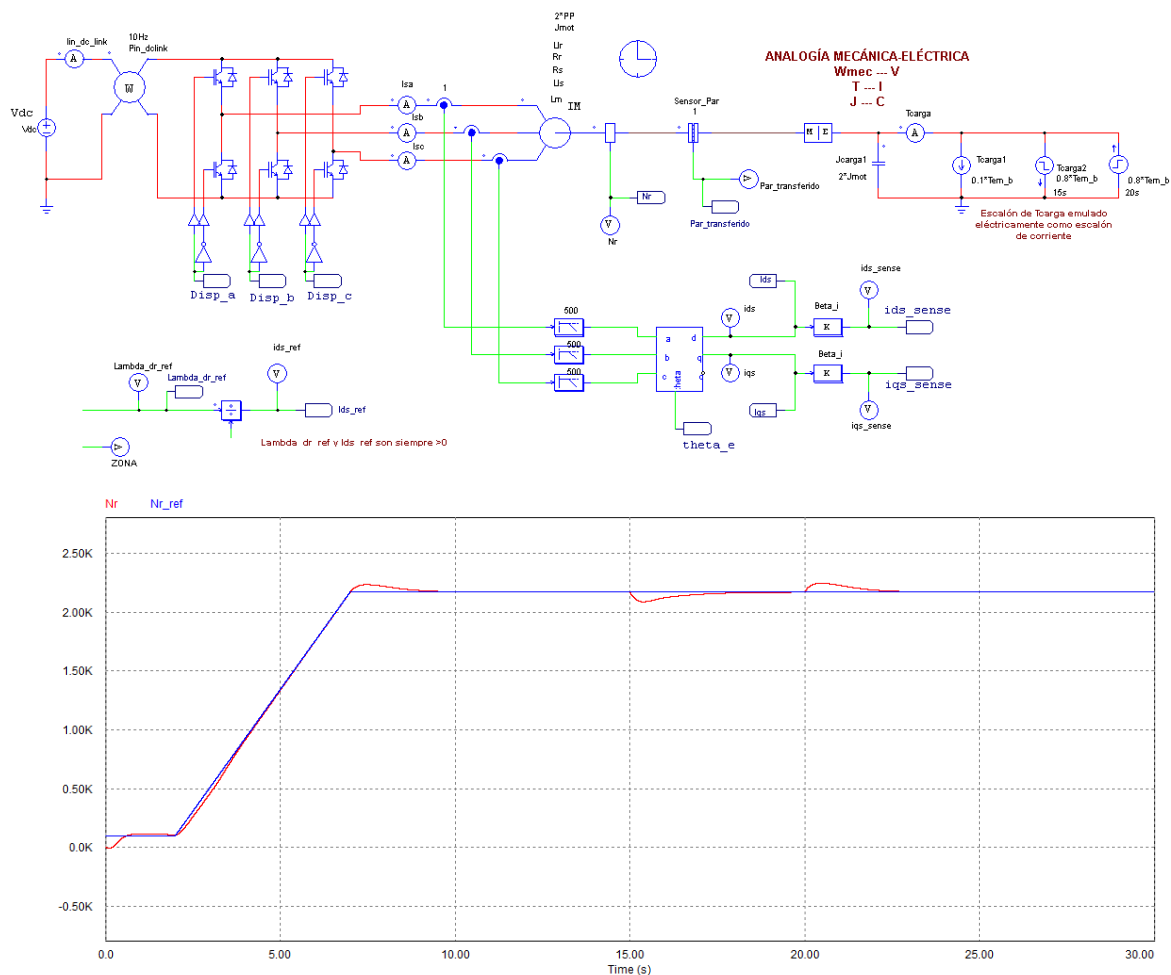


Fig. 2.5. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en la ZONA 1: $N_{r_ref}=N_{r_b}=2171$ rpm, $J_{carga}=2 \cdot J_{mot}$, escalones de T_{carga} desde $0.1 \cdot T_{em_b}$ hasta T_{em_b} y vuelta a $0.1 \cdot T_{em_b}$. El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_0=500$ Hz y $\zeta=0.7$.



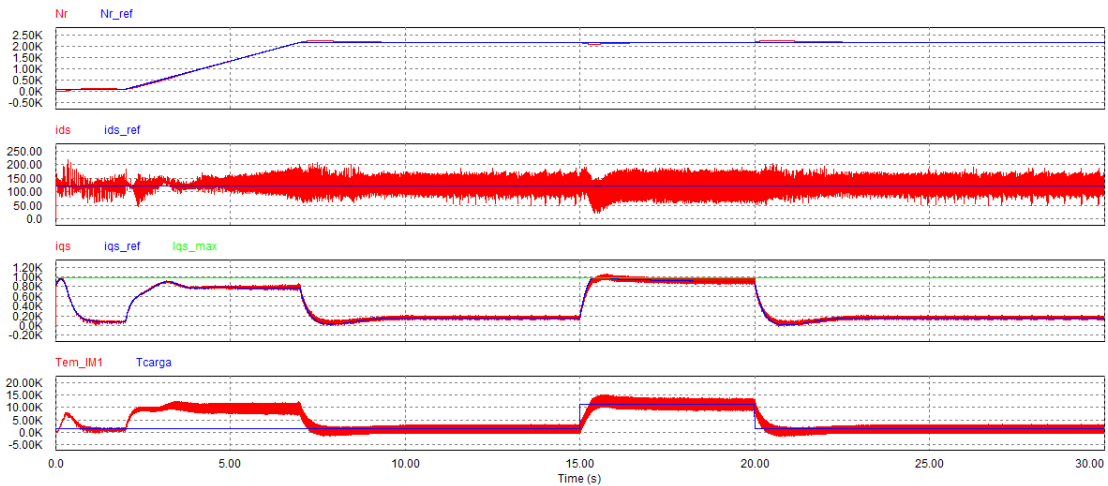
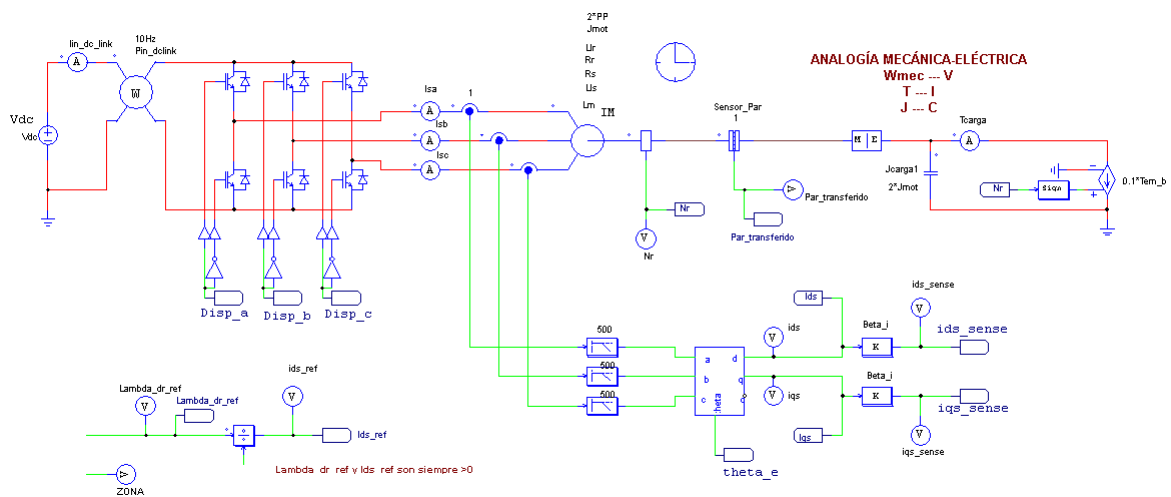
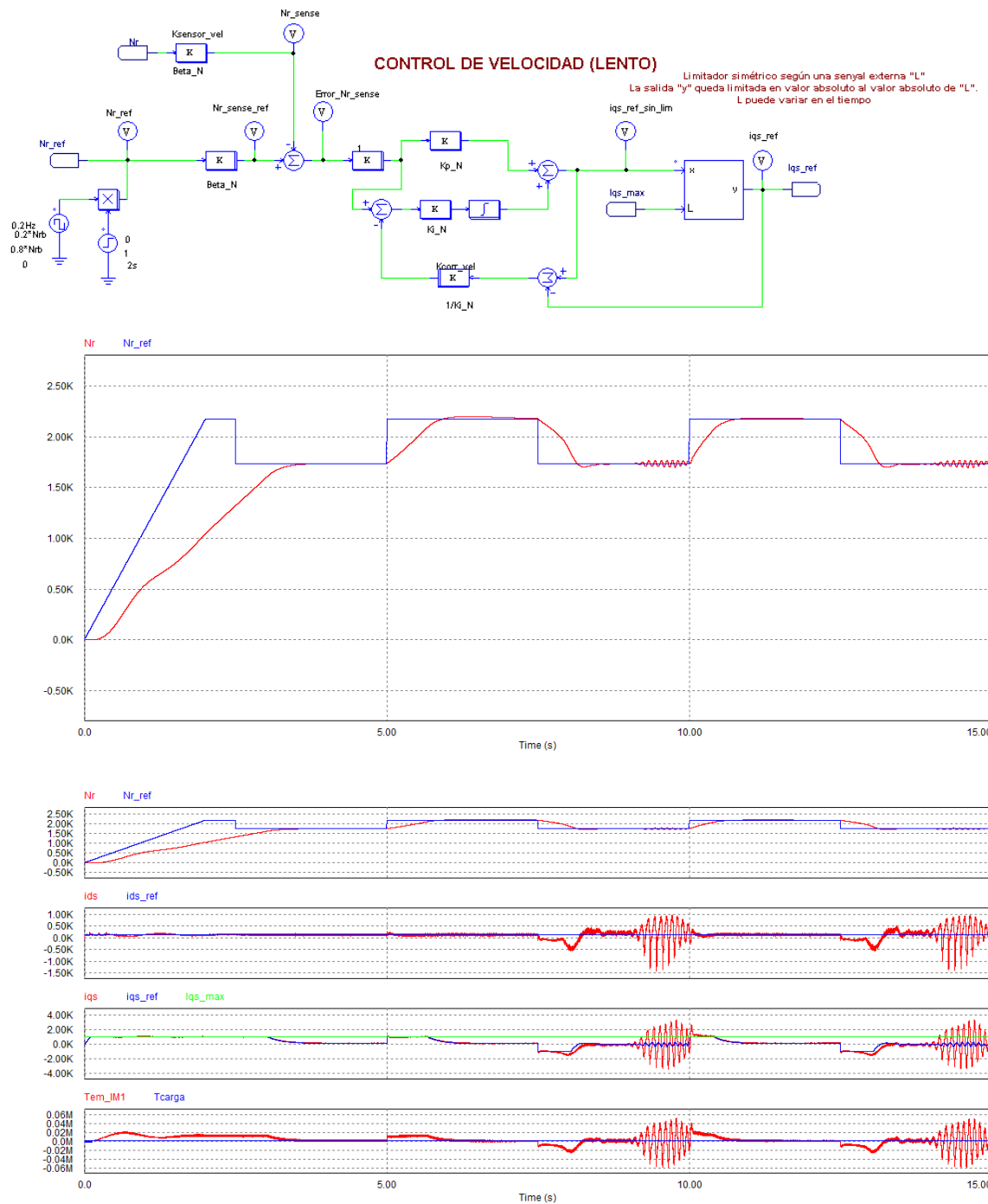
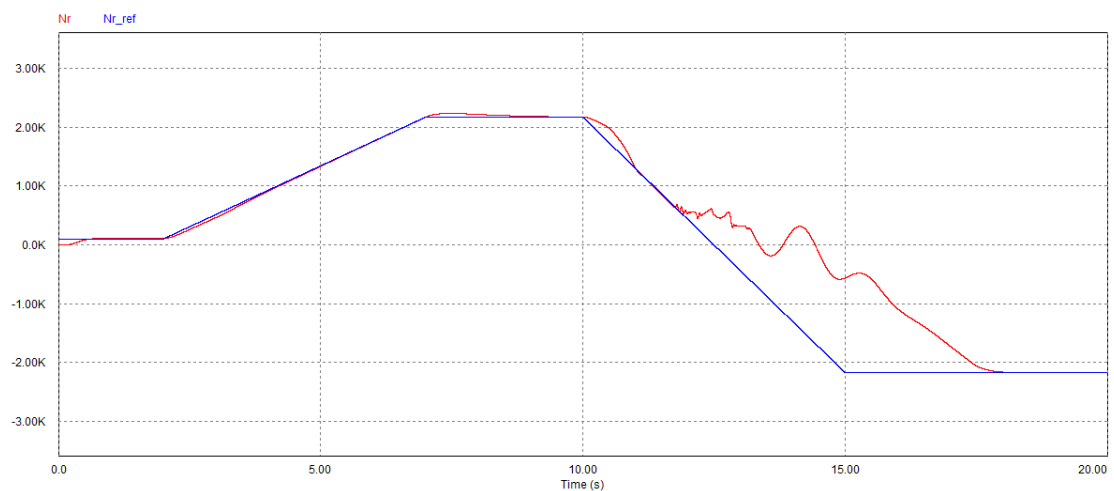
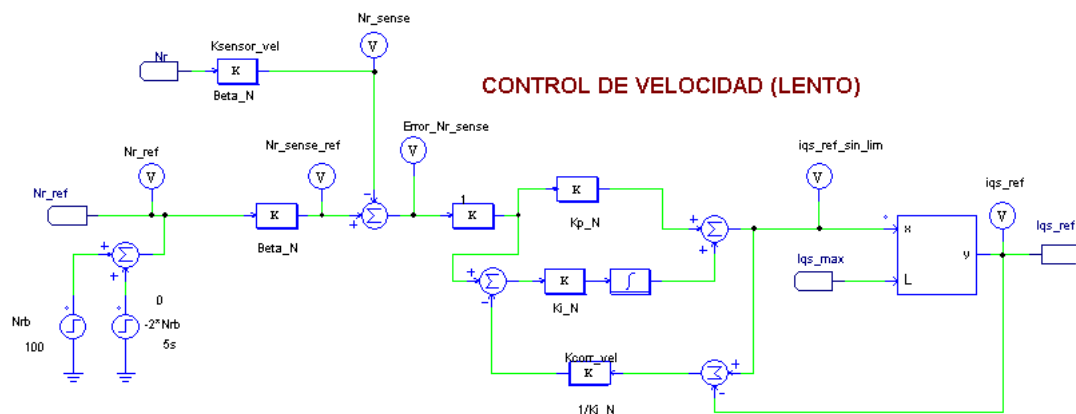
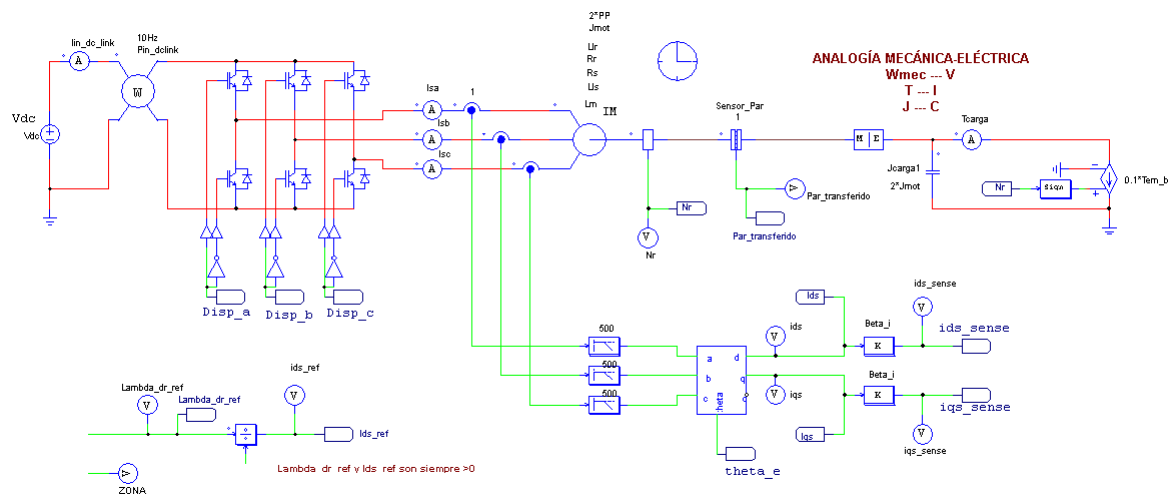


Fig. 2.6. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en la ZONA 1: $N_{r_ref}=N_{r_b}=2171$ rpm, $J_{carga}=2 \cdot J_{mot}$, escalones de T_{carga} desde $0.1 \cdot T_{em_b}$ hasta $0.9 \cdot T_{em_b}$ y vuelta a $0.1 \cdot T_{em_b}$. El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_0=500$ Hz y $\zeta=0.7$.

3) Simular cambios en la referencia de velocidad (p.e. escalones de 0.2 Hz), incluyendo un cambio del signo de la velocidad consistente en cambiarle el signo en forma de rampa de duración 5s (y 10s) (cambio del sentido de giro) desde $N_{r_ref}=N_{r_b}=2171$ rpm hasta $-N_{r_b}=-2171$ rpm. Tomar: $J_{carga}=2 \cdot J_{mot}$, $T_{carga}=0.1 \cdot T_{em_b}$.







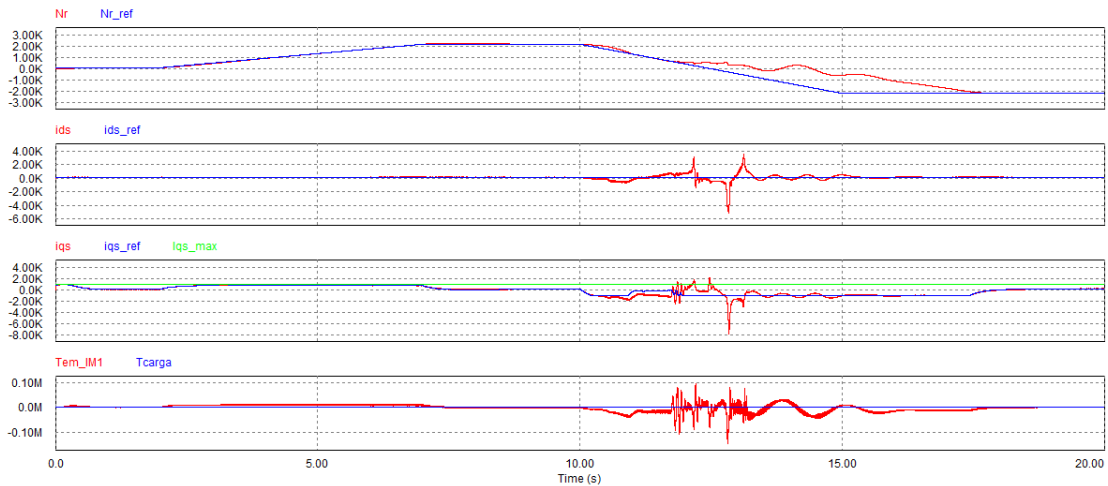
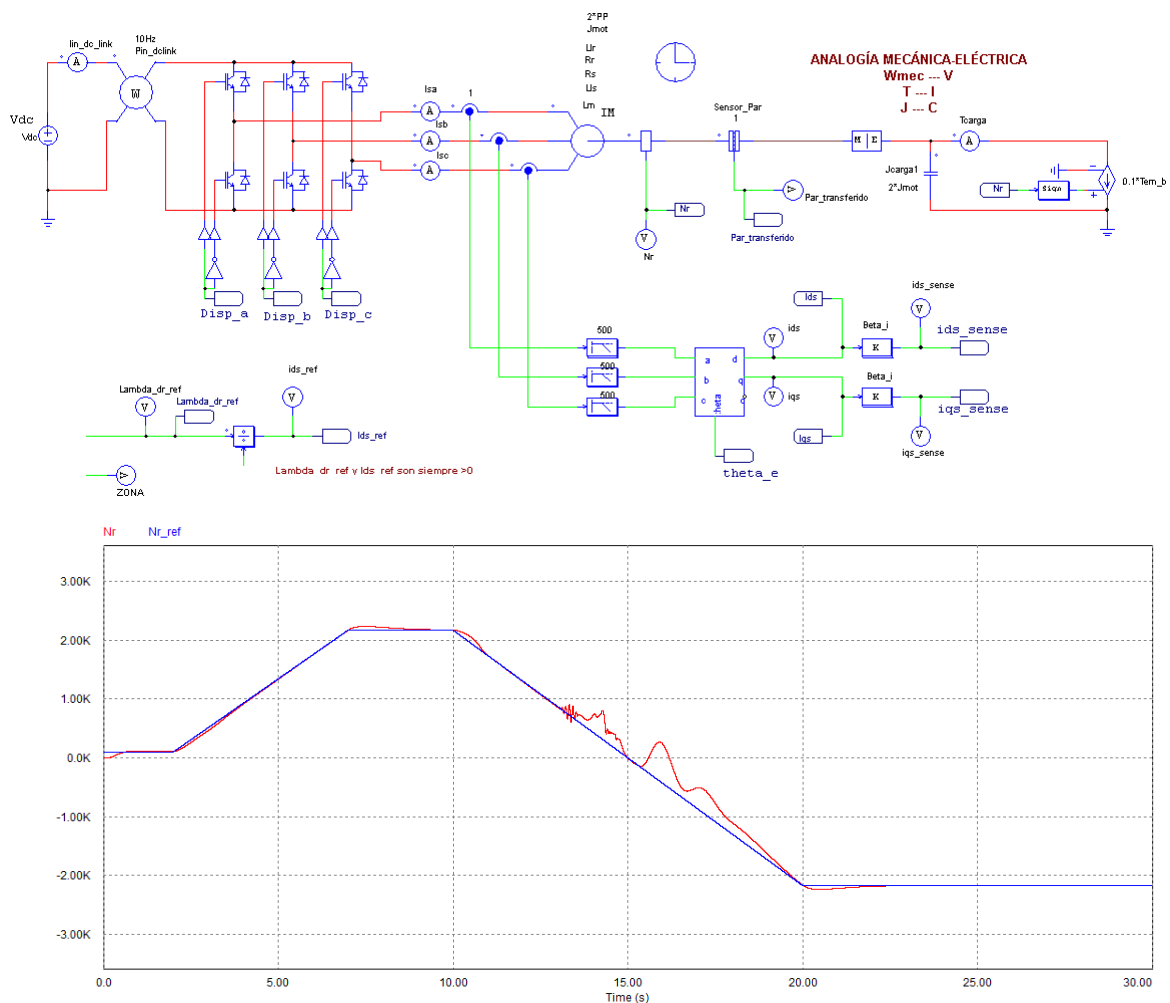


Fig. 2.8. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en la ZONA 1. Cambio de signo de $N_{r_ref}=N_{r_b}=2171$ rpm a -2171 rpm con una rampa de duración 5 s. $J_{carga}=2 \cdot J_{mot}$, $T_{carga}=0.1 \cdot T_{em_b}$. El signo del par resistente de carga cambia al cambiar el signo de la velocidad de giro (la carga se opone a la velocidad de giro). El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_0=500$ Hz y $\zeta=0.7$.



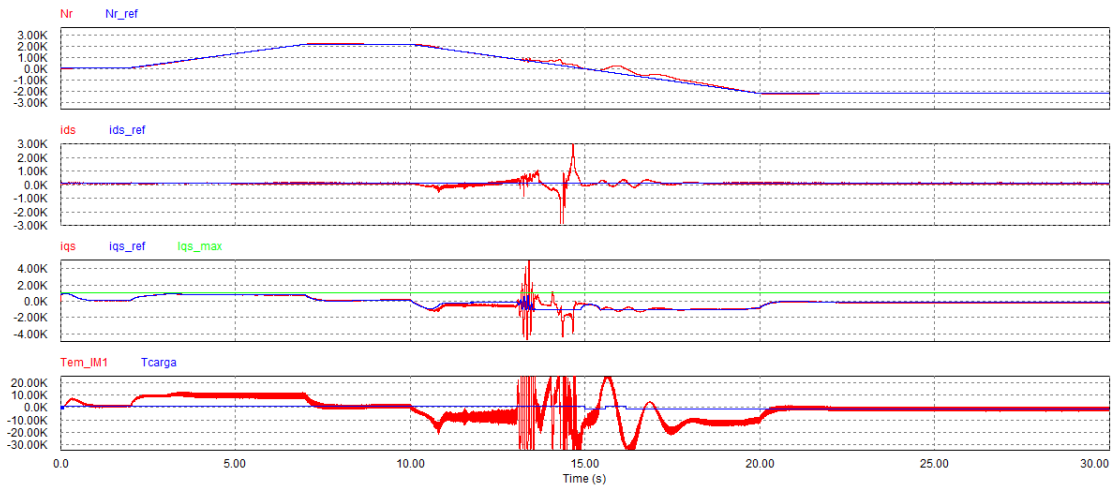
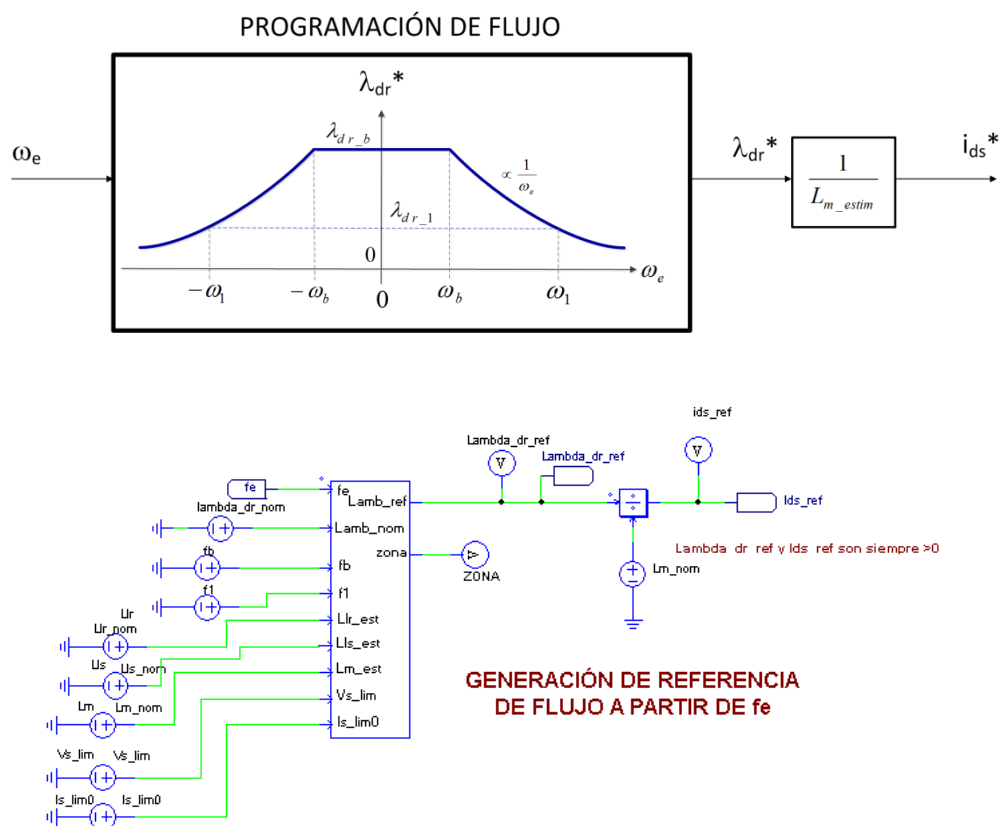
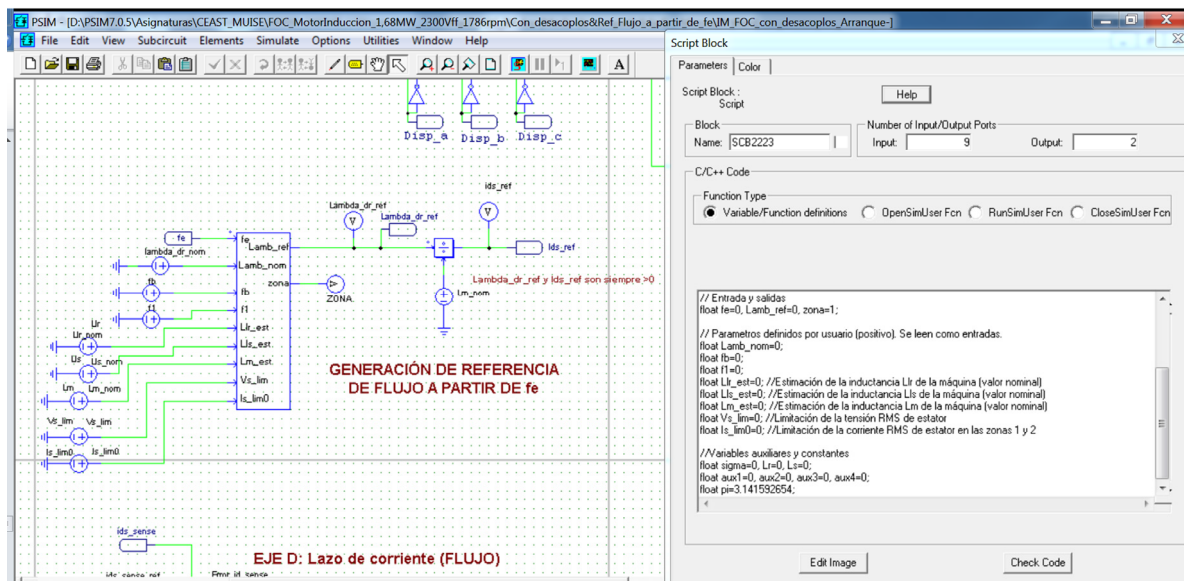


Fig. 2.9. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en la ZONA 1. Cambio de signo de $N_{r_ref}=N_{r_b}=2171$ rpm a -2171 rpm con una rampa de duración 10 s. $J_{carga}=2 \cdot J_{mot}$, $T_{carga}=0.1 \cdot T_{em_b}$. El signo del par resistente de carga cambia al cambiar el signo de la velocidad de giro (la carga se opone a la velocidad de giro). El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_o=500$ Hz y $\zeta=0.7$.

3. Construcción de la referencia de flujo y limitación de corriente de estator con *Flux Weakening* y simulación del control de velocidad de la máquina de inducción en la ZONAS 2 y 3

3.1. La figura 3.1 muestra el bloque de programación de flujo en función de las 3 zonas de funcionamiento (ver figura 1.1), así como una posible implementación con un **C-script block** del programa PSIM. El bloque se puede definir con 9 entradas y dos salidas, y en el código se programan las ecuaciones que definen las tres zonas de referencia de flujo, según las ecuaciones (3.1).





```

Script Block
Parameters | Color |
Script
Block: SCB2223
Number of Input/Output Ports: Input: 9 Output: 2
C/C++ Code
Function Type: Variable/Function definitions
void RunSimUser(double t, double delt, double "in, double "out, int "pnError, char " szErrorMsg)
{
    g_nStepCount++;
    // In case of error, uncomment next two lines. Set "pnError to 1 and copy Error message to szErrorMsg
    //pnError=1;
    //strcpy(szErrorMsg, "Place Error description here.");
    //float pnc=3.141592654; //Definición de constante
    aux1=0; aux2=0; aux3=0; aux4=0; sigma=0;
    // Entrada y salida
    fe=abs(in[0]);
    // Parametros definidos por usuario (positivo). Se leen como entradas
    Lamb_nom=abs(in[1]); lb=abs(in[2]); f1=abs(in[3]);
    Li_est=abs(in[4]); Li_est=abs(in[5]); Lm_est=abs(in[6]);
    Vs_lim=abs(in[7]); Is_lim=abs(in[8]);
}

```

```

Script Block
Parameters | Color |
Script
Block: SCB2223
Number of Input/Output Ports: Input: 9 Output: 2
C/C++ Code
Function Type: Variable/Function definitions
void RunSimUser(double t, double delt, double "in, double "out, int "pnError, char " szErrorMsg)
{
    if (fe<lb)
    {
        Lamb_ref=Lamb_nom;
        zona=1;
    }
    else
    {
        Lm=Li_est+Lm_est;
        Ls=Li_est+Lm_est;
        sigma=1-pow(Lm_est,2)/(Ls*Li);
    }
    if (fe<f1)
    {
        aux1=sigma*Ls*Is_lim;
        aux1=pow(aux1,2);
        aux1=sqrt(aux1);
    }
}

```

```

Script Block
Parameters | Color |
Script
Block: SCB2223
Number of Input/Output Ports: Input: 9 Output: 2
C/C++ Code
Function Type: Variable/Function definitions
void RunSimUser(double t, double delt, double "in, double "out, int "pnError, char " szErrorMsg)
{
    if (fe<f1)
    {
        aux1=sigma*Ls*Is_lim;
        aux1=pow(aux1,2);
        aux1=sqrt(aux1);
        aux2=pow(Ls,2)/(1-pow(sigma,2));
        aux3=Vs_lim/(2*pi);
        aux3=2*pow(aux3,2);
        aux3=sqrt(aux3);
        Lamb_ref=(aux3-aux1)/aux2;
        Lamb_ref=sqrt(Lamb_ref);
        Lamb_ref=Lm_est*Lamb_ref;
        zona=2;
    }
}

```

```

Script Block
Parameters | Color |
Script
Block: SCB2223
Number of Input/Output Ports: Input: 9 Output: 2
C/C++ Code
Function Type: Variable/Function definitions
void RunSimUser(double t, double delt, double "in, double "out, int "pnError, char " szErrorMsg)
{
    zona=2;
    else
    {
        aux4=Lm_est*Vs_lim/(Ls*2*pi);
        Lamb_ref=aux4/fe;
        zona=3;
    }
    out[0]=Lamb_ref;
    out[1]=zona;
}

```

Fig. 3.1. Bloque de generación de la referencia de flujo implementado mediante un C-Script Block de PSIM.

$\lambda_{dr}^e(\omega_e)^* = \begin{cases} \lambda_{dr_ZONA1}^e & 0 \leq \omega_e \leq \omega_b \\ \lambda_{dr_ZONA2}^e(\omega_e) & \omega_b < \omega_e \leq \omega_1 \\ \lambda_{dr_ZONA3}^e(\omega_e) & \omega_1 < \omega_e \end{cases}$	(3.1a)
$\lambda_{dr_ZONA1}^e \equiv \lambda_{dr_b} = \frac{\hat{V}_{s_nom} - \sqrt{(R_s \cdot \hat{I}_{s_nom})^2 + (\omega_{e_nom} \cdot \sigma \cdot L_s \cdot \hat{I}_{s_nom})^2}}{\omega_{e_nom} \cdot \frac{L_m}{L_r}} = cte$	(3.1b)
$\lambda_{dr_ZONA2}^e(\omega_e) = L_m \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{\hat{V}_{s_lim}}{\omega_e}\right)^2 - (\sigma \cdot L_s \cdot \hat{I}_{s_lim0})^2}{L_s^2 \cdot (1 - \sigma^2)}}$	(3.1c)
$\lambda_{dr_ZONA3}^e(\omega_e) = \frac{L_m \cdot \hat{V}_{s_lim}}{\sqrt{2} \cdot \omega_e \cdot L_s}$	(3.1d)

Para el correcto funcionamiento del control FOC y protección, tanto de la máquina como del VSI que la excita, hay que realizar una limitación de la corriente de estator, tal como muestra la figura 3.2 y la ecuación (3.2). El bloque de limitación de la corriente de estator también se puede crear mediante un C-script-Block de PSIM, tal como muestra la figura 3.3.

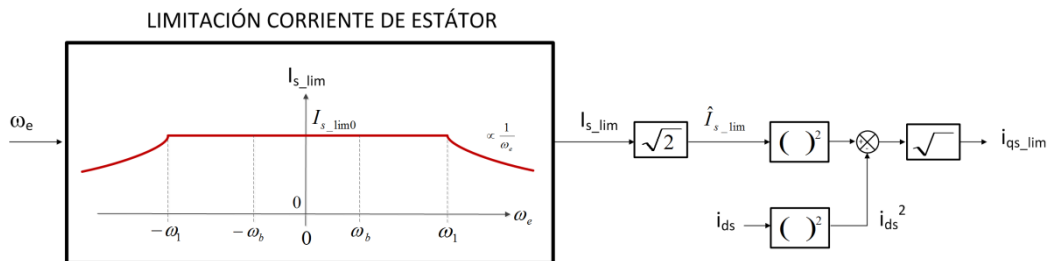


Fig. 3.2. Limitación de la corriente de estator con control FOC.

$$I_{S_lim}(\omega_e) = \begin{cases} I_{S_lim0} & 0 \leq \omega_e \leq \omega_1 \\ I_{S_lim0} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_e} & \omega_e > \omega_1 \end{cases} \quad (3.2)$$

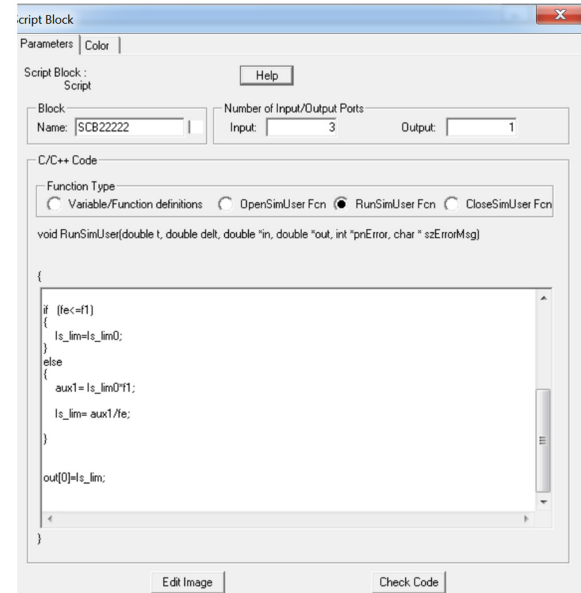
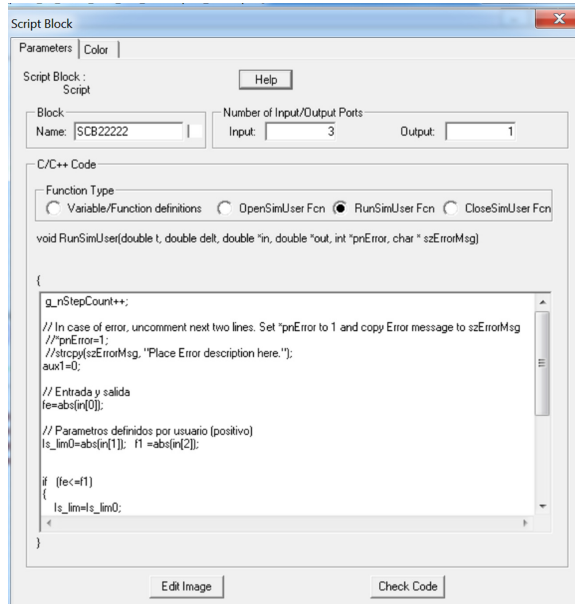
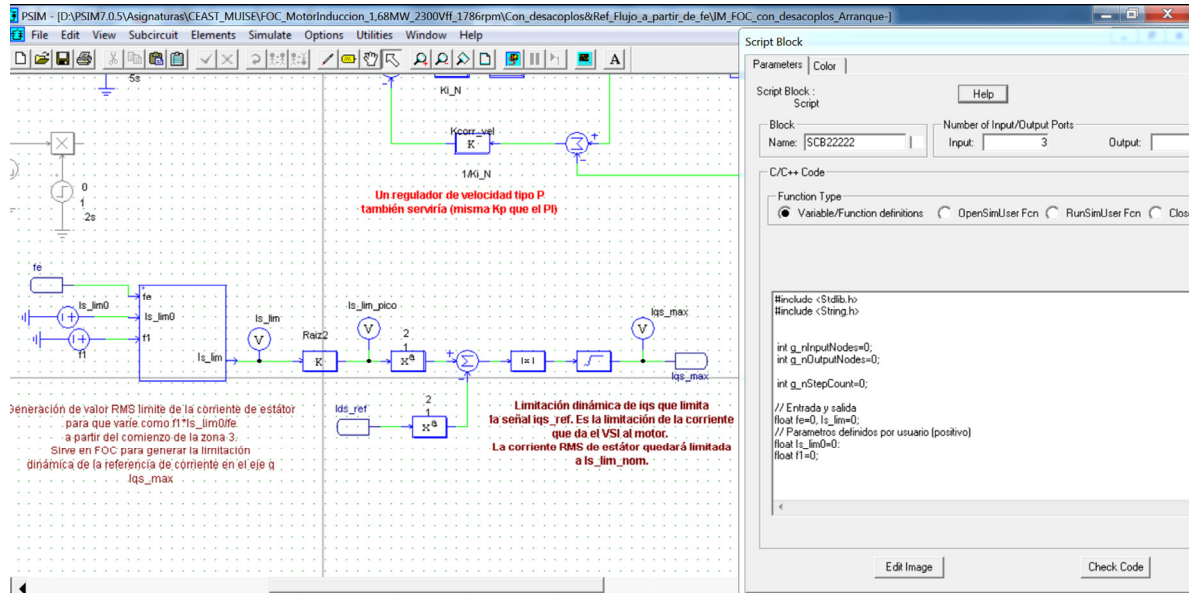


Fig. 3.3. Implementación mediante C-Script Block de PSIM de la limitación de la corriente de estator con control FOC.

- En un fichero de PSIM crear mediante C-script-blocks los bloques de generación de la referencia de flujo y de limitación de la corriente de estator y simular su funcionamiento con los parámetros que definen las 3 zonas de funcionamiento mostrados en la tabla 1. Para realizar esta simulación excitar los bloques con una señal triangular (f_e o ω_e) de 10Hz que varíe desde $-2 \cdot f_e$ hasta $2 \cdot f_e$ (o bien: $-2 \cdot \omega_e$ hasta $2 \cdot \omega_e$) y verificar que las variaciones temporal de la referencia de flujo y de la limitación de corriente de estator se corresponden con las ecuaciones (3.1) y (3.2), respectivamente.

3.2. Incorporando al circuito PSIM de simulación en lazo cerrado de la máquina de inducción simulada en apartados anteriores **los C-script-blocks** recién creados, **realizar las siguientes simulaciones PSIM de prueba del lazo de velocidad en la zonas 1-2-3:**

1) Arranque suave del motor con una rampa en la referencia de velocidad desde 0 a 1,2 veces N_{r1} ($1,2 \cdot N_{r1} = 1,5 \cdot 5804 \text{ rpm} = 6964,8 \text{ rpm}$). Tomar: $J_{\text{carga}} = J_{\text{mot}}$, $T_{\text{carga}} = 0,1 \cdot T_{\text{em}_b}$. Probar con rampas de arranque de duración: 2 s y 10s. **Comentar si se observan diferencias apreciables entre arrancar con una rampa suave y una rampa abrupta.**

NOTA: Hay que tener en cuenta que si se filtran las corrientes sensadas de estator antes de aplicarles la transformada de Park para reducir el rizado de conmutación ($f_{\text{sw}} = 1 \text{ kHz}$), dado que en las zonas 2 y 3 la frecuencia eléctrica f_e (p.e. $f_e = 73 \text{ Hz}$ a 300 Hz) de estas corrientes puede estar cercana a la frecuencia de corte del filtro (filtro de segundo orden de frecuencia de corte $f_0 = 500 \text{ Hz}$ o 250 Hz), el filtro provoca un desfase inaceptable a la frecuencia f_e , falseando la medida de estas corrientes y provocando inestabilidad de los lazos de corriente. Por tanto, **para trabajar correctamente en las zonas 2 y 3 la ubicación correcta del filtro de sensado de las corrientes de estator es después del bloque de cálculo de la transformada de Park, según muestra la figura 3.4.**

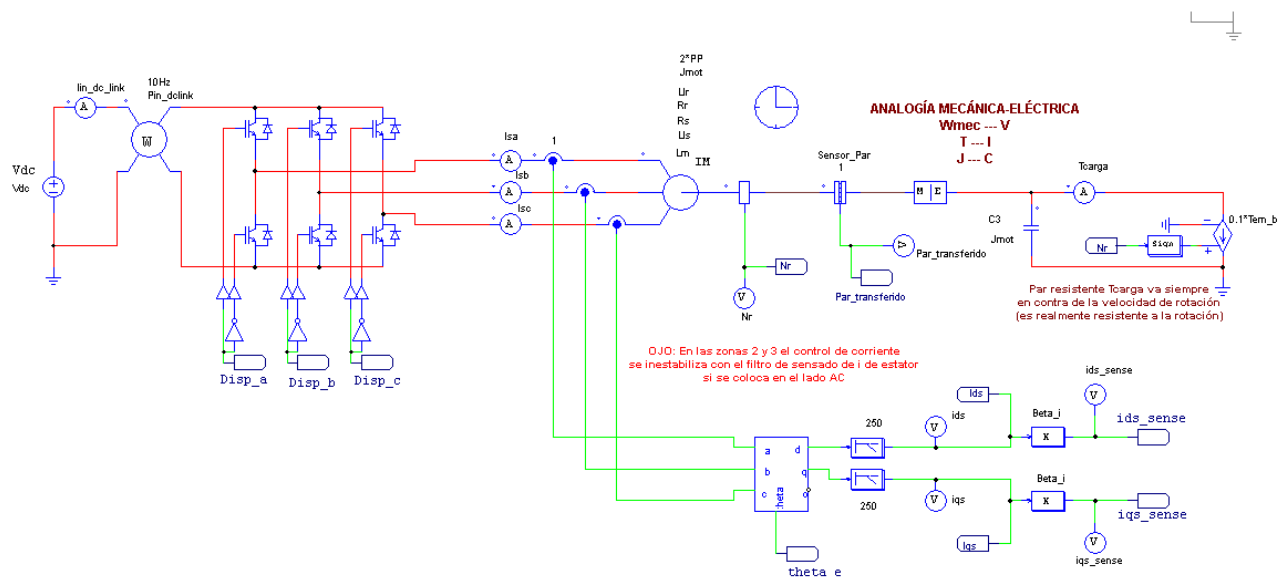


Fig. 3.4. Ubicación correcta de los filtros de sensado de las corrientes de estator cuando la máquina debe operar en las regiones de alta velocidad (ZONAS 2 Y 3). En este caso se usa un filtro paso bajo de 2º orden con $f_0 = 250 \text{ Hz}$ y $\zeta = 0,7$ en el lado DC (tras la transformada de Park).

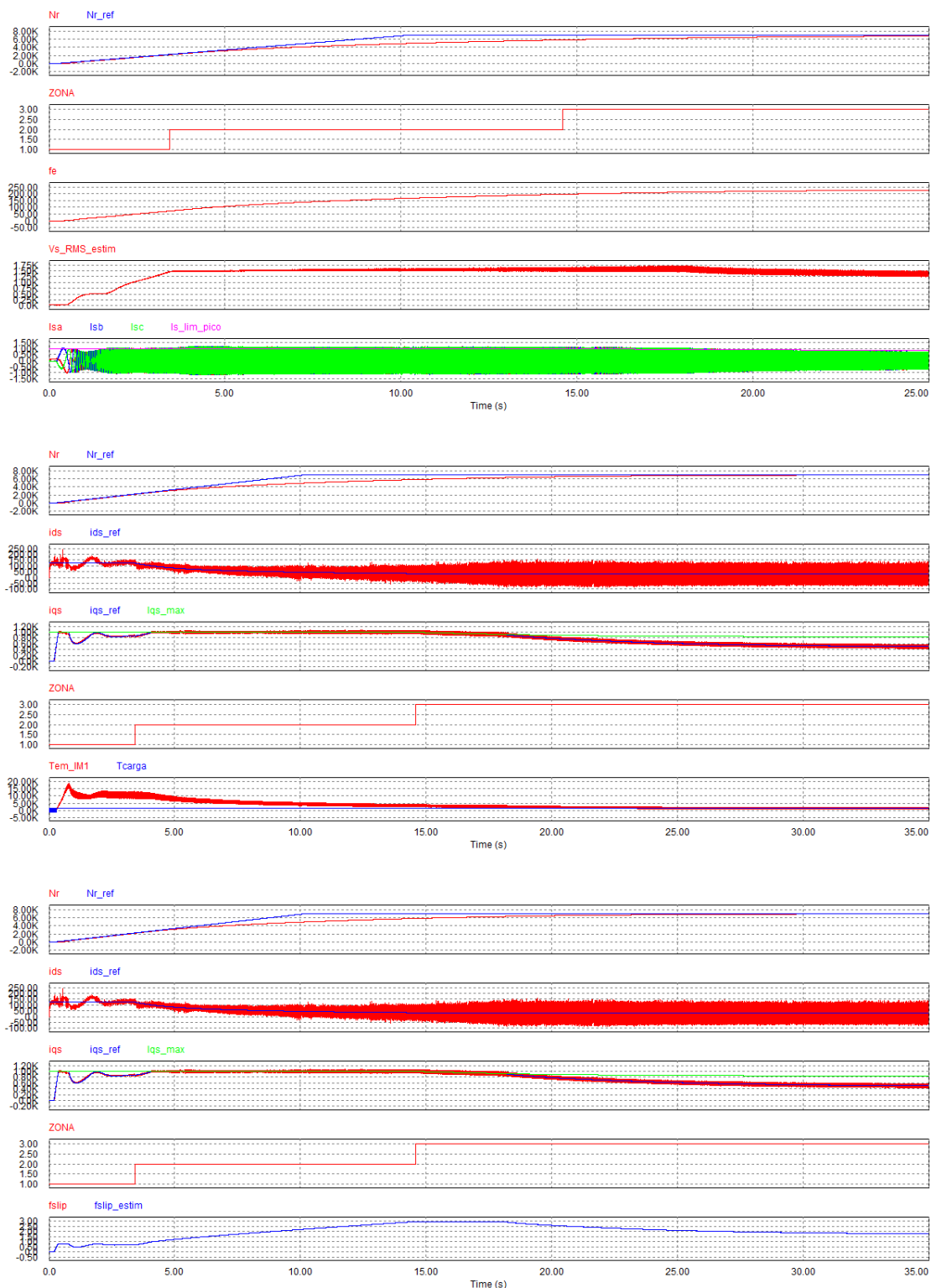


Fig. 3.5. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en las ZONA 1, 2 y 3. Arranque desde velocidad 0 hasta $1,2 \cdot N_{r1} = 6964,8$ rpm con una rampa de duración 10s. $J_{carga} = J_{mot}$, $T_{carga} = 0,1 \cdot T_{em,b}$. El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_0 = 250$ Hz y $\zeta = 0,7$ en el lado DC (tras el cálculo de la transformada de Park).

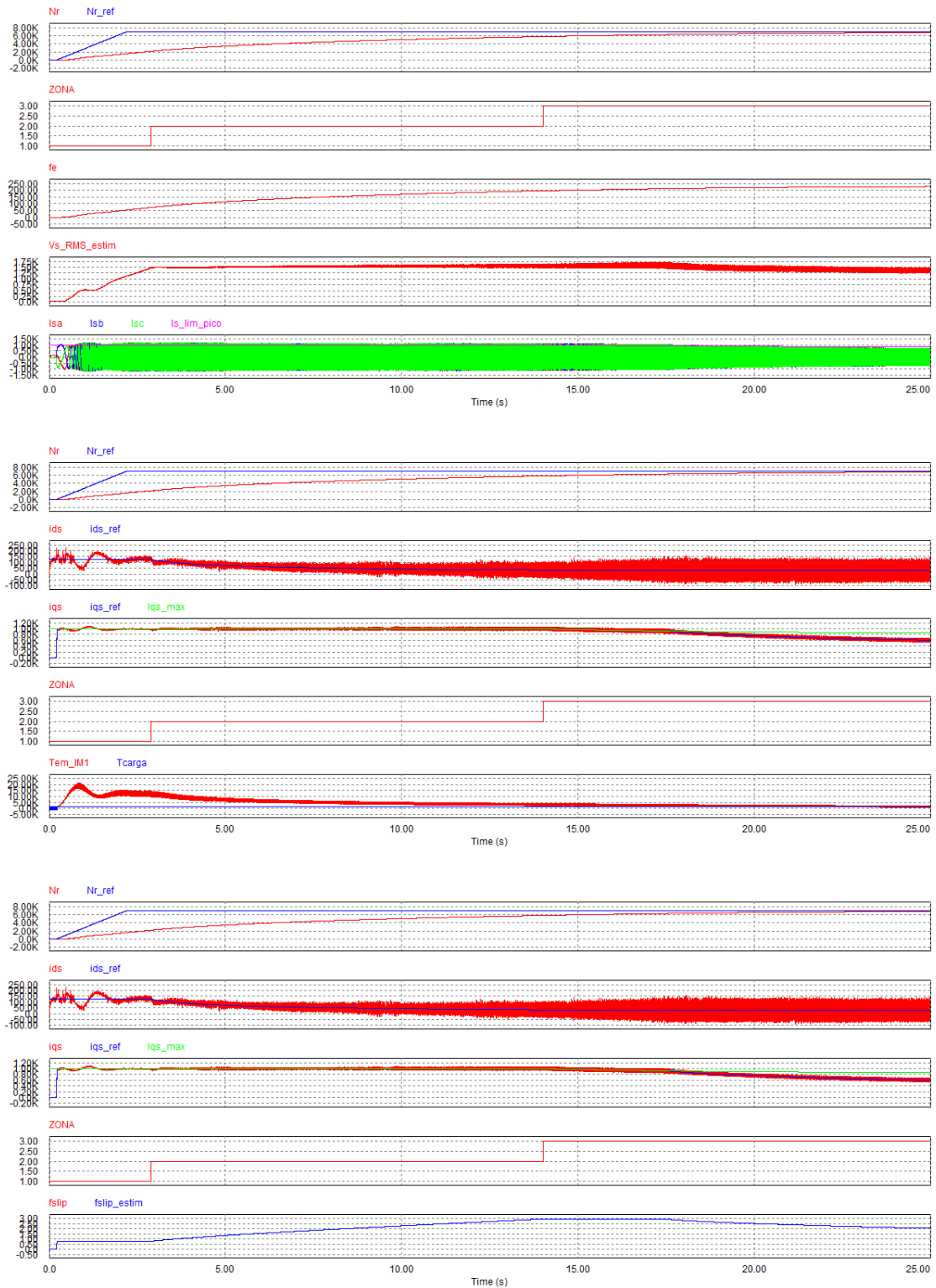
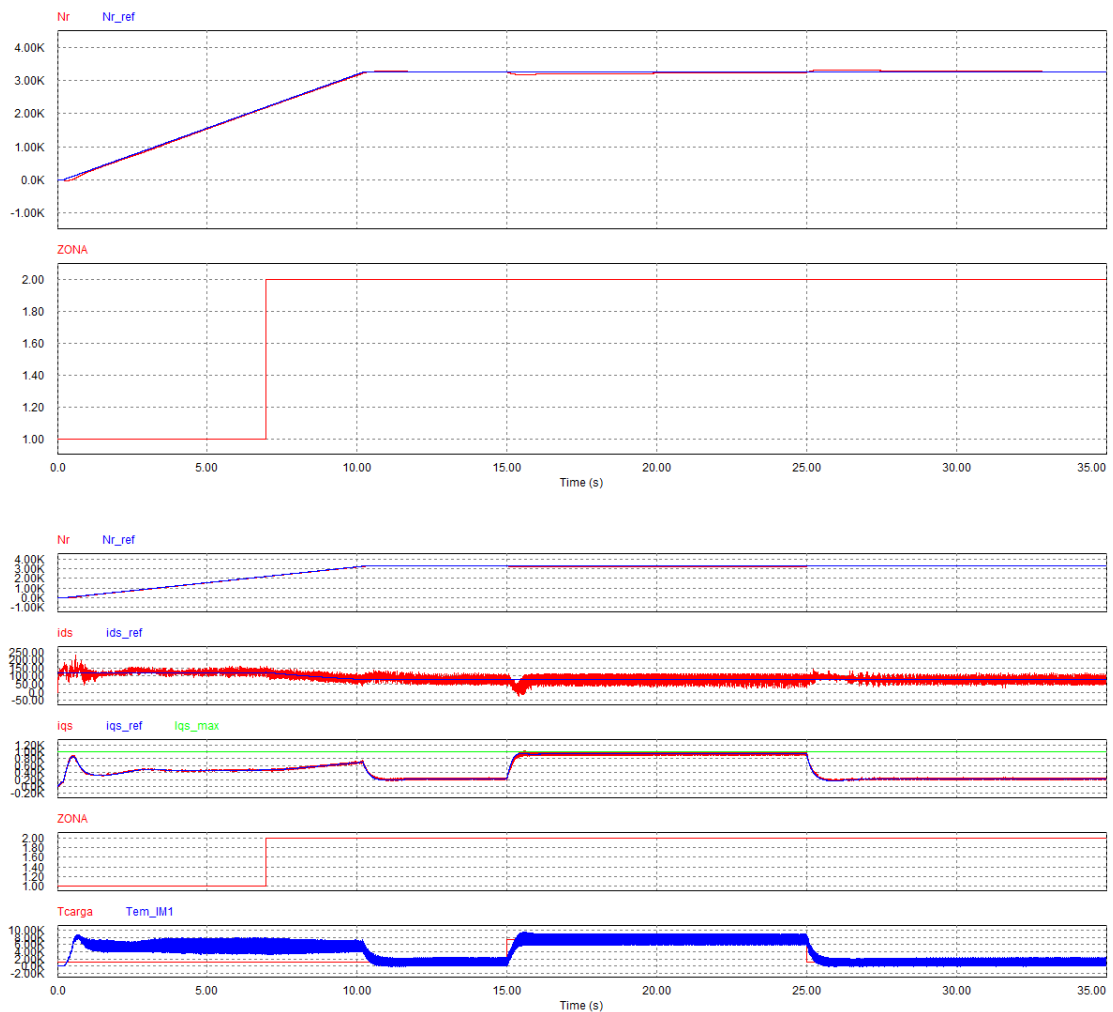


Fig. 3.6. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en las ZONA 1, 2 y 3. Arranque desde velocidad 0 hasta $1,2 \cdot N_{r1} = 6964,8$ rpm con una rampa de duración 2s. $J_{carga} = J_{mot}$, $T_{carga} = 0,1 \cdot T_{em,b}$. El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_0 = 250$ Hz y $\zeta = 0,7$ en el lado DC (tras el cálculo de la transformada de Park).

2) Simular escalones de carga mecánica con referencia de velocidad constante en la zona 2 ($N_{ref}=1,5 \cdot N_{r_b}=3256,5$ rpm) y en la zona 3 ($N_{ref}=1,5 \cdot N_{r1}=8706$ rpm). Tomar: $J_{carga}=J_{mot}$.

ZONA 2: Los escalones de carga variarán entre $0.1 \cdot T_{em_b}$ y $0.5 \cdot T_{em_b}$ y vuelta a $0.1 \cdot T_{em_b}$.

ZONA 3: Los escalones de carga variarán entre $0.1 \cdot T_{em_1}$ y $0.3 \cdot T_{em_1}$ y vuelta a $0.1 \cdot T_{em_1}$.



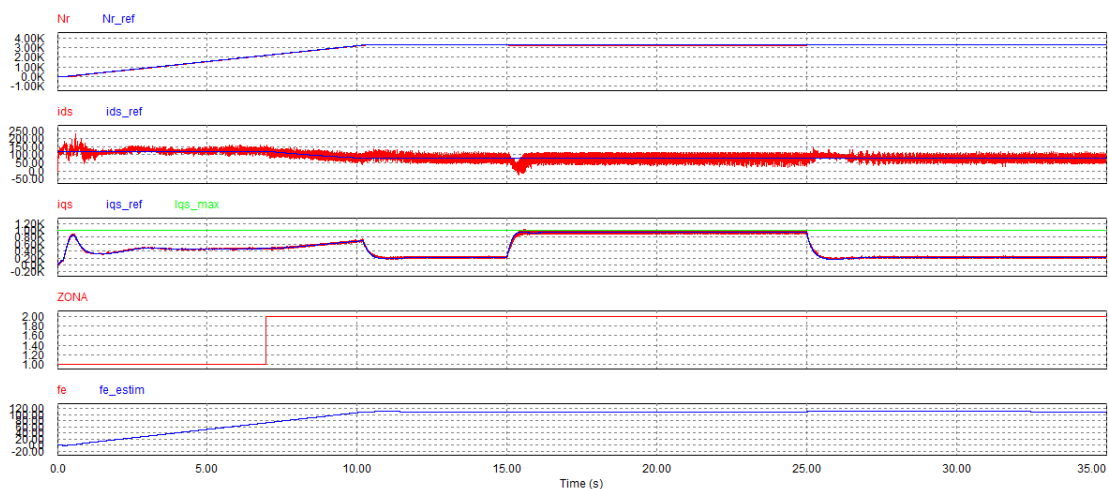
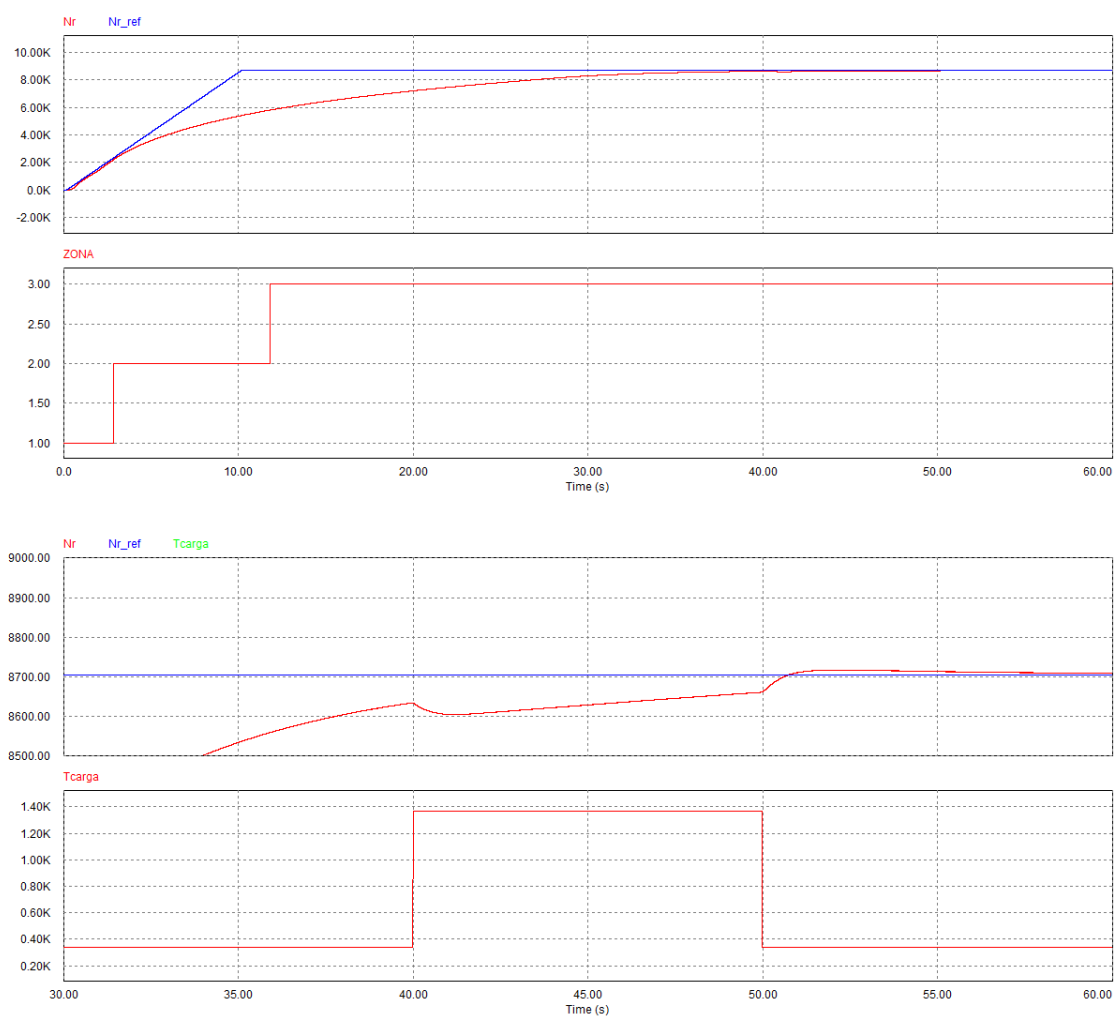


Fig. 3.7. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en la ZONA 2. Escalones de carga con $N_{r_ref}=1,5 \cdot N_{r_b}=3256,5$ rpm. $J_{carga}=J_{mot}$. Escalones de carga: $T_{carga}=0,1 \cdot T_{em_b}$ a $0,5 \cdot T_{em_b}$ y vuelta a $0,1 \cdot T_{em_b}$. El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_o=250$ Hz y $\zeta=0,7$ en el lado DC (tras el cálculo de la transformada de Park).



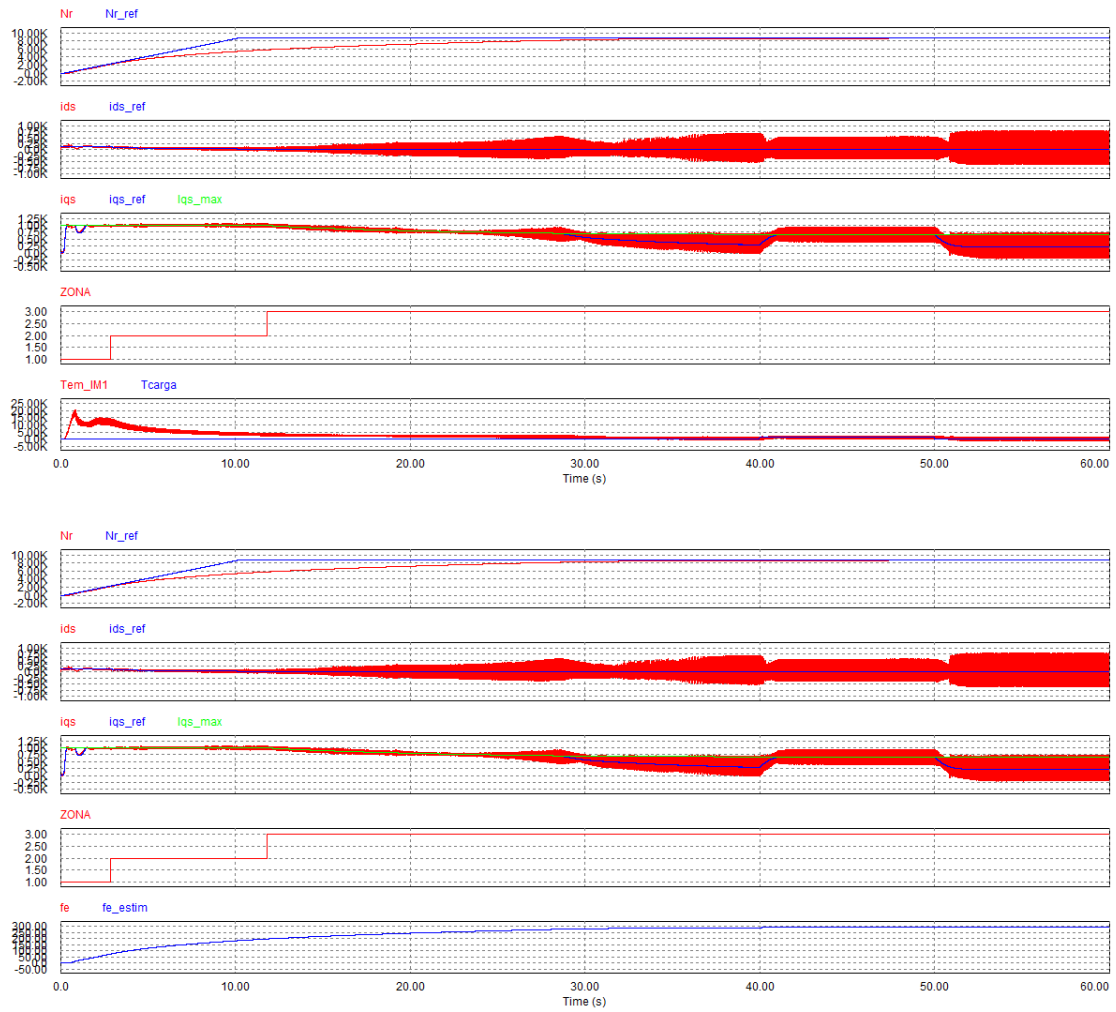
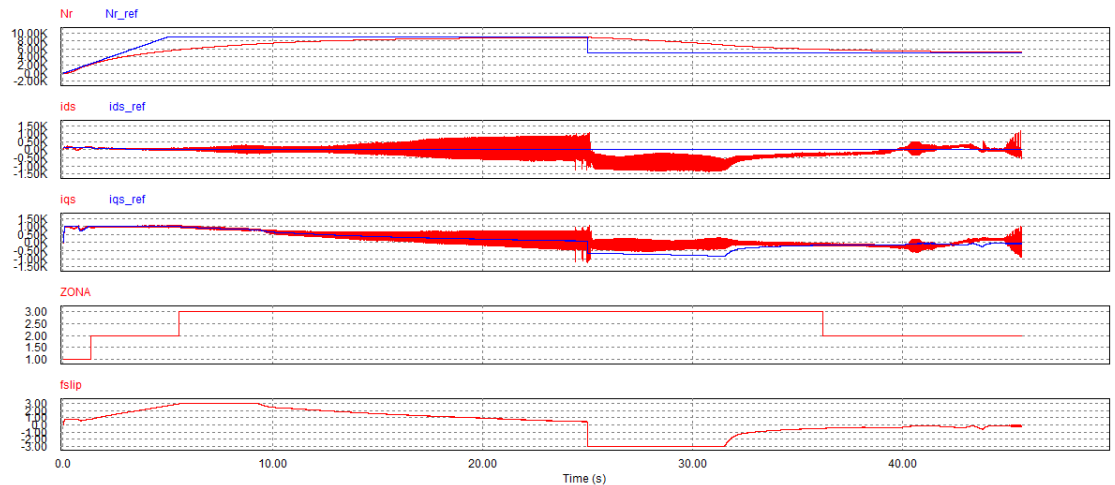
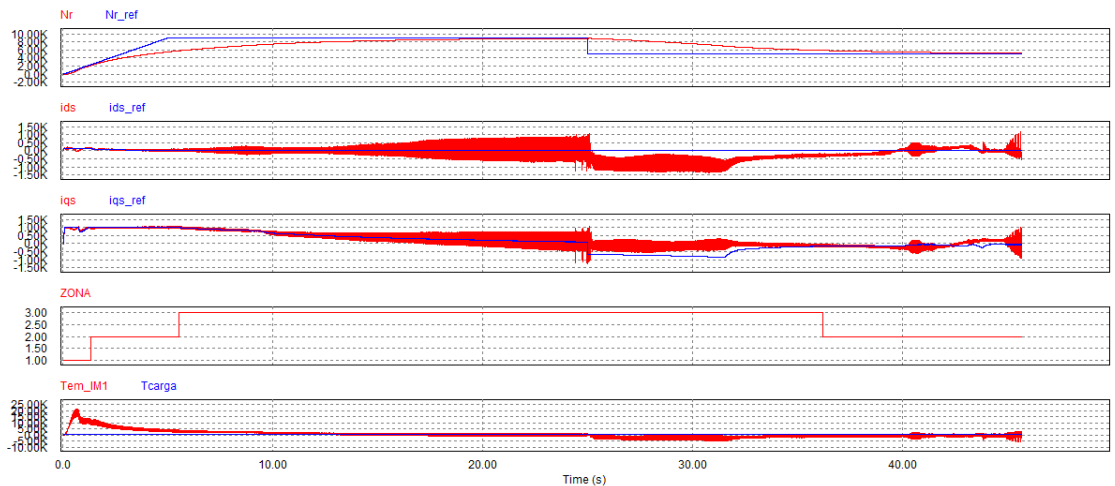
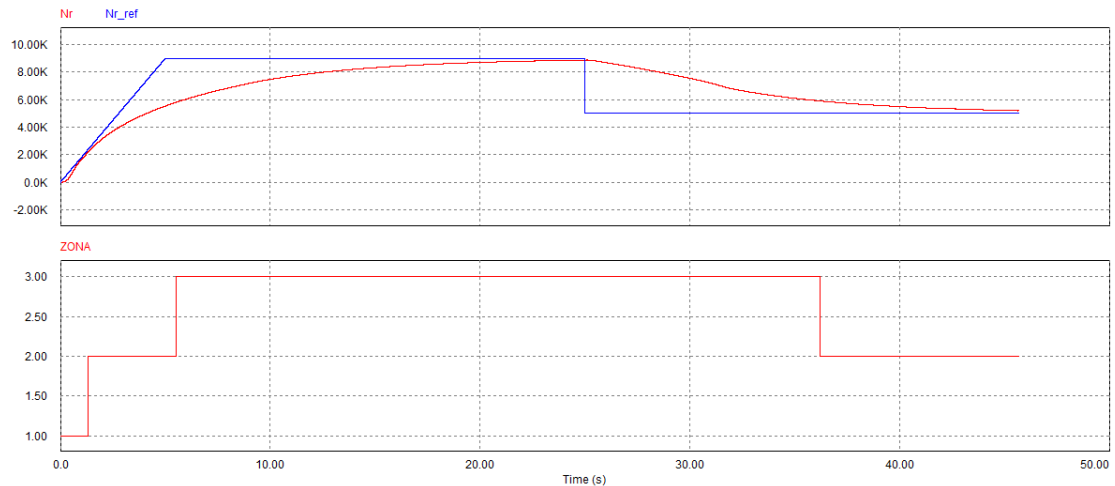


Fig. 3.8. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en la ZONA 3. Escalones de carga con $N_{r_ref}=1,5 \cdot N_{r_1}=8706$ rpm. $J_{carga}=J_{mot}$. Escalones de carga: $T_{carga}=0.1 \cdot T_{em_1}$ a $0.3 \cdot T_{em_1}$ y vuelta a $0.1 \cdot T_{em_1}$. El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_o=250$ Hz y $\zeta=0.7$ en el lado DC (tras el cálculo de la transformada de Park).

3) Simular cambios en la referencia de velocidad (p.e. escalones de 0.02 Hz pasando de las zonas 2 a 3), **incluyendo un cambio del signo de la velocidad** consistente en cambiarle el signo en forma de rampa de duración 10s (y 20s) (cambio del sentido de giro) desde $N_{r_ref}=1,2 \cdot N_{r1}=1,2 \cdot 5804 \text{ rpm}=6964,8 \text{ rpm}$ hasta $-6964,8 \text{ rpm}$.
Tomar: $J_{carga}=J_{mot}$, $T_{carga}=0,1 \cdot T_{em_1}$.



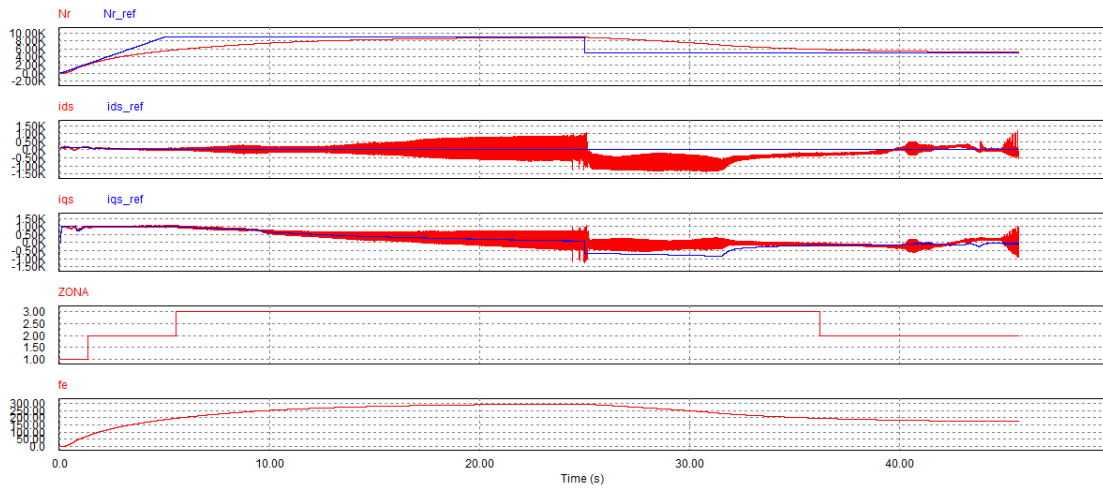
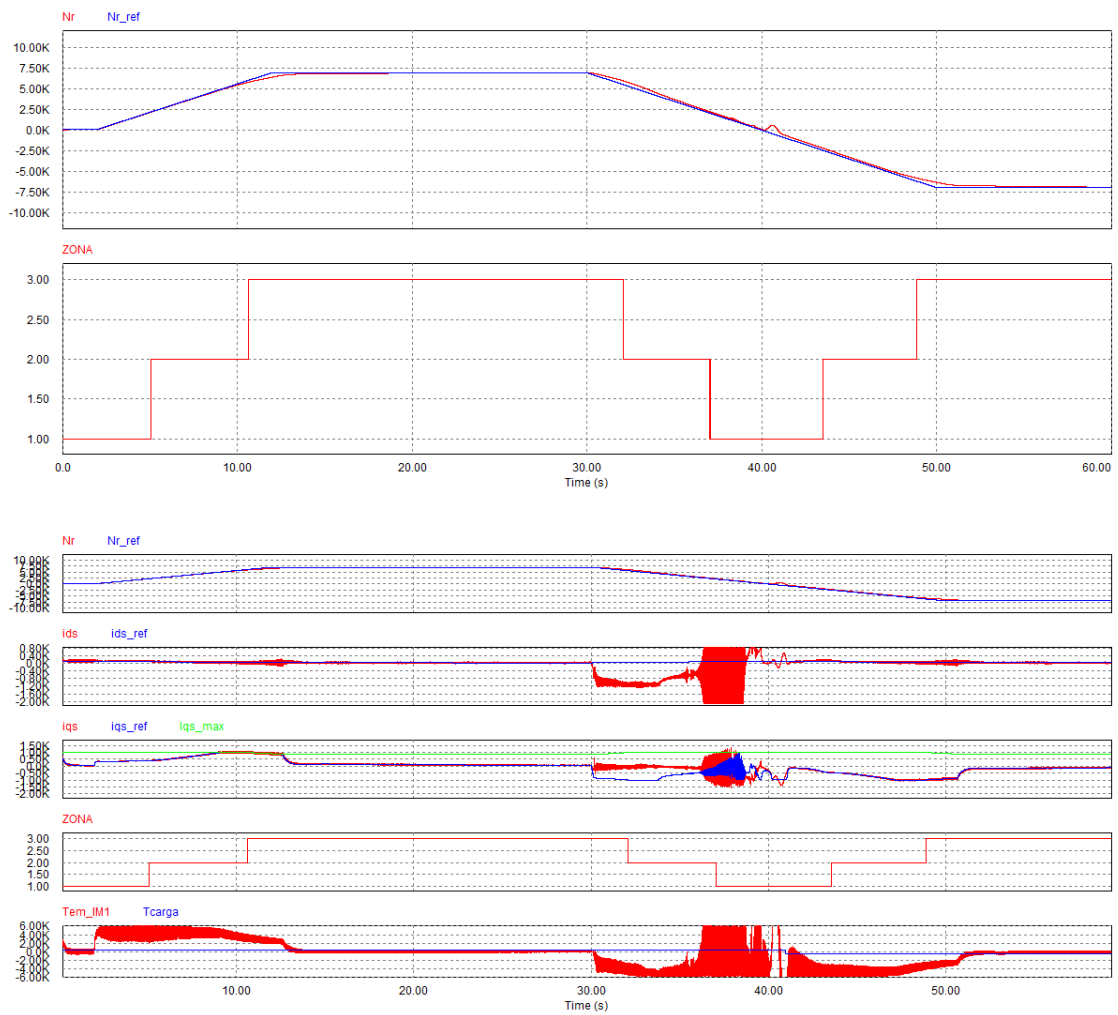


Fig. 3.9. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en las ZONAS 1, 2 y 3. Escalones de la referencia de velocidad desde 5000 rpm (zona 2) a 9000 rpm (zona 3) a 0,02 Hz. $J_{carga}=J_{mot}$, $T_{carga}=0.1 \cdot T_{em1}$. El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_0=250$ Hz y $\zeta=0.7$ en el lado DC (tras el cálculo de la transformada de Park).



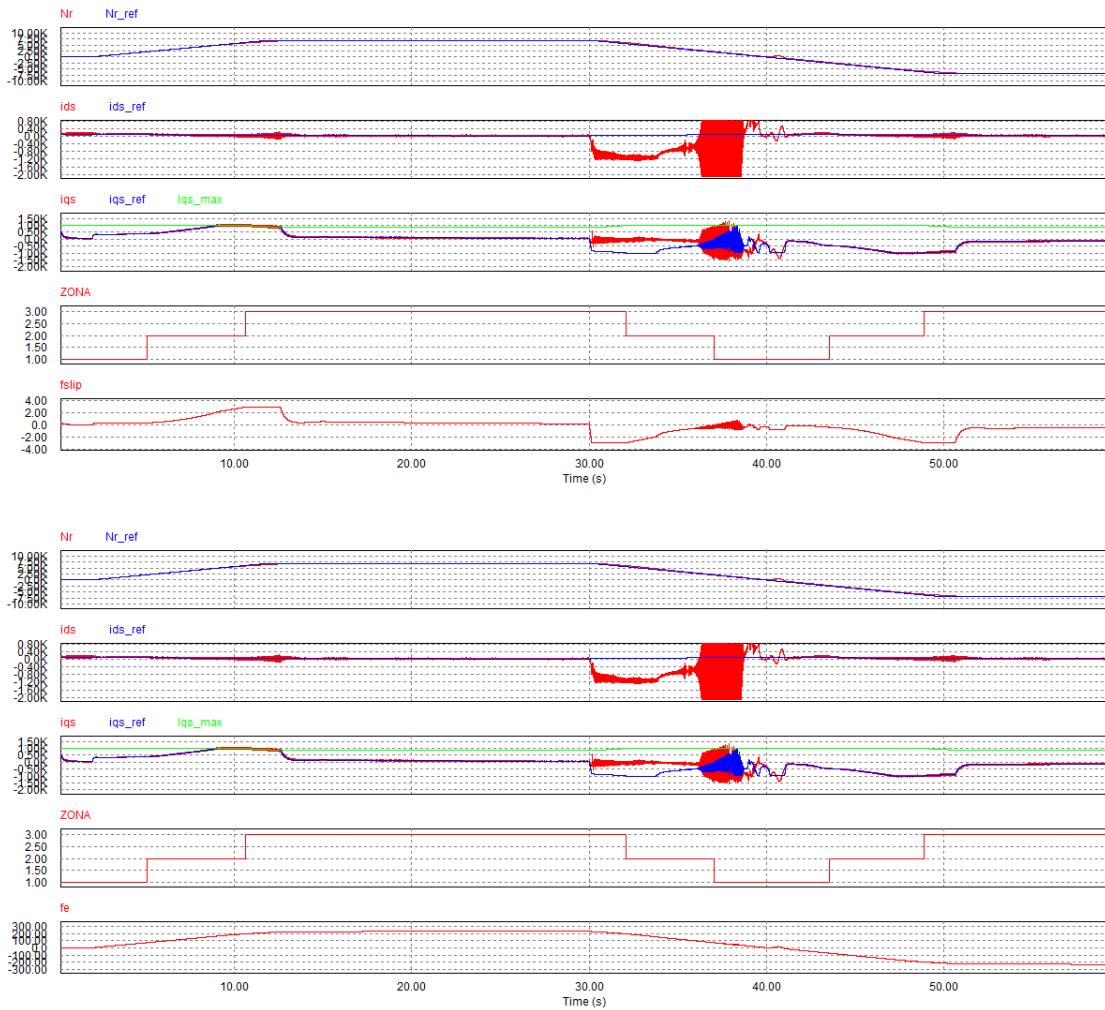
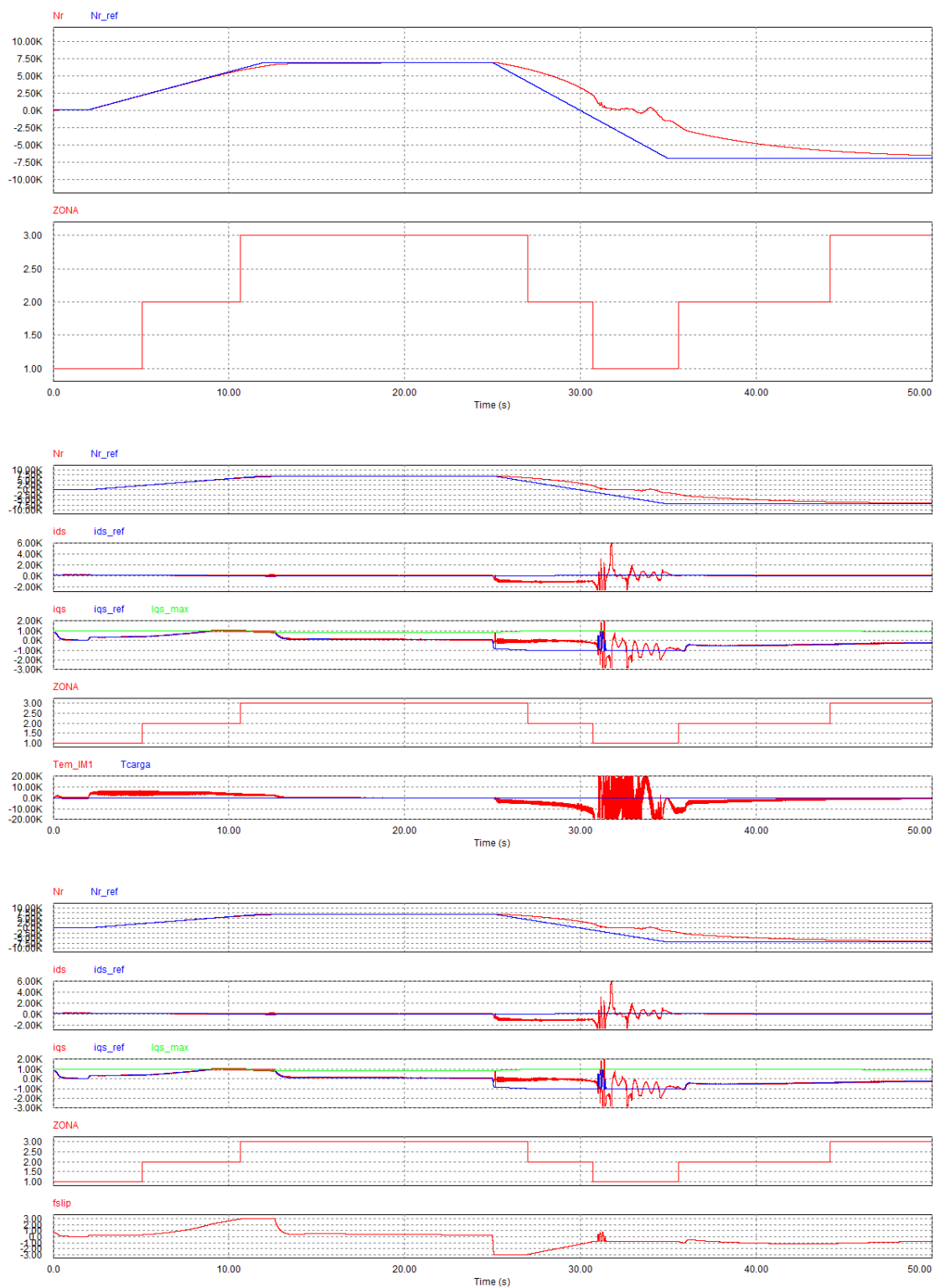


Fig. 3.10. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en las ZONAS 1, 2 y 3. Cambio de signo de $N_{r_ref}=1,2 \cdot N_{r1}=6964,8$ rpm a $-6964,8$ rpm con una rampa de duración 20 s. $J_{carga}=J_{mot}$, $T_{carga}=0,1 \cdot T_{em1}$. El signo del par resistente de carga cambia al cambiar el signo de la velocidad de giro (la carga se opone a la velocidad de giro). El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_o=250$ Hz y $\zeta=0,7$ en el lado DC (tras el cálculo de la transformada de Park).



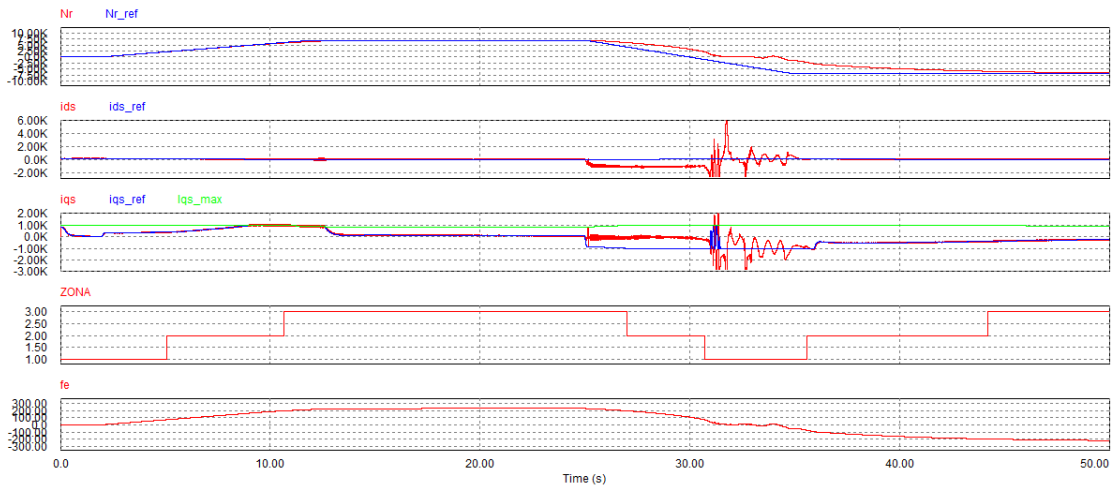


Fig. 3.11. Resultados de simulación PSIM del control de velocidad en las ZONAS 1, 2 y 3. Cambio de signo de $N_{r_ref}=1,2 \cdot N_{r_1}=6964,8$ rpm a $-6964,8$ rpm con una rampa de duración 10 s. $J_{carga}=J_{mot}$, $T_{carga}=0,1 \cdot T_{em_1}$. El signo del par resistente de carga cambia al cambiar el signo de la velocidad de giro (la carga se opone a la velocidad de giro). El sensado de las corrientes de estator se realiza mediante filtro paso bajo de 2º orden con $f_o=250$ Hz y $\zeta=0,7$ en el lado DC (tras el cálculo de la transformada de Park).