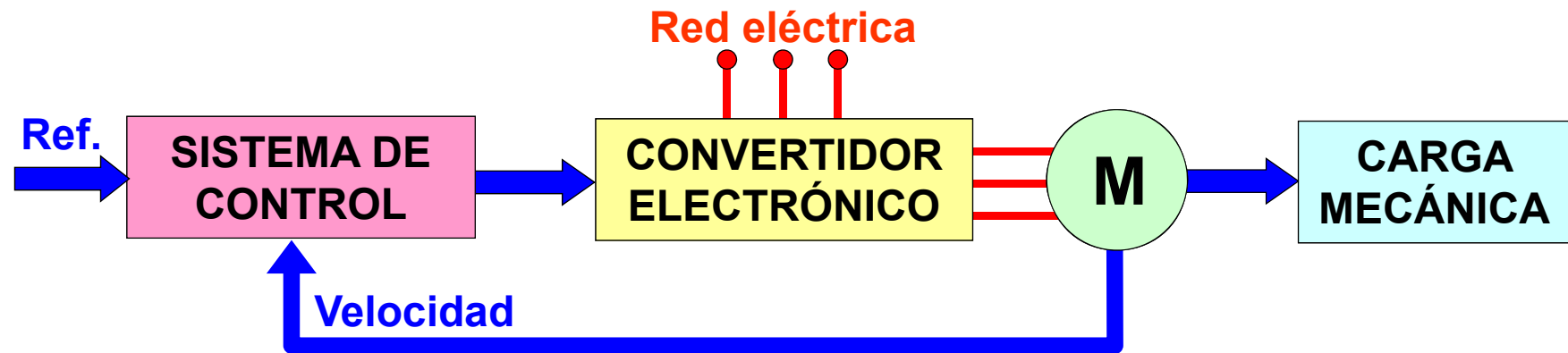


***Bucles de control para
accionamientos electrónicos
de motores de CC***

Objetivos generales del tema

- ❑ Conocer las funciones que deben desarrollar los bucles y algoritmos de control necesarios para el manejo de los accionamientos de motores de CC basados en rectificadores controlados e inversores
- ❑ Ser capaz de analizar las variaciones que se producen en la dinámica de los bucles de control al realizar cambios en los valores de los parámetros que los definen
- ❑ Ser capaz de seleccionar el bucle de control más adecuado para el diseño concreto de un accionamiento electrónico para motores de CC
- ❑ Conocer de forma general las características de los bucles de control presentes en los accionamientos industriales para motores de CC

Funciones generales de un bucle de control



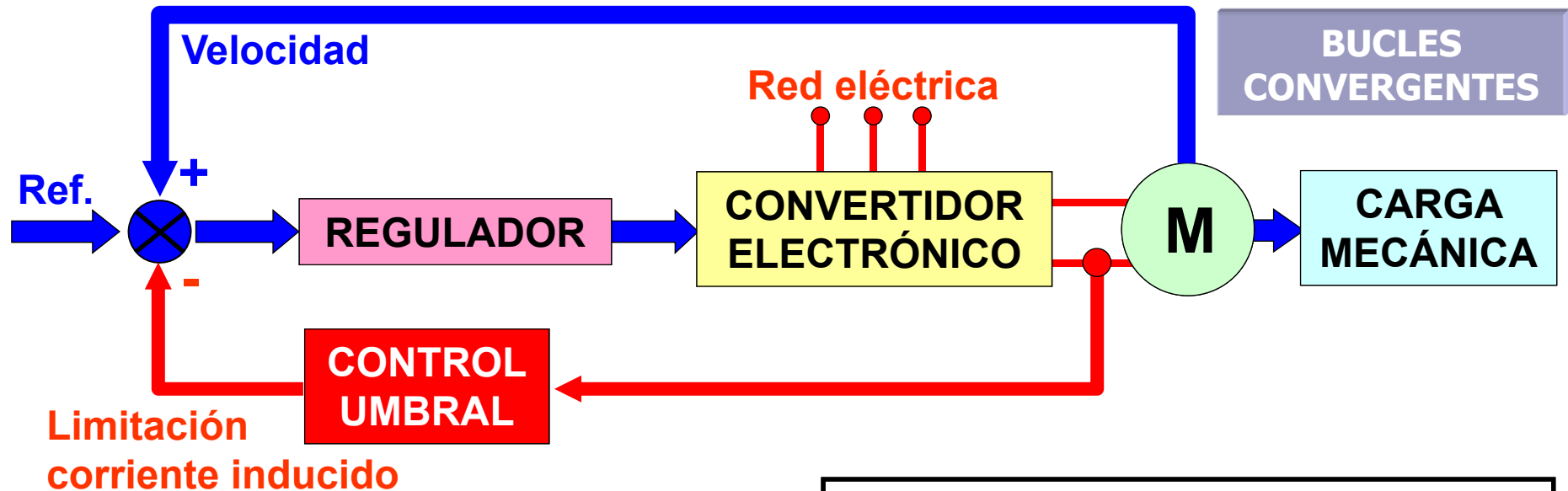
FUNCIONES DEL BUCLE DE CONTROL

Mantenimiento de las variables controladas dentro de unos límites respecto a los valores fijados como referencia

Establecimiento de límites para los valores de las variables controladas y de sus derivadas: protección integridad de la máquina controlada

Opcionalmente: monitorización de una o varias variables del proceso controlado

Tipos de bucles de control I: regulación en bucles convergentes



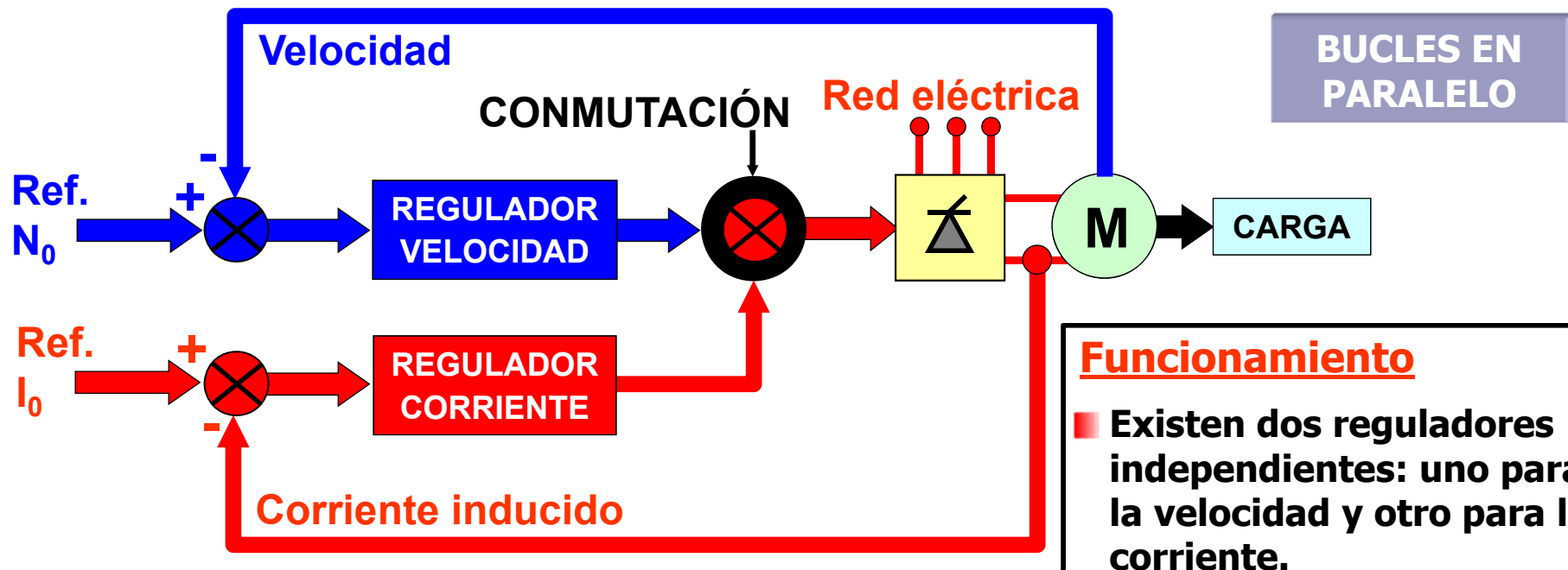
Ventajas e inconvenientes

- Es una solución sencilla y barata (se utiliza un solo regulador)
- La limitación de corriente depende de la referencia de velocidad.
- Imposible optimizar el regulador para las dos variables.

Funcionamiento

- La señal de control secundaria (corriente se compara con un umbral)
- Cuando se supera dicho umbral el exceso se realimenta a la entrada
- Esta realimentación reduce el retorno de velocidad por tanto la salida del regulador también se reduce

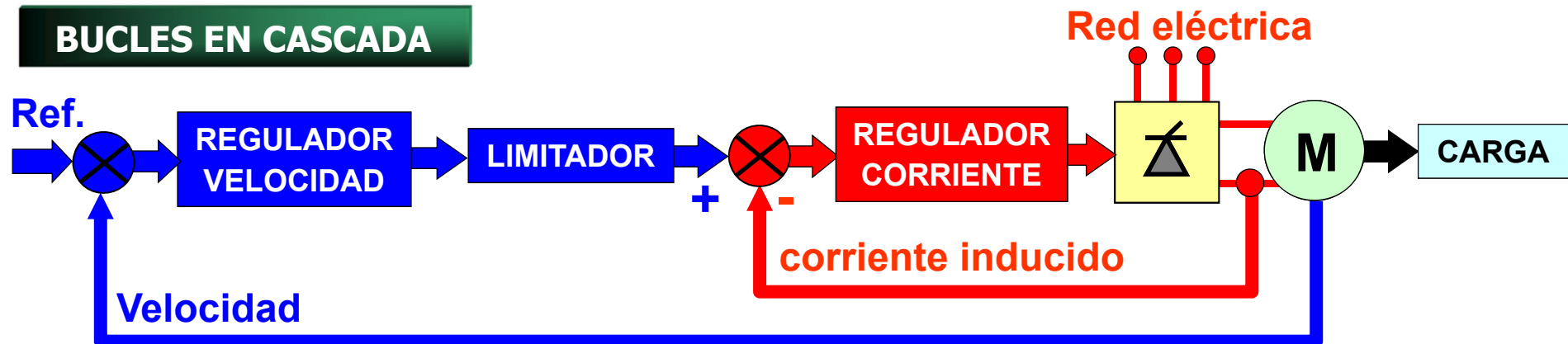
Tipos de bucles de control II: regulación paralela



Ventajas e inconvenientes

- Es posible regular de forma óptima ambas variables
- Si la conmutación es lo bastante rápida se puede obtener una respuesta dinámica mejor que con cualquier otra estructura de control.

Tipos de bucles de control III: regulación en bucles en cascada



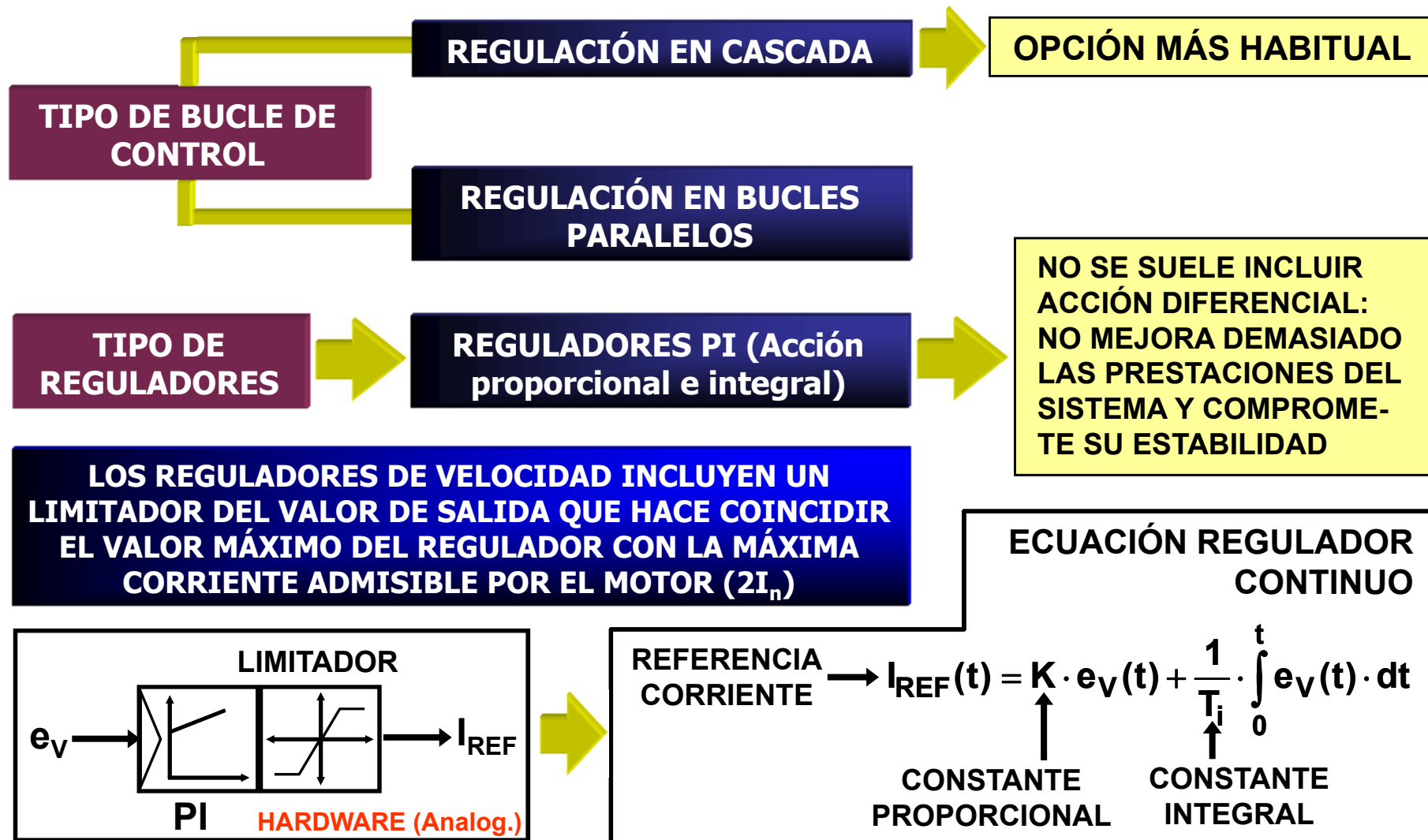
Ventajas e inconvenientes

- Limitando la salida del regulador de velocidad es posible controlar la corriente de inducido
- Es posible anidar más bucles en cascada (control de tensión, posición, etc.)
- La respuesta dinámica de los bucles exige una relación mínima de 2 entre los tiempos

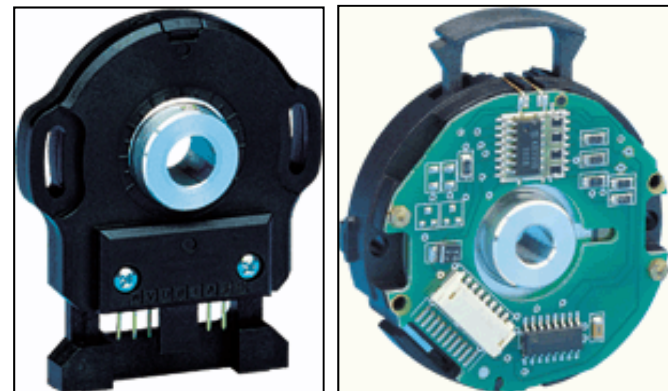
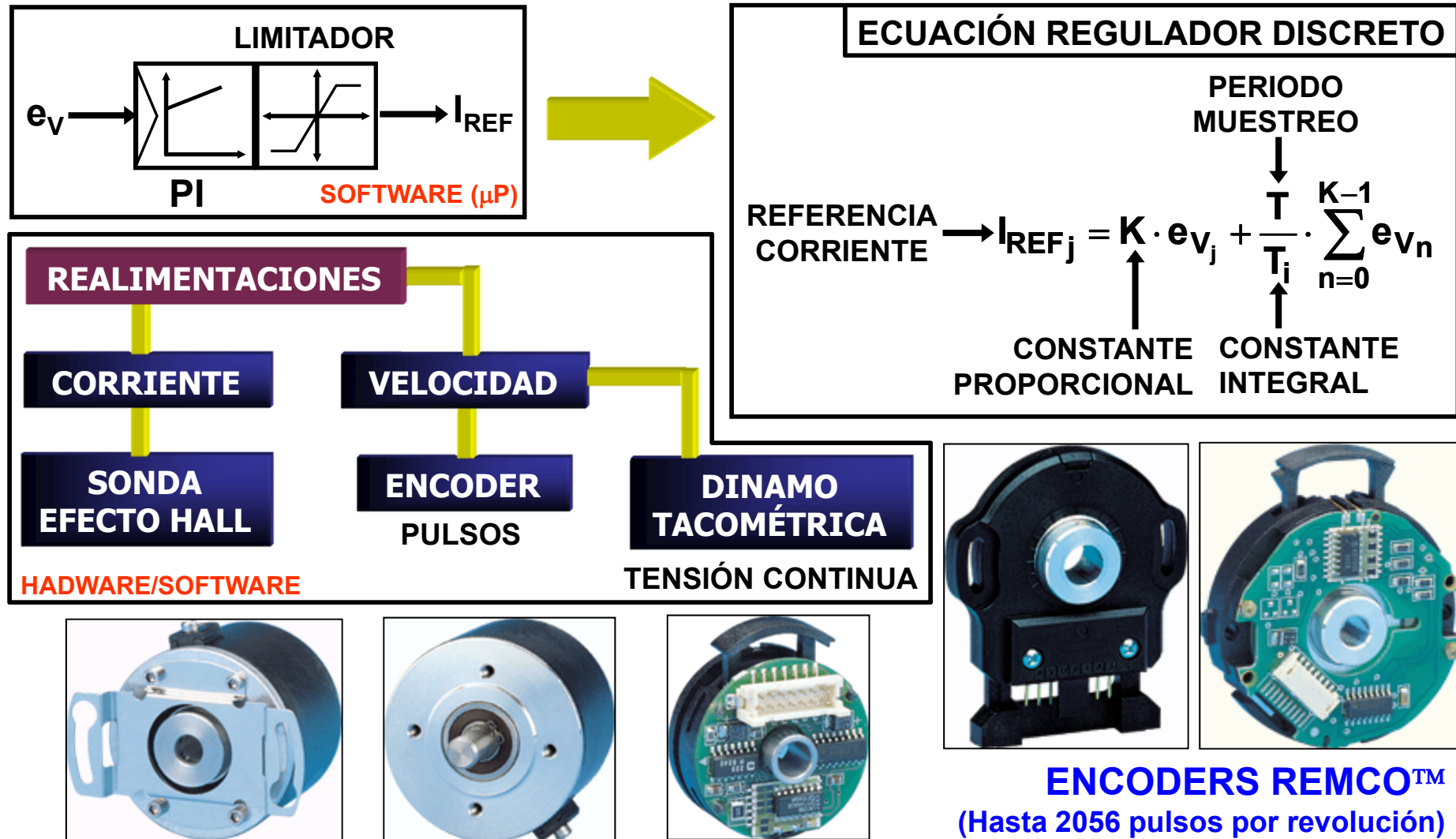
Funcionamiento

- Existen dos bucles: uno externo para la variable principal y uno interno para la secundaria
- La salida del regulador de velocidad sirve como entrada al regulador de corriente.
- El bucle exterior es más lento que el bucle interno (en general DOS VECES MÁS LENTO).

Descripción general y propiedades de los elementos integrantes de los bucles de control para accionamientos de CC I



Descripción general y propiedades de los elementos integrantes de los bucles de control para accionamientos de CC II

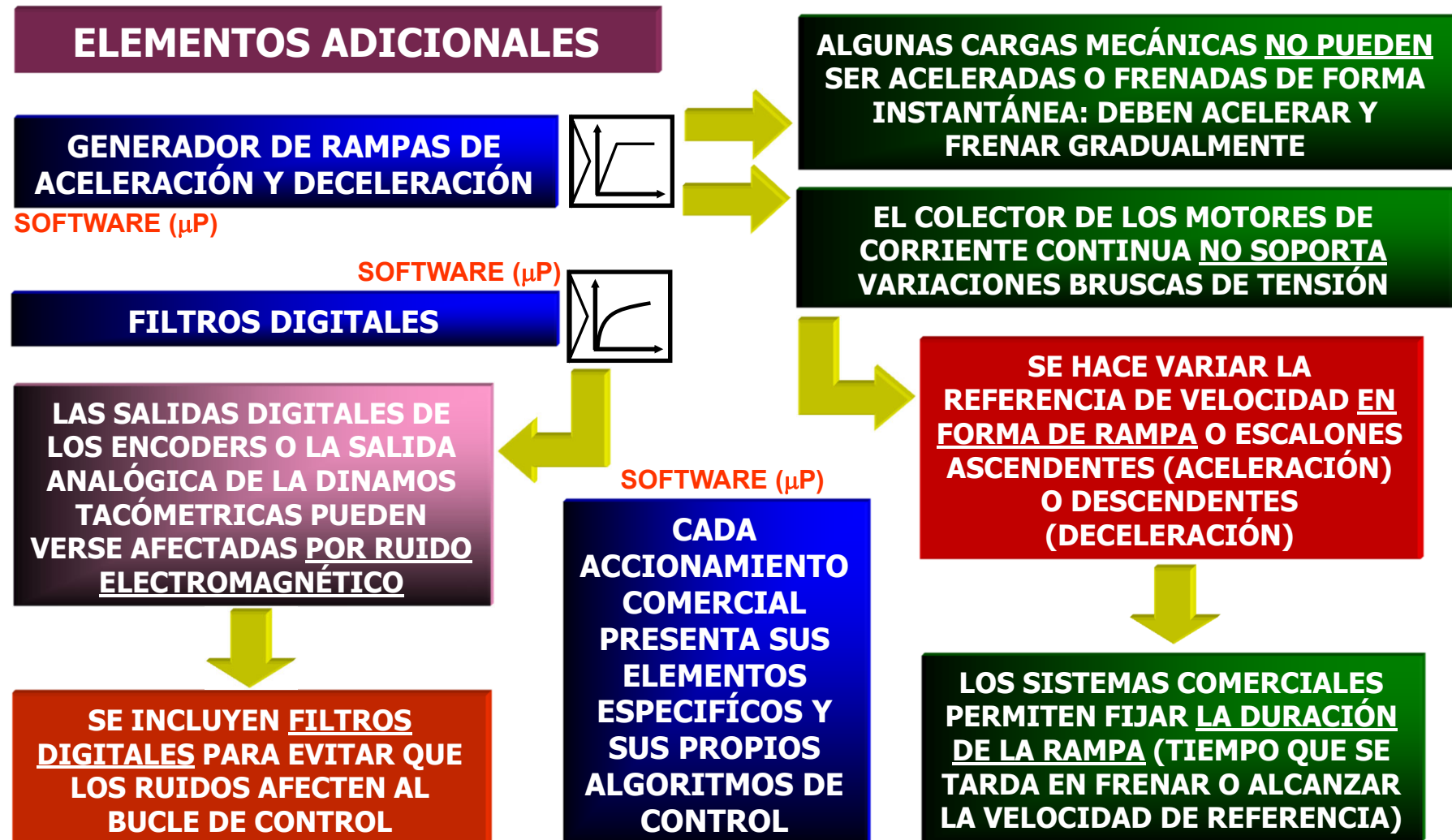


ENCODERS REMCO™
(Hasta 2056 pulsos por revolución)

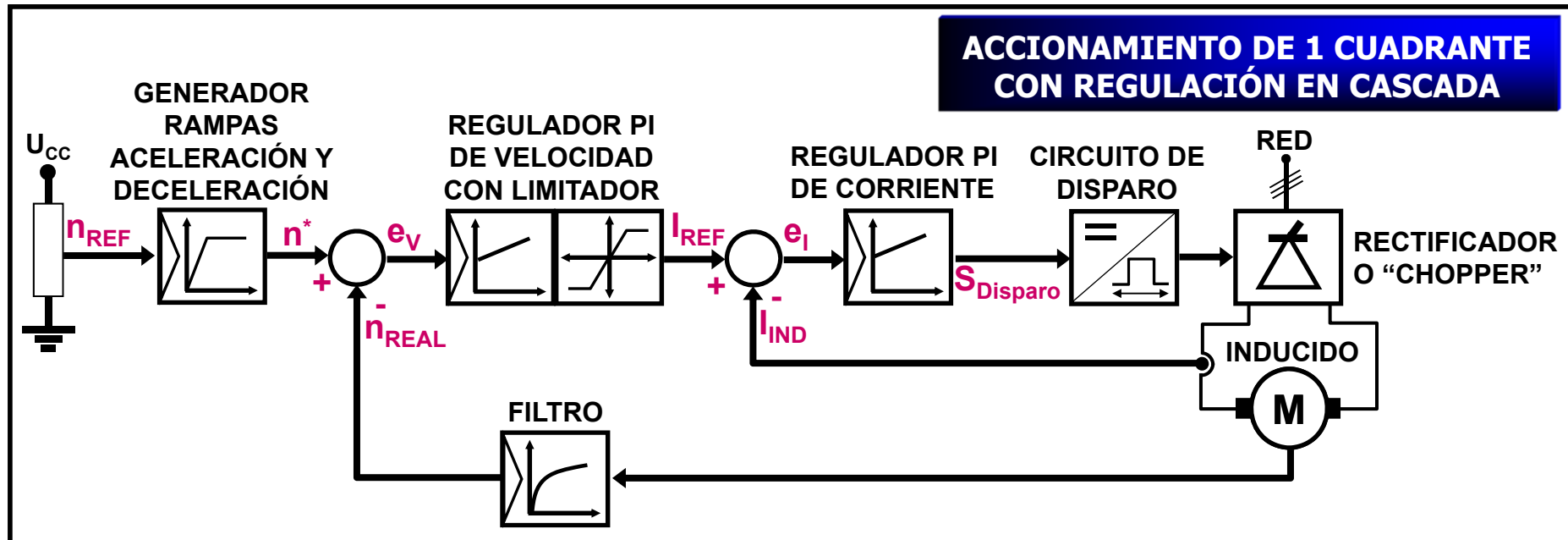
Sonda de efecto Hall



Descripción general y propiedades de los elementos integrantes de los bucles de control para accionamientos de CC III



Accionamiento de 1 cuadrante sin debilitamiento de campo I



FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

SE SUPONE MOTOR CON:
 $I_n = 40 \text{ A}$ $N_n = 500 \text{ rpm}$ $I_{MAX} = 2I_n$
 TRABAJANDO A 200 rpm CON UNA CORRIENTE DE 20 A
 SE DESEA PASAR DE 200 rpm a 450 rpm

SE SUBE LA REFERENCIA DE VELOCIDAD PARA PASAR A 450 rpm

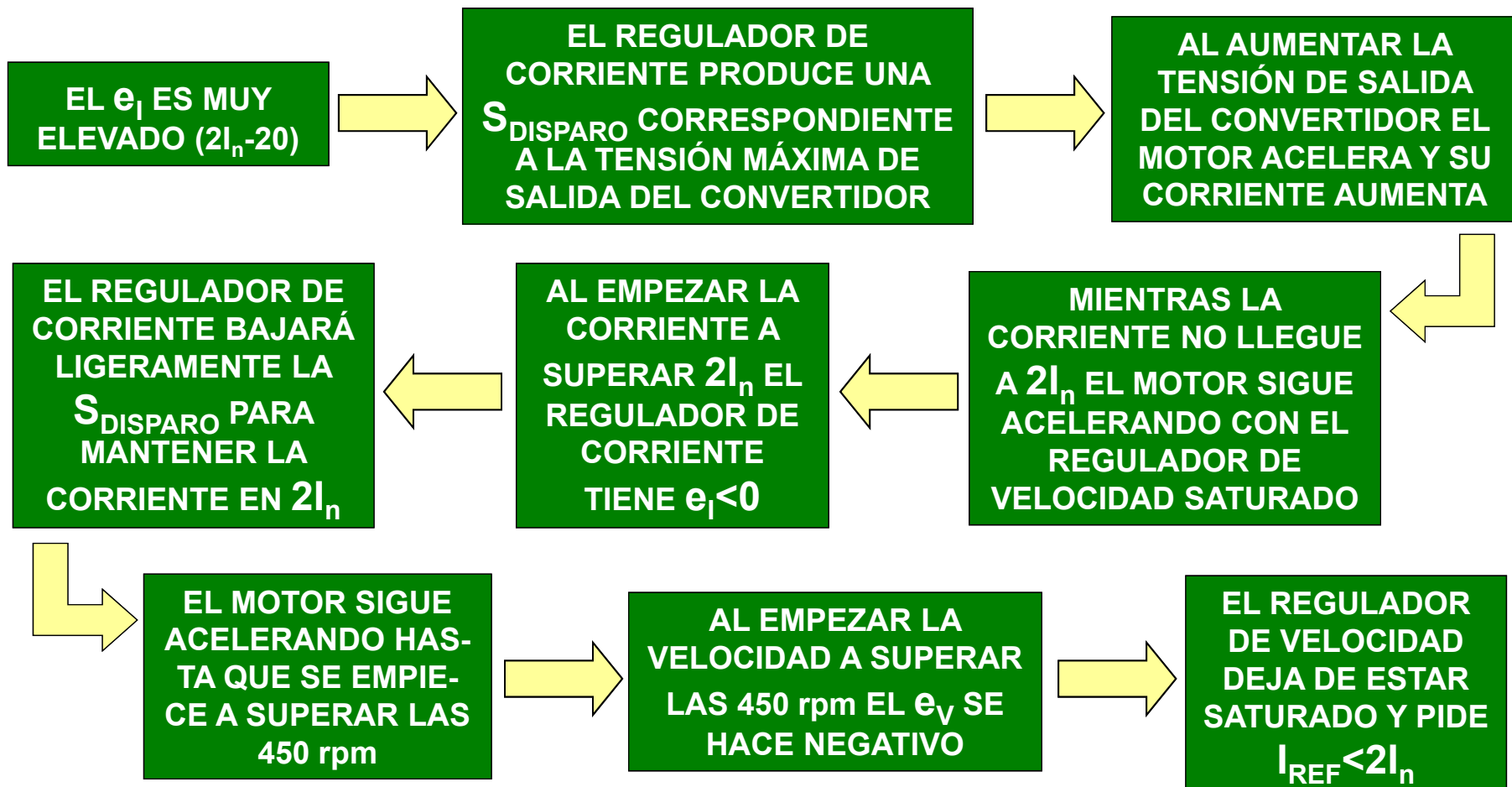
EL e_v ES MUY ELEVADO (450-200)

EL e_i ES MUY ELEVADO ($2I_n - 20$)

EL REGULADOR DE VELOCIDAD SE SATURA LLEGANDO A SU LÍMITE SUPERIOR ($I_{REF} = I_{MAX} = 2I_n$)

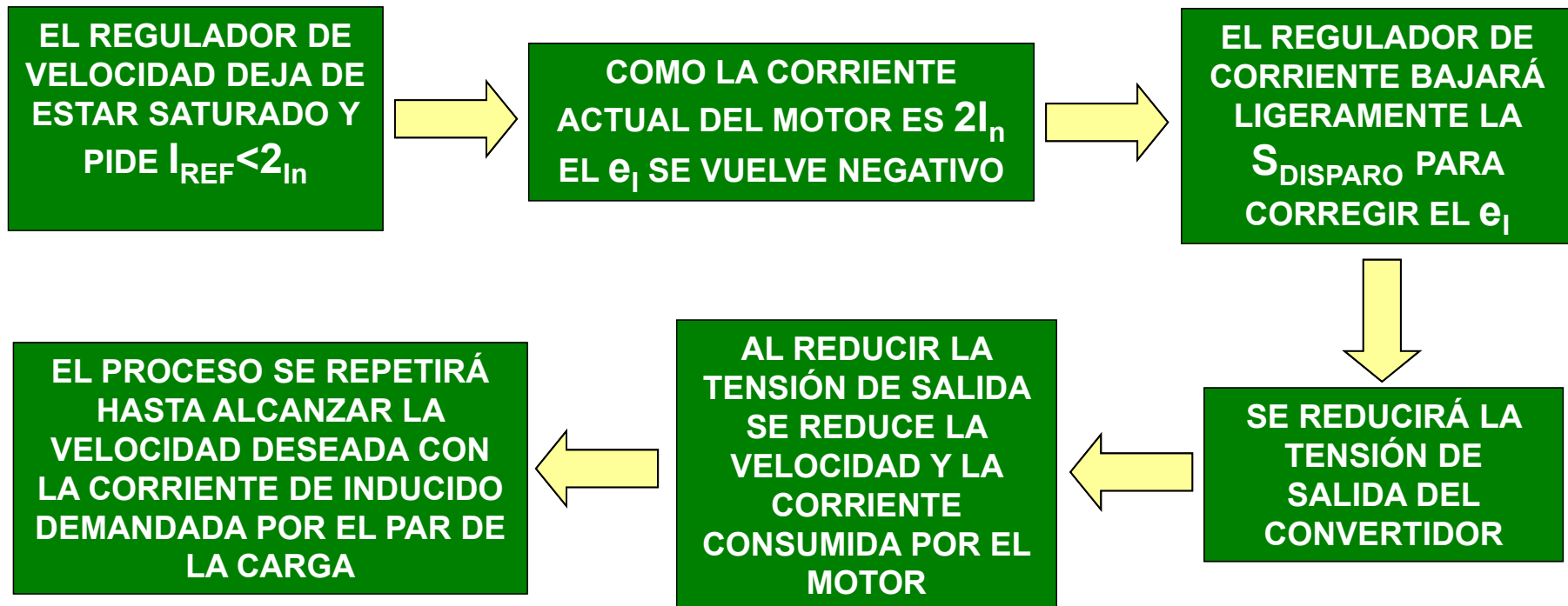
Accionamiento de 1 cuadrante sin debilitamiento de campo II

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

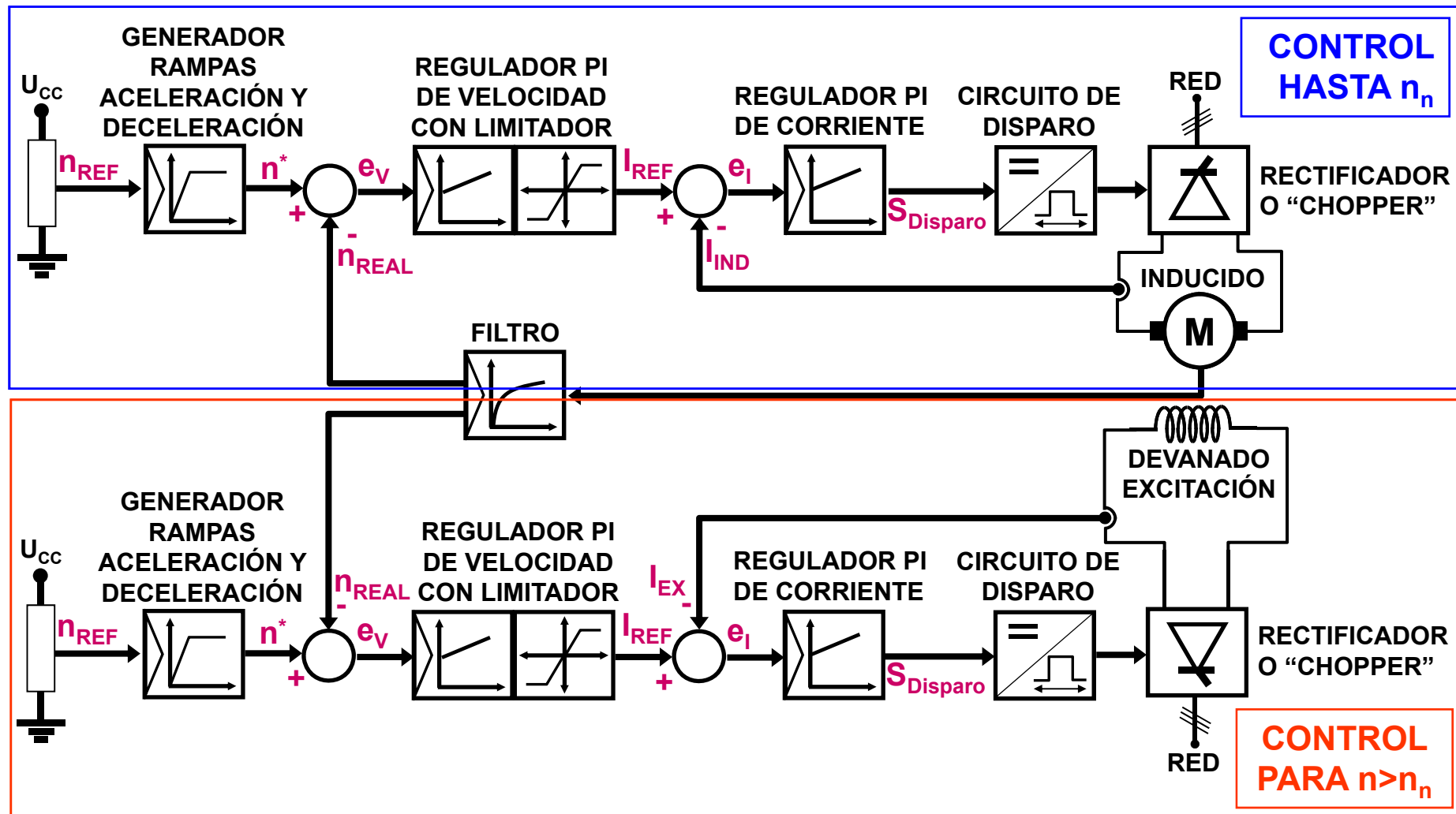


Accionamiento de 1 cuadrante sin debilitamiento de campo III

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA



Accionamiento de 1 cuadrante con debilitamiento de campo I



Accionamiento de 1 cuadrante con debilitamiento de campo II

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

CUANDO SE UTILIZA UN BUCLE DE CONTROL SIN DEBILITAMIENTO DE CAMPO NO ES POSIBLE HACER TRABAJAR EL MOTOR CON $N > N_n$

LA SOLUCIÓN PARA ESTE INCONVENIENTE ES COMBINAR DOS BUCLES DE CONTROL

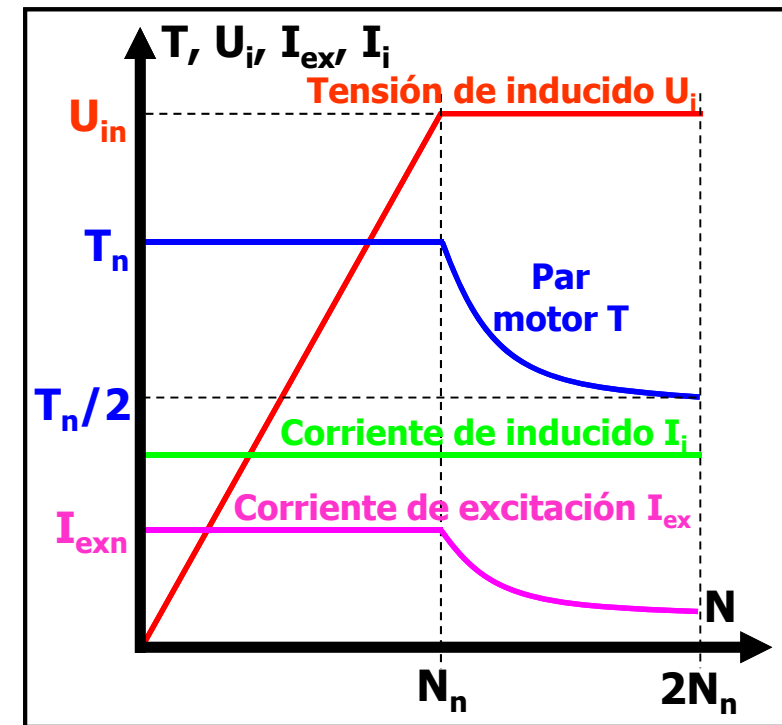
CONTROL DE LA TENSIÓN DE INDUCIDO PARA $N < N_n$

CONTROL DE CAMPO PARA $N > N_n$

SE GOBIERNAN DOS CONVERTIDORES: UNO PARA EL INDUCIDO Y OTRO PARA EL INDUCTOR

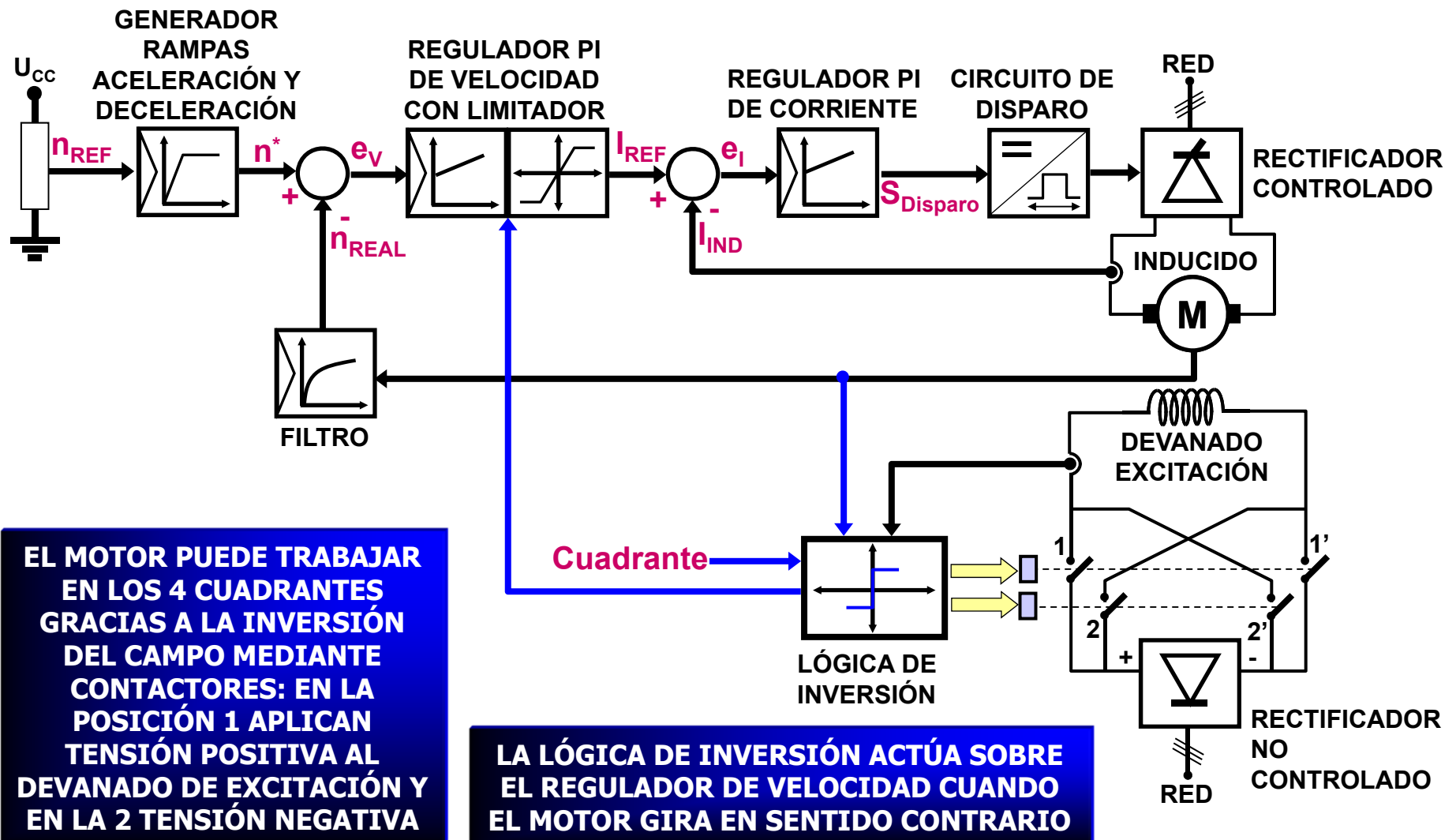
EL CONVERTIDOR DE INDUCIDO TRABAJA PARA $N < N_n$ EN ESE CASO SE CONTROLA LA CORRIENTE DE INDUCIDO

EL CONVERTIDOR DE INDUCTOR TRABAJA PARA $N > N_n$ EN ESE CASO SE CONTROLA LA CORRIENTE DE EXCITACIÓN



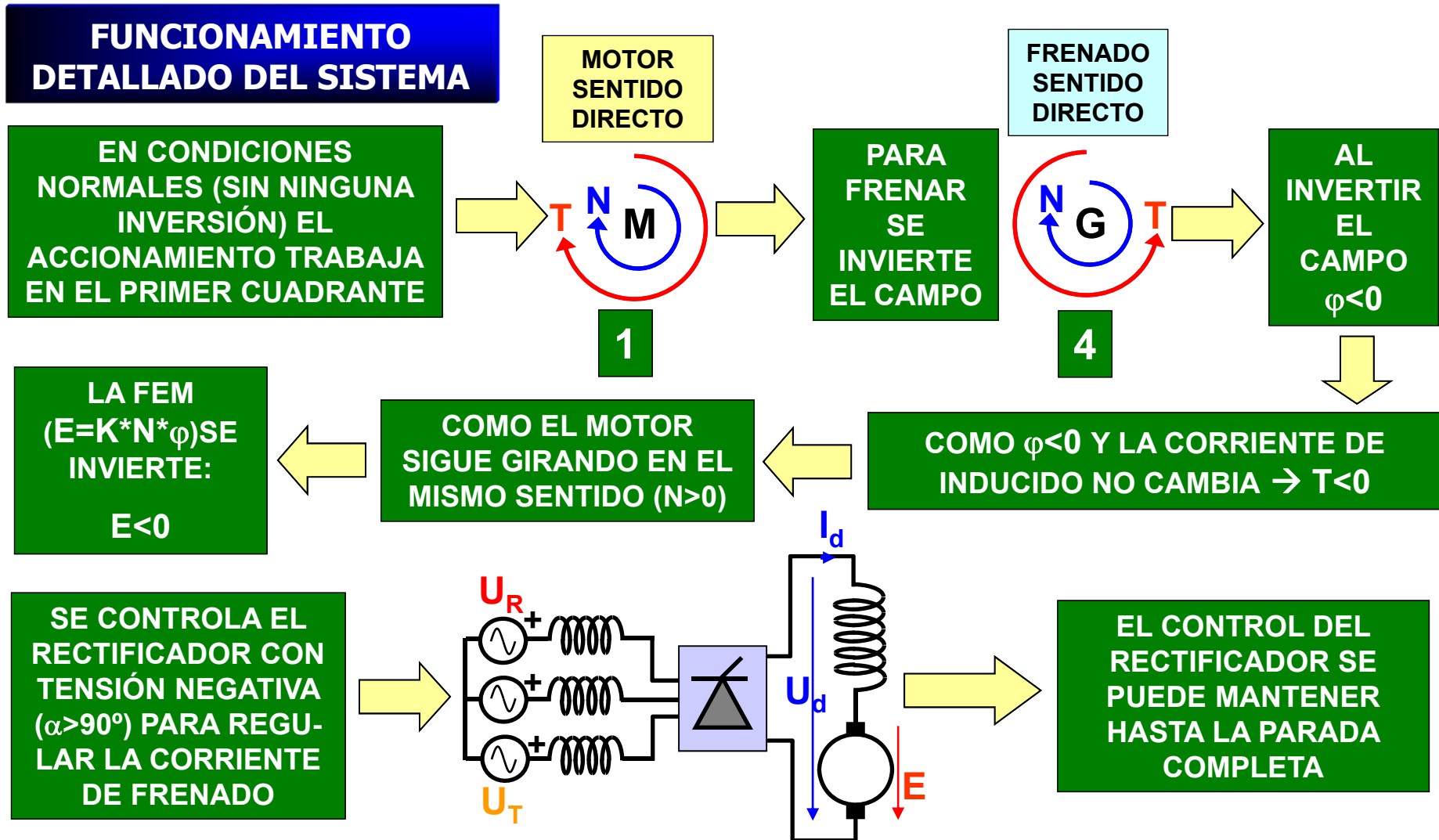
LA ESTRUCTURA DE REGULADORES Y FUNCIONAMIENTO DEL BUCLE ES EN AMBOS CASOS IDÉNTICA AL ACCIONAMIENTO DE 1 CUADRANTE SIN DEBILITAMIENTO DE CAMPO

Accionamiento de 4 cuadrantes con inversión de campo I



Accionamiento de 4 cuadrantes con inversión de campo II

FUNCIONAMIENTO DETALLADO DEL SISTEMA



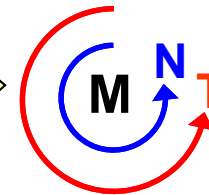
Accionamiento de 4 cuadrantes con inversión de campo III

FUNCIONAMIENTO DETALLADO DEL SISTEMA

SI CON EL MOTOR PARADO SE INVIERTE LA CONEXIÓN DE CAMPO Y SE ALIMENTA EL MOTOR CON TENSIÓN POSITIVA ($\alpha < 90^\circ$) ARRANCARÁ CON PAR Y VELOCIDAD INVERTIDAS

$$E = K \cdot n \cdot \phi \quad T = K' \cdot \phi \cdot I_i$$

MOTOR SENTIDO INVERSO



PUESTO QUE EL MOTOR GIRA EN SENTIDO CONTRARIO, LA LÓGICA DE INVERSIÓN ACTÚA SOBRE EL REGULADOR DE VELOCIDAD (La velocidad medida es negativa)

COMO EL FLUJO CAMBIA DE SIGNO Y LA CORRIENTE DE INDUCIDO SE MANTIENE $\rightarrow T < 0$

AL INVERTIR EL CAMPO EL FLUJO CAMBIA DE SIGNO

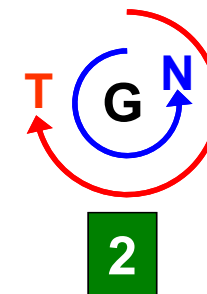
FRENADO SENTIDO INVERSO

PARA FRENAR SE INVIERTE DE NUEVO EL CAMPO

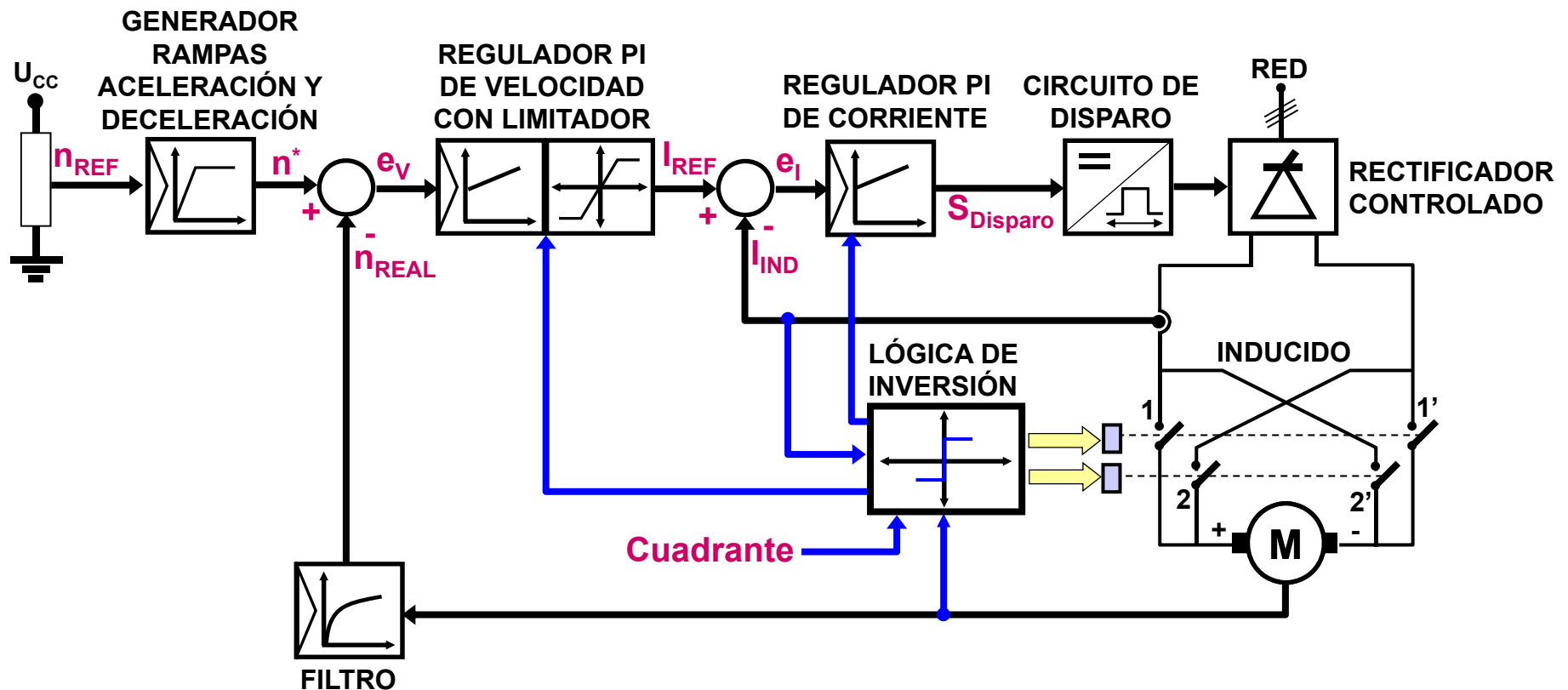
COMO EL MOTOR SIGUE GIRANDO EN EL MISMO SENTIDO ($N > 0$)

LA FEM ($E = K \cdot N \cdot \phi$) SE INVIERTE:
 $E < 0$

SE CONTROLA EL RECTIFICADOR CON TENSIÓN NEGATIVA ($\alpha > 90^\circ$) PARA REGULAR LA CORRIENTE DE FRENADO

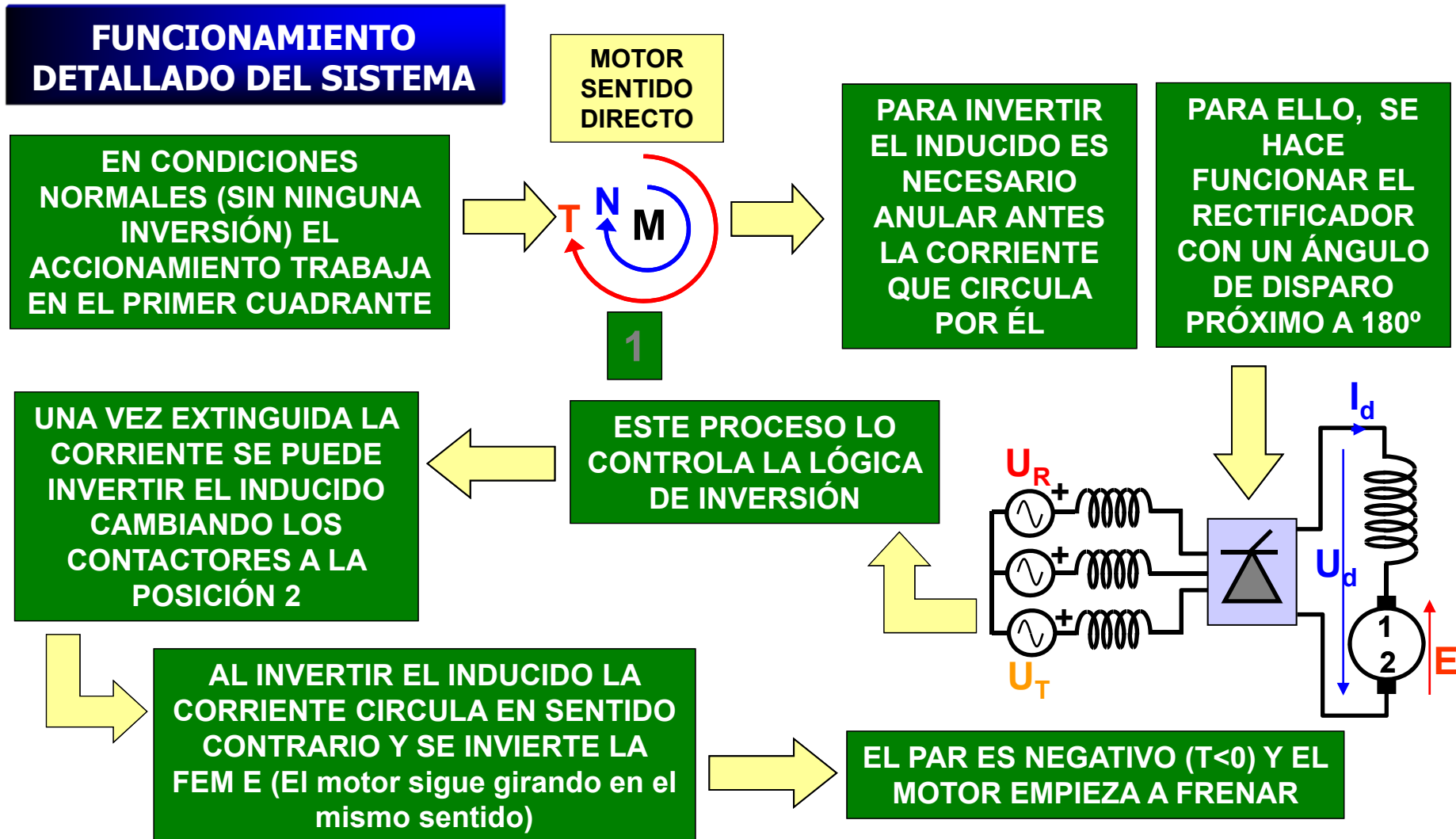


Accionamiento de 4 cuadrantes con inversión de inducido I



ESTE ESQUEMA TRABAJA DE FORMA PRÁCTICAMENTE IDÉNTICA AL DE INVERSIÓN DE CAMPO, SALVO QUE EN ESTE CASO SE INVIERTE EL INDUCIDO. LA INVERSIÓN DEBE REALIZARSE TRAS HABER ANULADO LA CORRIENTE DE INDUCIDO PARA ELLO SE HACE TRABAJAR EL RECTIFICADOR CON ÁNGULOS PRÓXIMOS A 180° INVIRTIENDO ASÍ LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

Accionamiento de 4 cuadrantes con inversión de inducido II



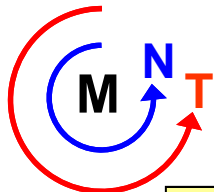
Accionamiento de 4 cuadrantes con inversión de inducido III

FUNCIONAMIENTO DETALLADO DEL SISTEMA

EL PAR ES NEGATIVO ($T < 0$) Y EL MOTOR EMPIEZA A FRENAR

SI CON EL MOTOR PARADO SE INVIERTE LA CONEXIÓN DE INDUCIDO Y SE ALIMENTA EL MOTOR CON TENSIÓN POSITIVA ($\alpha < 90^\circ$) ARRANCARÁ CON PAR Y VELOCIDAD INVERTIDAS

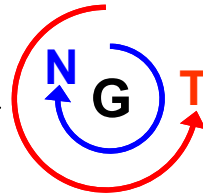
MOTOR SENTIDO INVERSO



3

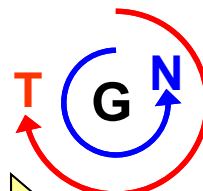
PUESTO QUE EL MOTOR GIRA EN SENTIDO CONTRARIO, LA LÓGICA DE INVERSIÓN ACTÚA SOBRE EL REGULADOR DE VELOCIDAD (La velocidad medida es negativa)

FRENADO SENTIDO DIRECTO



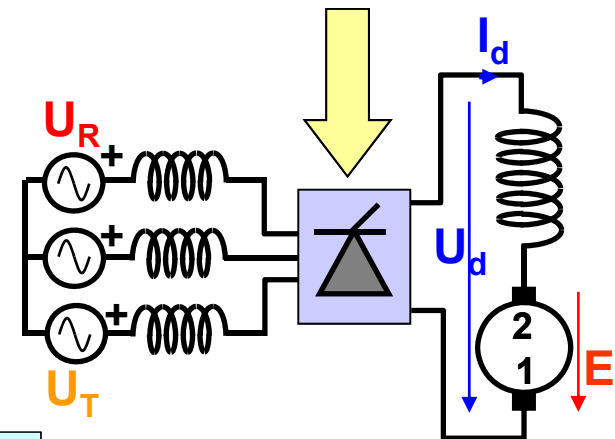
4

FRENADO SENTIDO INVERSO



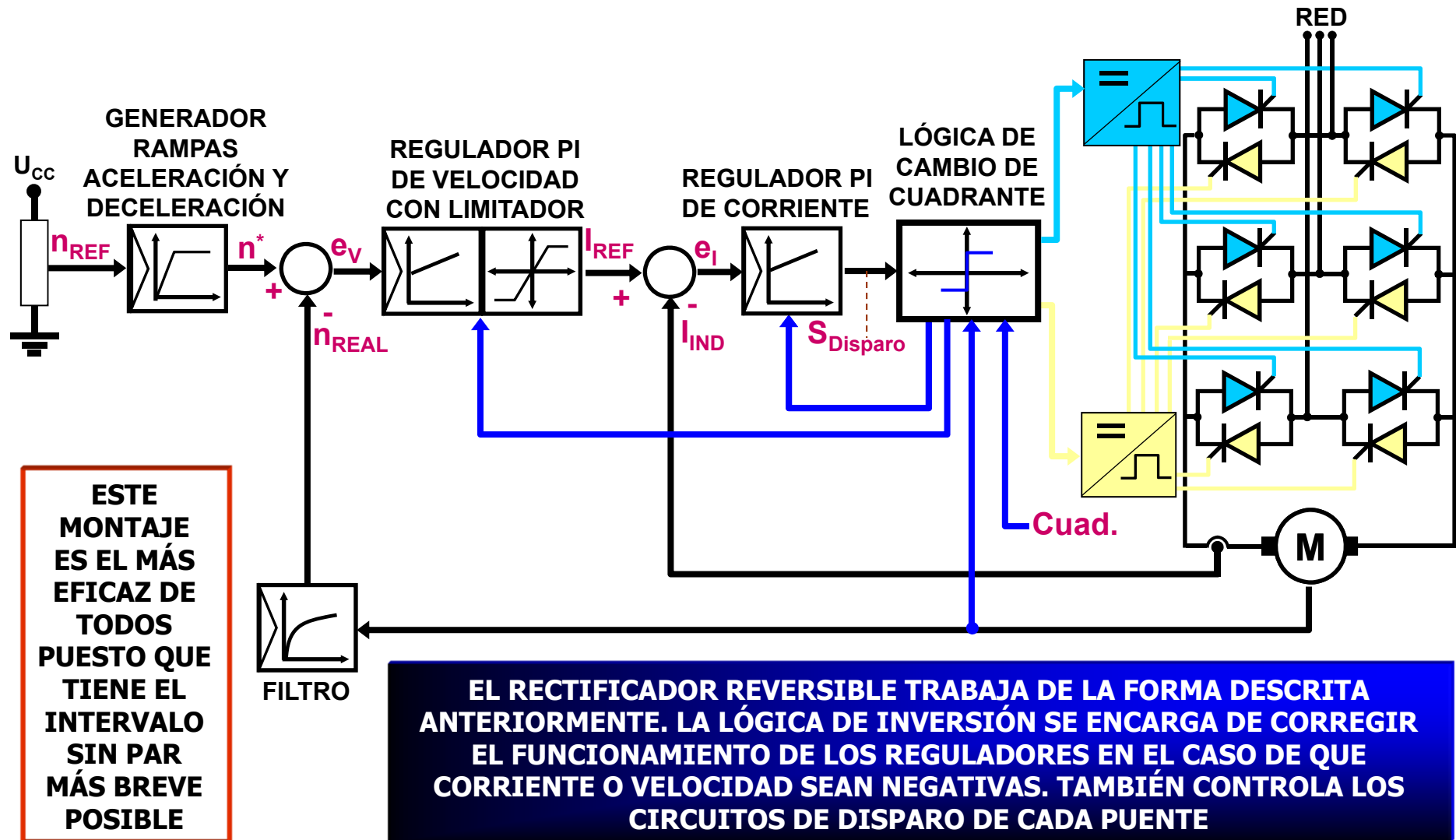
2

SE CONTROLA EL RECTIFICADOR CON TENSIÓN NEGATIVA ($\alpha > 90^\circ$) PARA REGULAR LA CORRIENTE DE FRENADO



PARA FRENAR SE INVIERTE DE NUEVO EL INDUCIDO REPITIÉNDOSE EL PROCESO DE FRENADO EN EL CUADRANTE 4

Accionamiento de 4 cuadrantes con convertidor reversible en antiparalelo I



Accionamiento de 4 cuadrantes con convertidor reversible en antiparalelo II

FUNCIONAMIENTO DETALLADO DEL SISTEMA

EN CADA INSTANTE SÓLO ESTÁ ACTIVO UNO DE LOS DOS Puentes RECTIFICADORES

LA CONMUTACIÓN ENTRE GRUPOS SE REALIZA DESPUÉS DE ANULAR LA CORRIENTE DE CARGA, SUPRIMIR LOS PULSOS DE CONTROL DEL GRUPO SALIENTE, Y ESPERAR EL BLOQUEO DE LOS TIRISTORES

CADA RECTIFICADOR TRABAJA COMO TAL ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) O COMO ONDULADOR ($90^\circ < \alpha < 180^\circ$) DEVOLVIENDO ENERGÍA A LA RED

LA LÓGICA DE CAMBIO DE CUADRANTE CONTROLA EL PROCESO DE CONMUTACIÓN Y LOS ÁNGULOS DE DISPARO DE CADA PUENTE EN FUNCIÓN DEL CUADRANTE DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

LA LÓGICA DE CAMBIO DE CUADRANTE TAMBIÉN TIENE QUE ACTUAR SOBRE LOS REGULADORES PARA CORREGIR EL CASO DE QUE LA CORRIENTE O VELOCIDAD SEAN NEGATIVAS

Comparativa entre los distintos esquemas con funcionamiento en 4 cuadrantes

INTERVALOS SIN PAR DURANTE EL CAMBIO DE CUADRANTE EN LOS DISTINTOS BUCLES DE CONTROL

ACCIONAMIENTO DE 4 CUADRANTES CON INVERSIÓN DEL INDUCTOR

INTERVALO SIN PAR
0,5 – 2 s

ACCIONAMIENTO DE 4 CUADRANTES CON INVERSIÓN DEL INDUCIDO

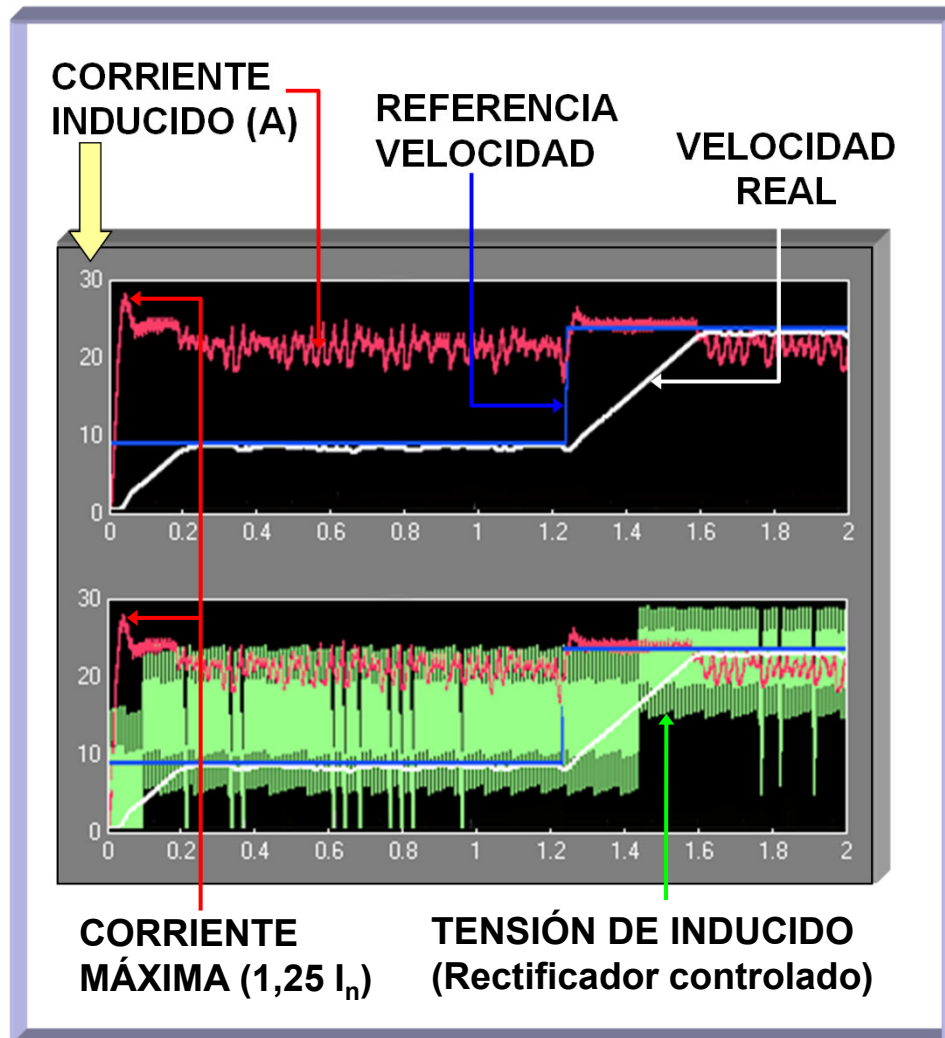
INTERVALO SIN PAR
0,1 – 0,2 s

ACCIONAMIENTO DE 4 CUADRANTES CON MONTAJE EN ANTIPARALELO

INTERVALO SIN PAR
2 – 10 ms

LOS PROCESOS RELACIONADOS CON EL INDUCTOR SON LOS MÁS LENTOS YA QUE ES NECESARIO MAGNETIZAR LA MÁQUINA EN SENTIDO CONTRARIO

Análisis de la influencia de los parámetros del bucle de control en el accionamiento I



SIMULACIÓN CONTROL DIGITAL

MOTOR de 500 V
 $I_n=23$ A 10 kW
450 rpm

ACCIONAMIENTO DE
1 CUADRANTE SIN
DEBILITAMIENTO DE
CAMPO CON
RECTIFICADOR
CONTROLADO

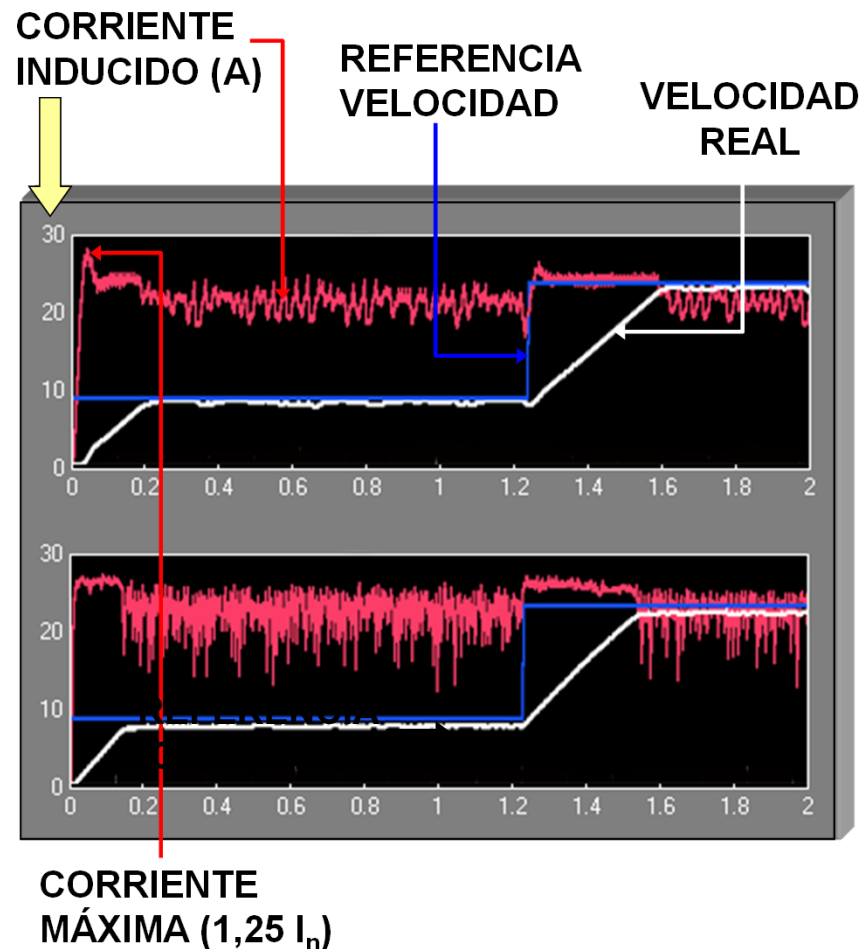
BUCLE DE
CONTROL EN
CASCADA CON 2
REGULADORES

PAR RESISTENTE
CONSTANTE DE
VALOR 95% T_n

REFERENCIA DE
VELOCIDAD CON
DOS ESCALONES:
ARRANQUE A 150
rpm Y ACELERA-
CIÓN A 450 rpm
PASADOS 1,2 s

LIMITADOR DEL REGULADOR DE
VELOCIDAD: CORRIENTE MÁXIMA LIMITADA
A 1,25 I_n

Análisis de la influencia de los parámetros del bucle de control en el accionamiento II



EFFECTO ACCIÓN PROPORCIONAL (K) DEL REGULADOR DE CORRIENTE

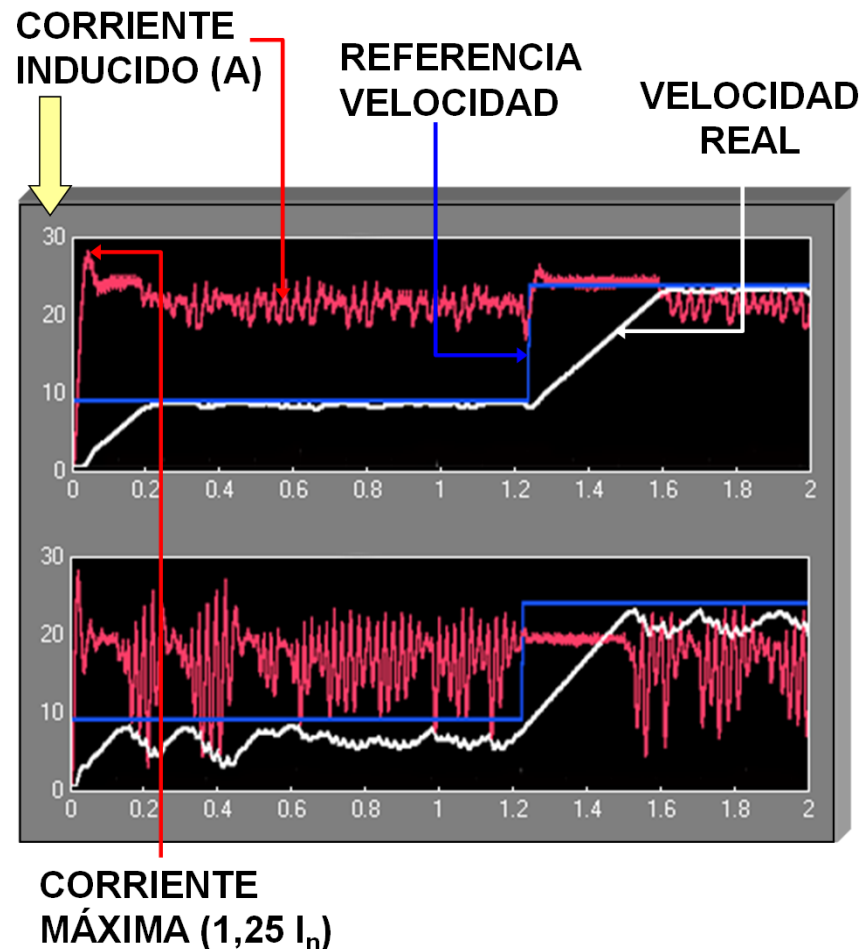
REGULADOR DE CORRIENTE AJUSTADO CORRECTAMENTE

$$I_{REF}(t) = K \cdot e_v(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e_v(t) \cdot dt$$

EXCESO DE K EN EL REGULADOR DE CORRIENTE

EL EXCESO DE K NO MEJORA LA DINÁMICA DEL SISTEMA Y AUMENTA LAS OSCILACIONES DE LA CORRIENTE DEL MOTOR

Análisis de la influencia de los parámetros del bucle de control en el accionamiento IV



EFFECTO ACCIÓN INTEGRAL (T_i) DEL REGULADOR DE CORRIENTE

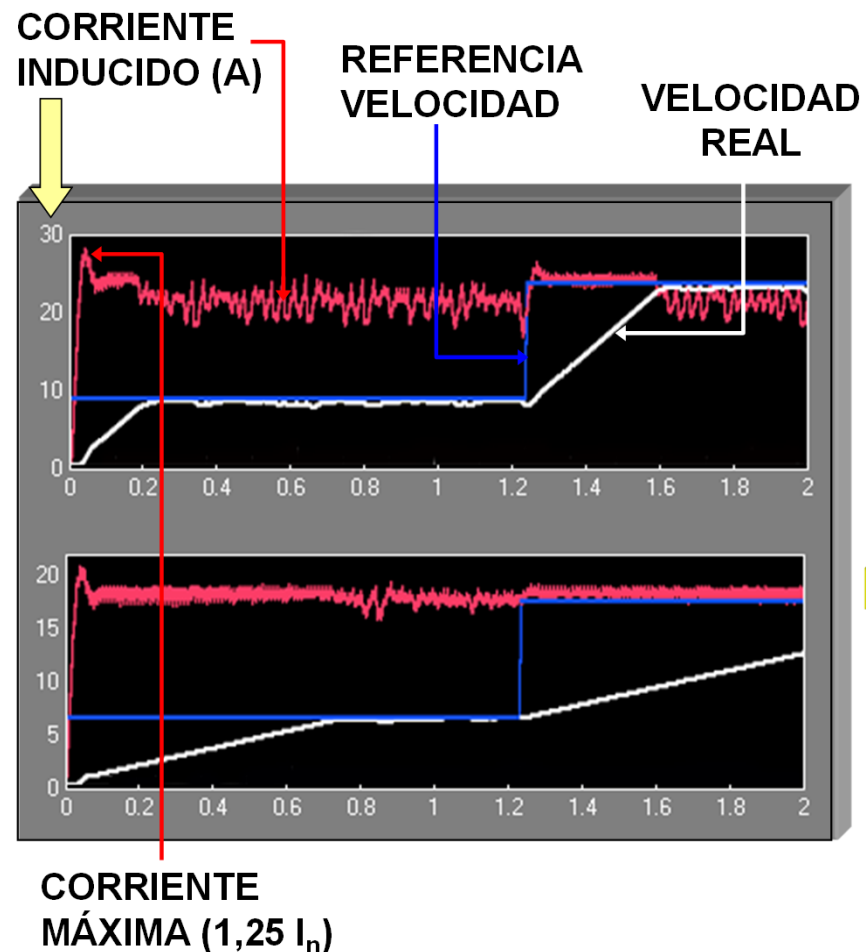
REGULADOR DE CORRIENTE AJUSTADO CORRECTAMENTE

$$I_{REF}(t) = K \cdot e_v(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e_v(t) \cdot dt$$

T_i DEMASIADO BAJA EN EL REGULADOR DE CORRIENTE

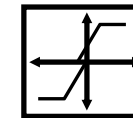
EL DEFECTO DE T_i EN EL REGULADOR DE CORRIENTE NO MEJORA LA DINÁMICA DEL SISTEMA LO VUELVE OSCILATORIO: OSCILACIONES DE VELOCIDAD, PAR Y CORRIENTE. EFECTO MÁS ACUSADO QUE EN EL REGULADOR DE VELOCIDAD

Análisis de la influencia de los parámetros del bucle de control en el accionamiento V



EFFECTO DEL LIMITADOR DE CORRIENTE DEL REGULADOR DE VELOCIDAD I

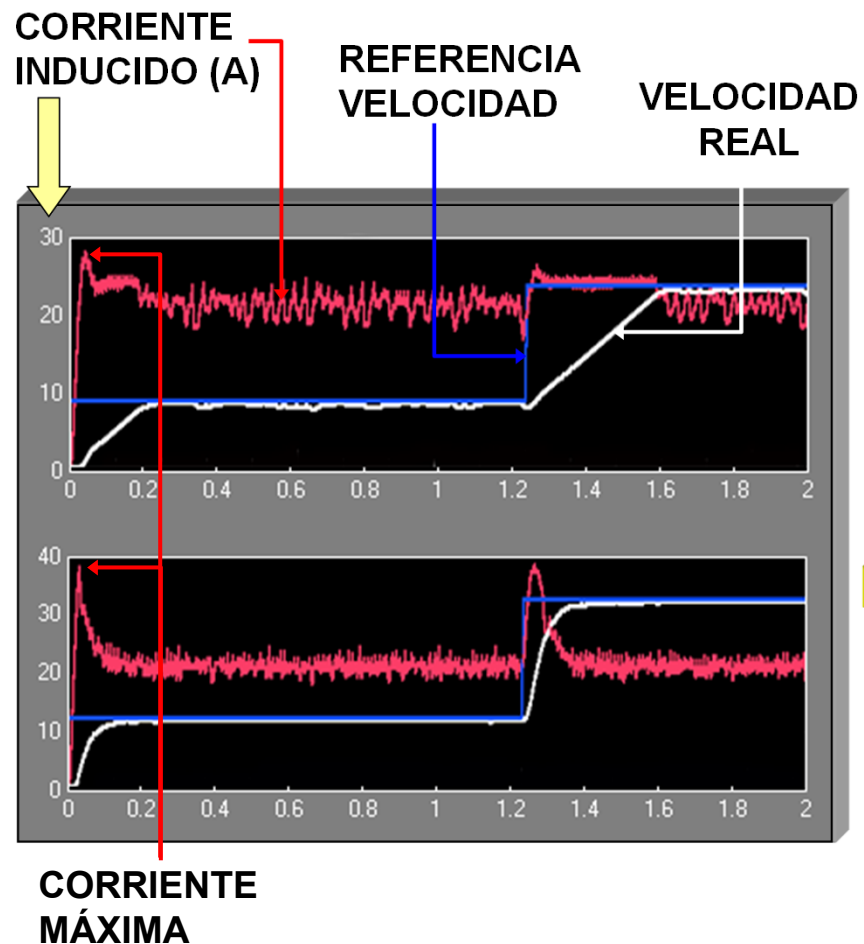
LIMITADOR DE CORRIENTE AJUSTADO A $1,25 I_n$



LIMITADOR DE CORRIENTE AJUSTADO $0,85 I_n$

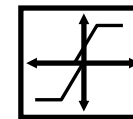
SI LA LIMITACIÓN DE CORRIENTE SE ESTABLECE DEMASIADO BAJA LA DINÁMICA DEL SISTEMA EMPEORA (SE TARDA MÁS EN ALCANZAR LA VELOCIDAD DE REFERENCIA). INCLUSO PUEDE QUE NO SE LLEGUE A ALCANZAR

Análisis de la influencia de los parámetros del bucle de control en el accionamiento VI



EFFECTO DEL LIMITADOR DE CORRIENTE DEL REGULADOR DE VELOCIDAD II

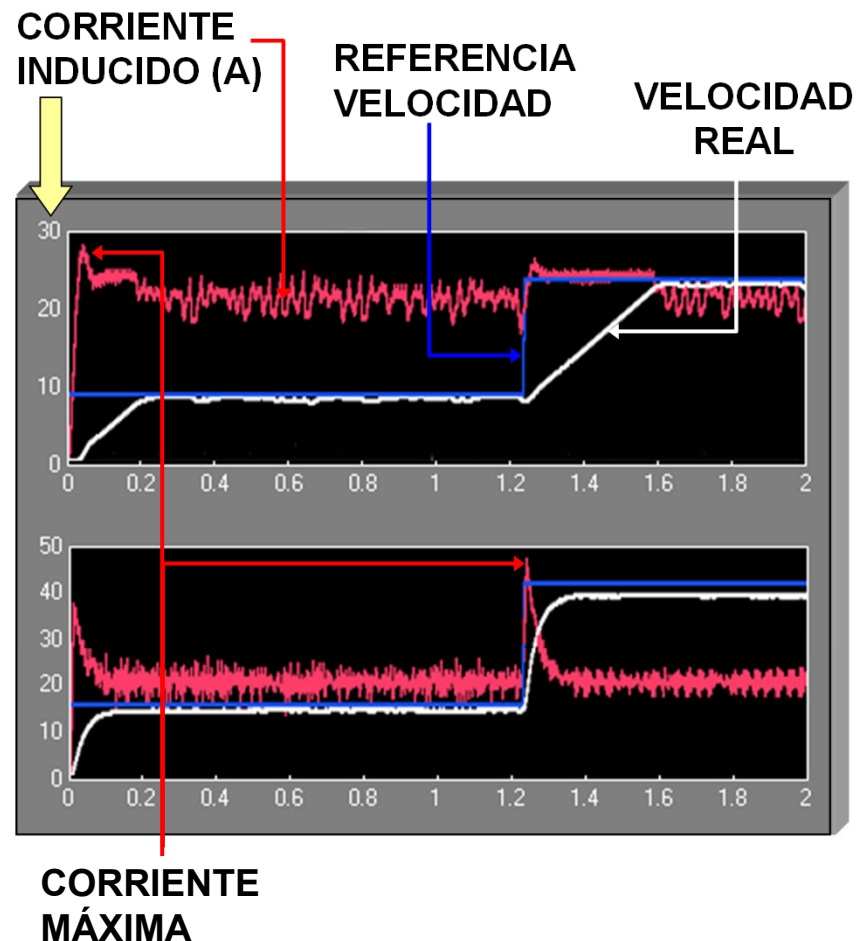
LIMITADOR DE CORRIENTE
AJUSTADO A $1,25 I_n$



LIMITADOR DE CORRIENTE
AJUSTADO $1,65 I_n$

SI SE REDUCE LA LIMITACIÓN DE CORRIENTE LA DINÁMICA DEL SISTEMA MEJORA (SE ALCANZA ANTES LA VELOCIDAD DE REFERENCIA). SIN EMBARGO, EL MOTOR HA DE SOPORTAR VALORES DE CORRIENTE INSTANTÁNEA MÁS ELEVADOS

Análisis de la influencia de los parámetros del bucle de control en el accionamiento VII



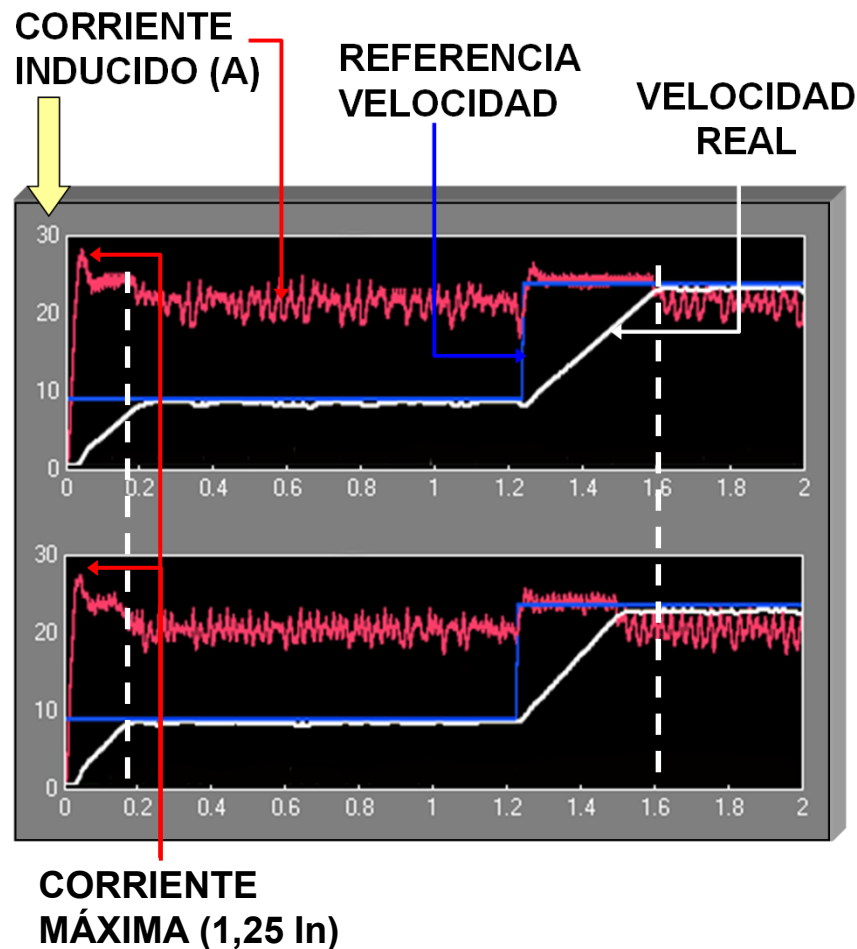
**BUCLE DE CONTROL SIN
REGULADOR DE CORRIENTE:
SÓLO SE INCLUYE REGULADOR
DE VELOCIDAD**

**BUCLE DE CONTROL EN
CASCADA CON DOS
REGULADORES**

**BUCLE DE CONTROL CON 1 SOLO
REGULADOR (VELOCIDAD)**

**UTILIZAR UN CONTROL SIN REGULADOR
DE CORRIENTE NO PERMITE ESTABLECER
UN LÍMITE PARA ESTA. LA CORRIENTE
LLEGA EN ESTE CASO A $2 I_n$. ADEMÁS, LA
DINÁMICA DEL SISTEMA NO MEJORA
RESPECTO DEL CASO ANTERIOR**

Análisis de la influencia de los parámetros del bucle de control en el accionamiento VIII



**SUSTITUCIÓN DEL RECTIFI-
CADOR CONTROLADO POR UN
TROCEADOR DE UN CUADRANTE**

**SIMULACIÓN CON
RECTIFICADOR CONTROLADO**

**SIMULACIÓN CON TROCEADOR
DE UN CUADRANTE**

**EL COMPORTAMIENTO EN AMBOS CASOS
ES PRÁCTICAMENTE IDÉNTICO. SÓLO SE
APRECIA QUE EL TROCEADOR PERMITE
OBTENER UNA RESPUESTA DINÁMICA
LIGERAMENTE MÁS RÁPIDA**

Análisis de la influencia de los parámetros del bucle de control en el accionamiento IX

CORRIENTE INDUCIDO (A)
TENSIÓN INDUCIDO
TIEMPO DE CONDUCCIÓN



FORMAS DE ONDA PARA LA SIMULACIÓN CON TROCEADOR DE 1 CUADRANTE

ARRANQUE DEL MOTOR DESDE VELOCIDAD 0

FUNCIONAMIENTO EN RÉGIMEN PERMANENTE CON $PAR=0,95T_n$

EL TROCEADOR TRABAJA CON FRECUENCIA CONSTANTE Y TIEMPO DE CONDUCCIÓN VARIABLE: SE OBSERVA COMO DURANTE EL ARRANQUE EL TIEMPO DE CONDUCCIÓN VA INCREMENTÁNDOSE