



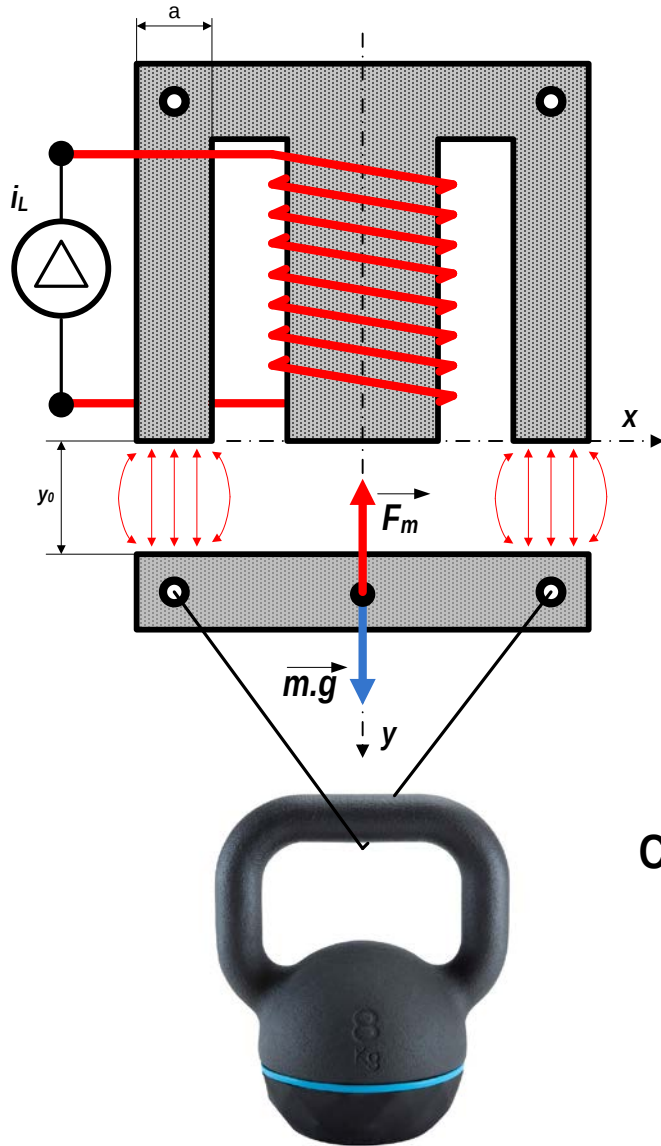
PROYECTO DE DISEÑO DE LEVITADOR MAGNÉTICO

OBJETIVOS:

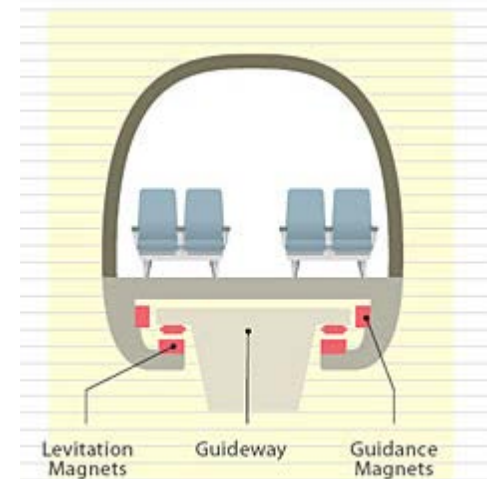
- ☐ ESTUDIO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SOLUCIÓN LINEAL PARA UN PROBLEMA DE CONTROL ALINEAL
- ☐ MODELIZACIÓN DE UN PROBLEMA FÍSICO (REVISIÓN)
- ☐ USO DE ESTRATEGIAS DE COMPENSACIÓN PARA UNA PLANTA INESTABLE
- ☐ IMPLEMENTACIÓN DE UN ESTIMADOR PARA LA VARIABLE A CONTROLAR
- ☐ REVISIÓN DE CONCEPTOS EN SISTEMAS DE TIEMPO CONTÍNUO
- ☐ IMPLEMENTACIÓN DE SOLUCIONES DE HARDWARE ANALÓGICO AL PROBLEMA DE CONTROL
- ☐ INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE COMPONENTES MAGNÉTICOS
- ☐ EJEMPLO DE PLANTA DE CONTROL DE POTENCIA



CASO DE ESTUDIO:



CÓMO DETERMINAR Y
CONTROLAR LA FUERZA
MAGNÉTICA DE
SUSTENTACIÓN?



APLICACIÓN EN TRACCIÓN



MODELO CONCEPTUAL DE CONTROL PROPUESTO

DESAFÍOS DEL PROBLEMA:

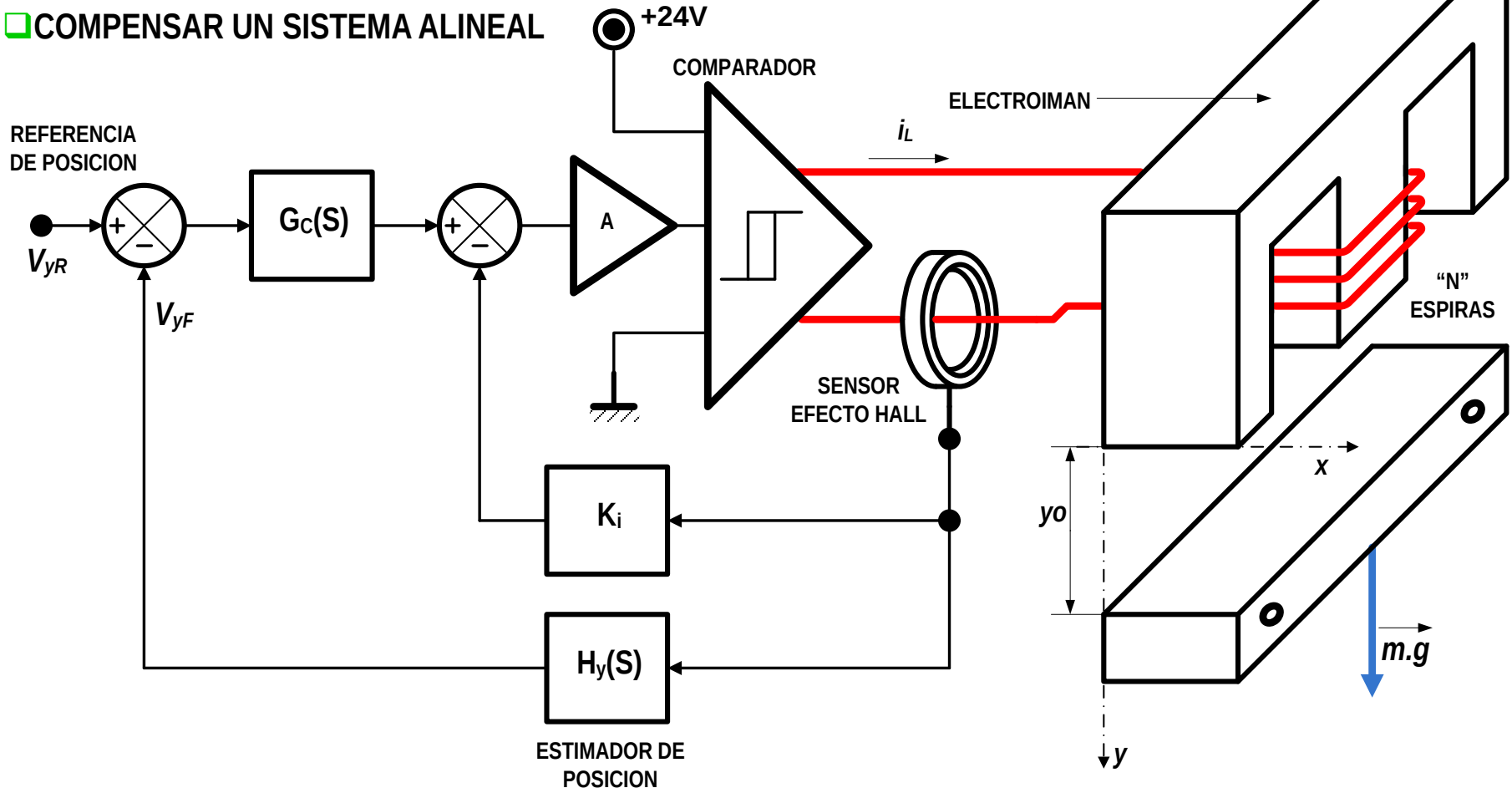
- ❑ DISEÑAR Y CONSTRUIR EL ELECTROIMÁN
- ❑ CONSTRUIR UNA FUENTE DE CORRIENTE DE POTENCIA
- ❑ IDEAR Y CONSTRUIR UN ESTIMADOR DE POSICIÓN
- ❑ COMPENSAR UN SISTEMA ALINEAL

ESPECIFICACIONES:

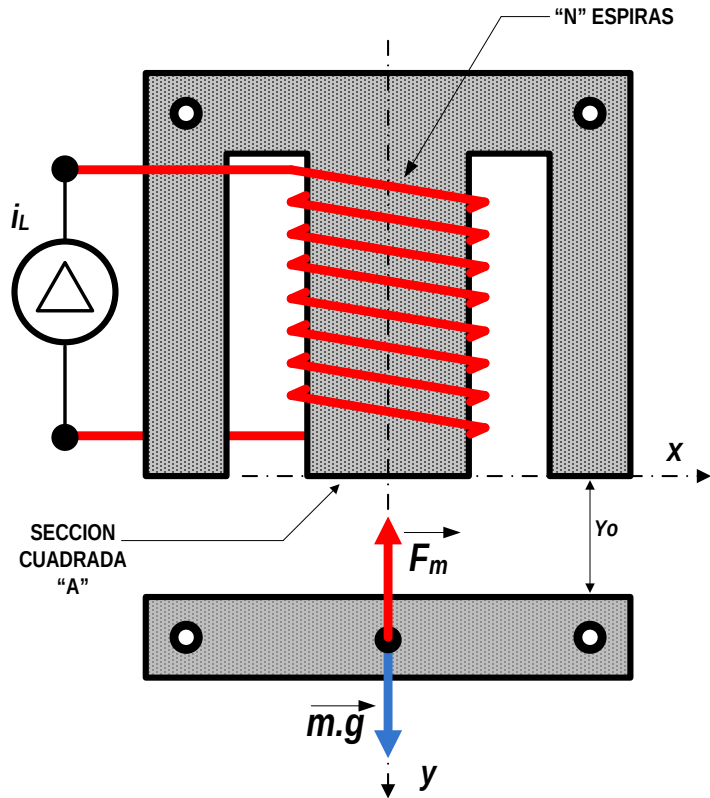
$$10\text{kg} < m < 80\text{kg}$$

$$Y_0 = 2\text{mm}$$

$$1\text{mm} < y < 3\text{mm}$$



MODELO FÍSICO SIMPLIFICADO DEL PROBLEMA:



- ❑ VARIABLE DE ENTRADA DE LA PLANTA= i (CORRIENTE)
- ❑ VARIABLE DE SALIDA DEL SISTEMA= y (POSICIÓN)
- ❑ SISTEMA ALINEAL:
 - ❑ RESPECTO DE LA ACCIÓN DE CONTROL
 - ❑ RESPECTO DEL PUNTO DE OPERACIÓN

OBJETIVO DEL SISTEMA DE CONTROL:
ACTUAR SOBRE LA CORRIENTE i
PARA OBTENER UNA POSICIÓN $y=y_0$
EN UN RANGO DE m

EQUILIBRIO EN EL PUNTO DE OPERACIÓN:

$$\mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A \cdot I_0^2}{4 \cdot Y_0^2} = m \cdot g$$

INDUCTANCIA:

$$L(y) \approx \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{2 \cdot y}$$

ENERGÍA ALMACENADA:

$$E(L, i) = \frac{1}{2} \cdot L(y) \cdot i^2$$

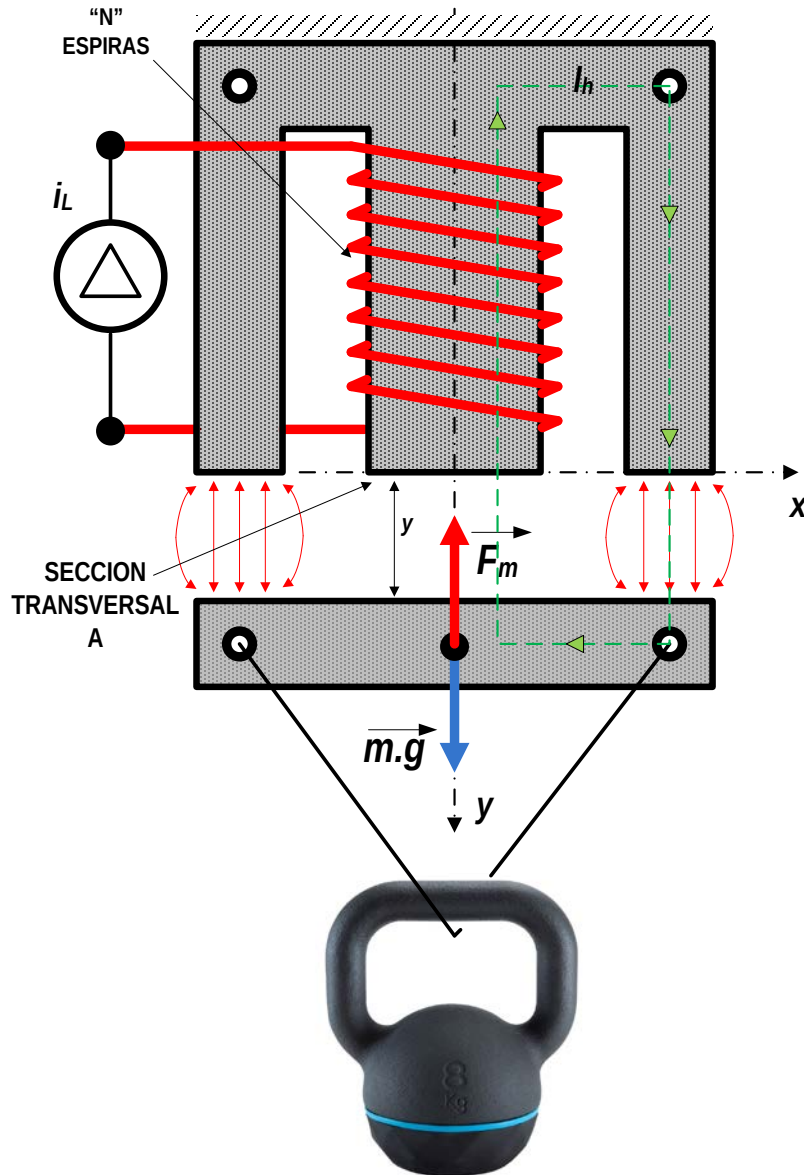
FUERZA EQUIVALENTE: $|F_M| = \left| \frac{\partial E(L, i)}{\partial y} \right| \approx \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A \cdot i^2}{4 \cdot y^2}$

$$\sum F = 0 \text{ NECESARIO PERO NO SUFICIENTE}$$

TRABAJO DE LA FUERZA DE SUSTENTACIÓN ?



CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROIMÁN:



- USO DE LAMINACIÓN NORMALIZADA (SIN DESPERDICIO)
- $m < 80\text{kg}$
- $1\text{mm} < Y_0 < 3\text{mm}$; $Y_0 = 2\text{mm}$ (nominal)
- GAP DE AIRE VARIABLE:

ESTIMACIÓN SIMPLIFICADA DEL VOLUMEN DEL INDUCTOR:

- FUERZA MAGNÉTICA
- MÁXIMA DENSIDAD DE FLUJO

Igualando el peso con la fuerza magnética :

$$|F_M| \approx \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{4} \cdot \left(\frac{i_L}{y}\right)^2 \rightarrow N \cdot i_L = y \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot m \cdot g}{\mu_0 \cdot A}} \quad \text{Eq.(1):}$$

Considerando la inducción en el núcleo:

$$L \cdot i_{Lmx} = N \cdot A \cdot B_{mx} \quad \text{siendo:} \quad L = L(y) \approx \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{2 \cdot y}$$

$$\text{Con lo que:} \quad B_{mx} = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot i_{Lmx}}{2 \cdot y} \quad \text{Eq.(2):}$$

$$\text{Sustituyendo (1) en (2):} \quad B_{mx} = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot m \cdot g}{A}}$$

$$\text{Resultando:} \quad A \geq \frac{\mu_0 \cdot m \cdot g}{B_{MX}^2}$$

Para las condiciones del problema, con $B_{MAX} = 0.7[\text{T}] \Rightarrow A > 20\text{cm}^2$
LAMINACIÓN 600



CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROIMÁN:

- ☐ LAMINACIÓN ELEGIDA= # 600 sección cuadrada
- ☐ a = 50mm; apilado= 50mm
- ☐ A ~ 25cm²
- ☐ A_w= 0.75 a² = Area de ventana= 25cm²
- ☐ Factor de ocupación de ventana: k_w~0.6 aproximado
- ☐ MLT (Long. Espira Media)= 6.a= 350mm

Densidad de corriente resultante: $J = \frac{N \cdot i_{Lmx}}{k_W \cdot A_W} \cong 2.66 [\frac{A}{mm^2}]$

Conviene reducir N para obtener un L menor y mejorar la respuesta dinámica, operando con corrientes moderadas

Adopto N= 150 : $L = L(y) \approx \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{2 \cdot y} A \leq 26.5mH$

Alambre utilizado: 2.5mm Φ

150 ESPIRAS
ALAMBRE ESMALTADO
 $\Phi=2.5\text{mm}$ 6 CAPAS.
25 espiras/capa

$$R_{Cu} = \frac{2 \cdot \rho \cdot N \cdot MLT}{\pi \cdot \phi^2} \cong 0.1 \Omega$$

Pérdidas por efecto Joule:

$P_{MAX}=40W @ i_{MAX}=20A$

CARRETE #600



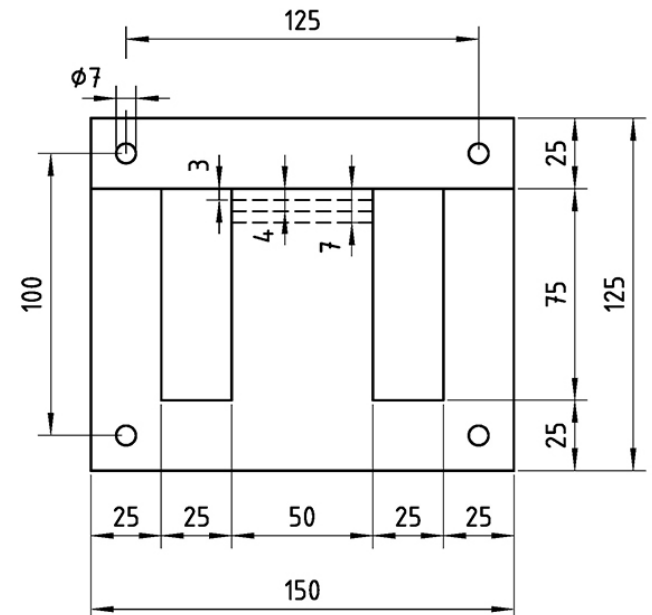
Asumiendo equilibrio $\Sigma F=0$, siendo: $N \cdot i_L = y_0 \sqrt{\frac{4 \cdot m \cdot g}{\mu_0 \cdot A}}$

Resultando el peor caso (más exigente con $y_0 = 3mm$ y $m = 80kg$)

$$N.i_{LMAX} = 3000 [A]$$

$$\boxed{N} \begin{matrix} \updownarrow \\ \text{red} \end{matrix} \mathbf{X} \begin{matrix} \updownarrow \\ \text{red} \end{matrix} \boxed{i_{LMAX}} = \mathbf{C}$$

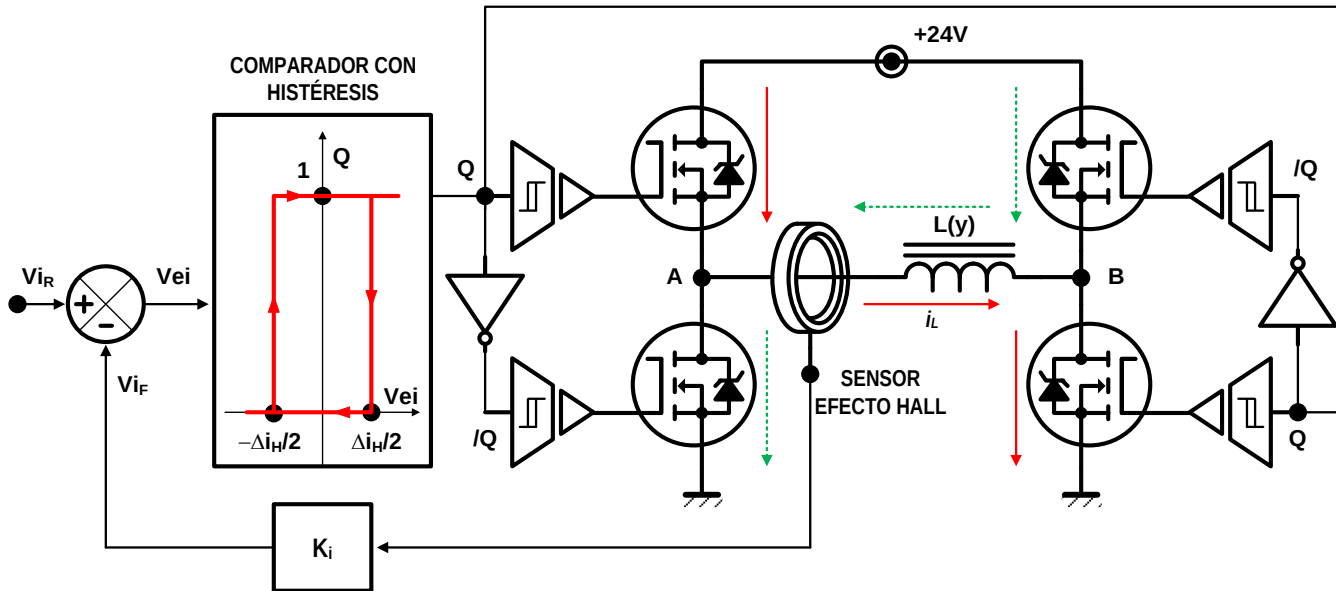
$$N = 150 \rightarrow i_{MAX} \cong 20[A]$$



LAMINACIÓN NORMALIZADA # 600



CONTROLADOR DE CORRIENTE ELEMENTAL:



Según el modelo simplificado:

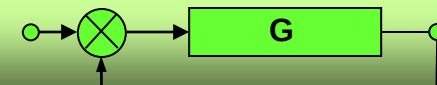
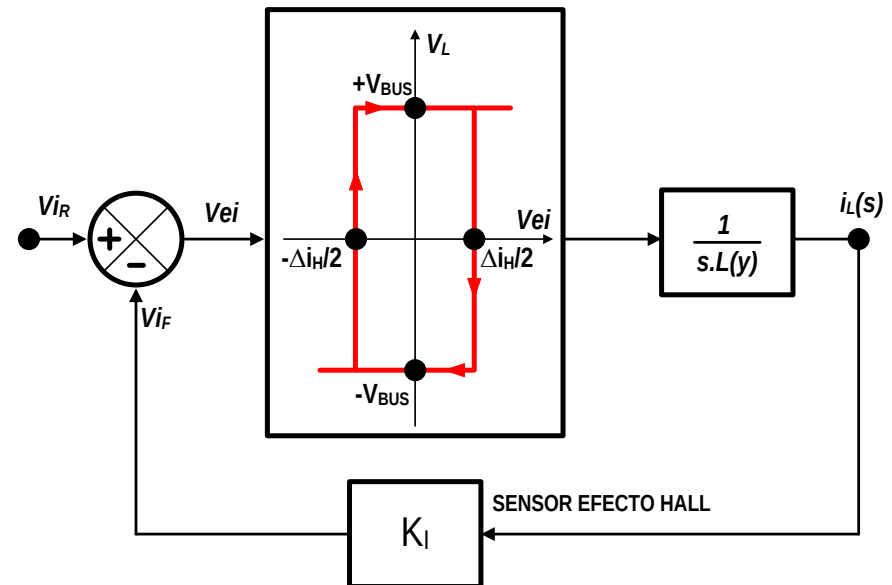
$$L(y) \approx \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{2 \cdot y}$$

$$L(y) \approx 8.8\text{mH} \dots 27\text{mH}$$

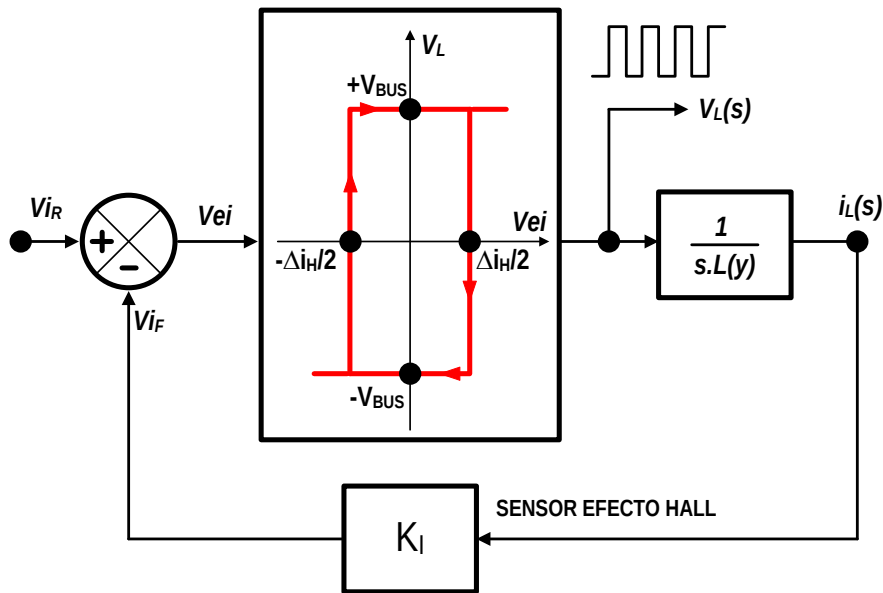
$$1\text{mm} < y_0 < 3\text{mm}$$

MODELO DE CONTROL

- ❑ CONTROLADOR NO-LINEAL
- ❑ CICLO LÍMITE ENTORNO DEL PUNTO DE OPERACIÓN
- ❑ DINÁMICA DE PRIMER ORDEN
- ❑ OPERACIÓN EN CONMUTACIÓN
- ❑ GRAN EFICIENCIA EN ALTA CORRIENTE i_L
- ❑ FRECUENCIA F_{sw} VARIABLE CON $L(y)$
 - EQUILIBRIO @80kg: 1mm -----6.7[A]
 - EQUILIBRIO @80kg: 3mm -----20 [A]



CONTROLADOR DE CORRIENTE ELEMENTAL (CONT.):

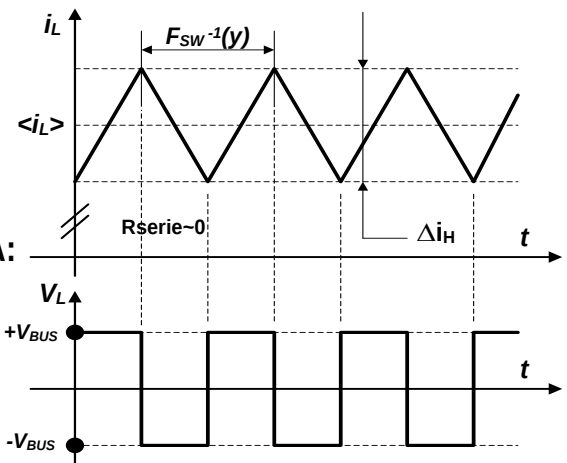


EL SISTEMA ALINEAL DE CONTROL ES UN OSCILADOR DE FRECUENCIA DEPENDIENTE DE $L(y)$. CONVIENE USAR SU FRECUENCIA COMO ESTIMADOR DE LA DISTANCIA “y” ?

DEMÉRITOS DE F_{SW} COMO ESTIMADOR DE “y”

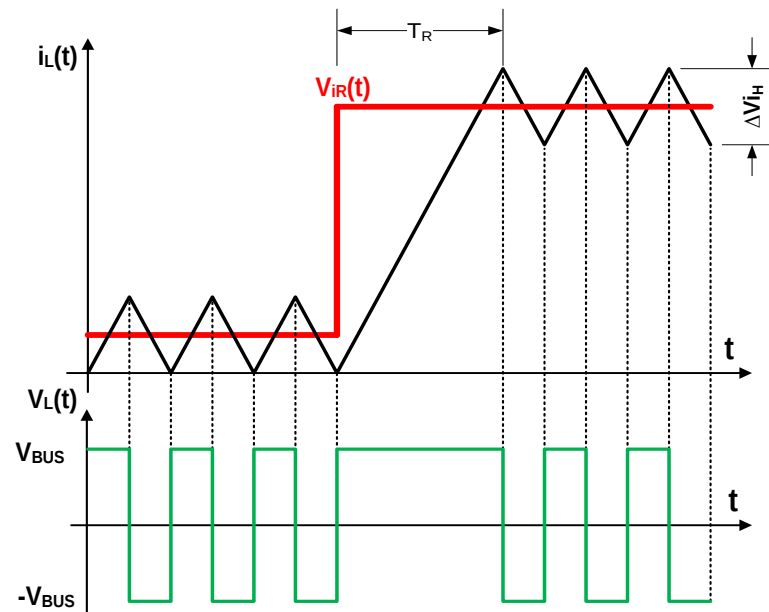
- ☐ PÉRDIDA DE LA ESTIMA EN EL INICIO
- ☐ RESPUESTA DINÁMICA LIGADA AL VALOR DE INDUCTANCIA
- ☐ PÉRDIDA TRANSITORIA DE REALIMENTACIÓN AL PERTURBAR LA MASA (CORRIENTE) O AL MODIFICAR SETPOINT DE POSICIÓN “y”

FORMAS DE ONDA:

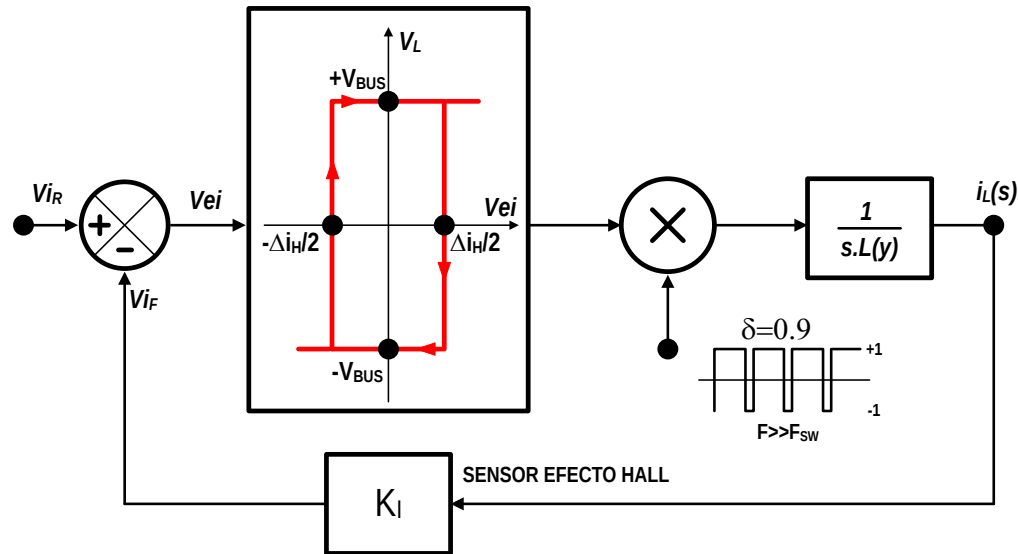


FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN

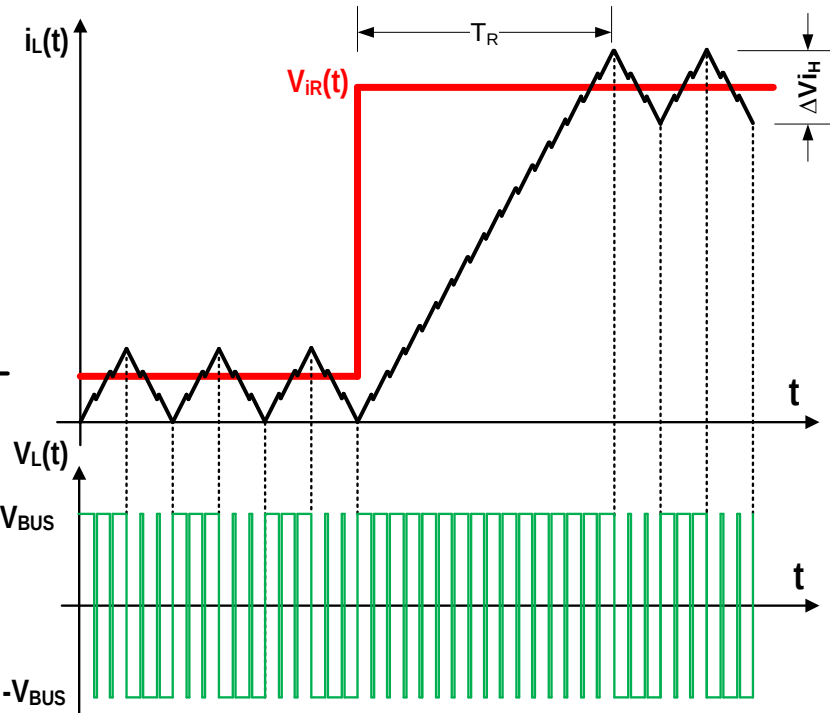
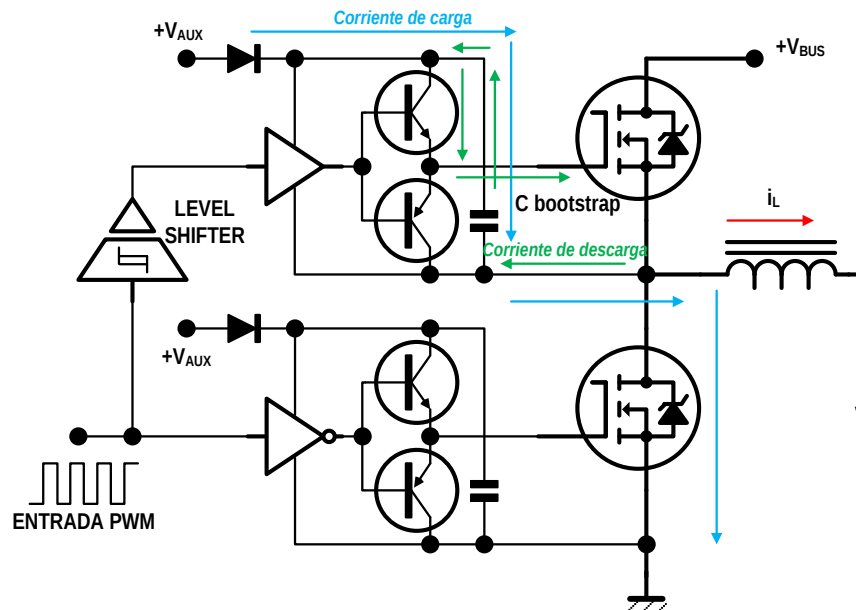
$$F_{SW} = \frac{V_{BUS}}{2 \cdot L(y) \cdot \Delta i_H} \approx \frac{V_{BUS}}{\Delta i_H \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot y}$$



MODIFICACIÓN DEL CONTROLADOR DE CORRIENTE:

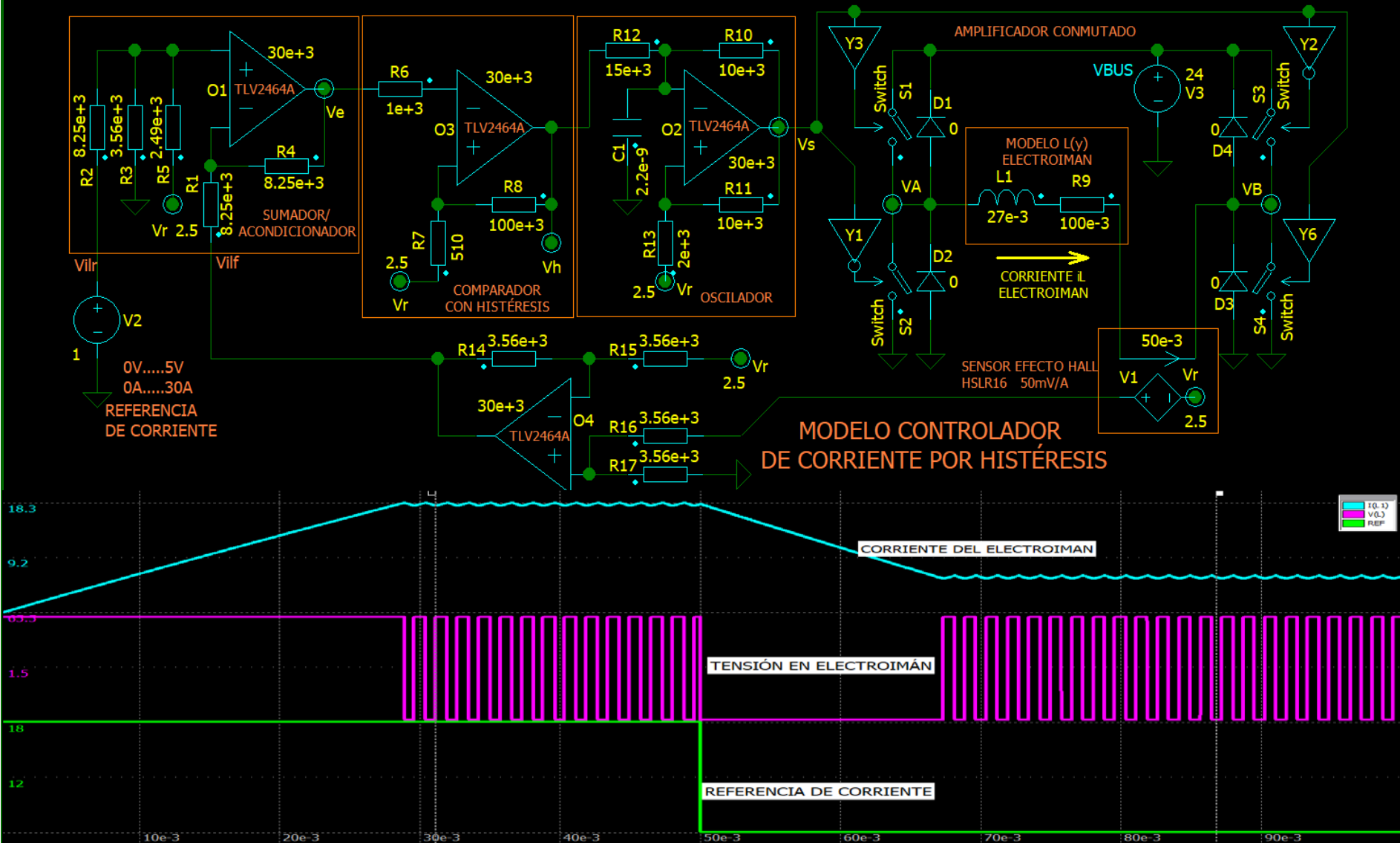


SE AGREGA UNA FUNCIÓN DE CONMUTACIÓN INDEPENDIENTE, DE FRECUENCIA $F \gg F_{SW}$ PARA EVITAR LA INTERRUPCIÓN DE LA CONMUTACIÓN DURANTE LOS TRANSITORIOS Y QUE PRÁCTICAMENTE NO ALTERA EL FUNCIONAMIENTO PERO QUE PERMITE LA OPERACIÓN DEL DRIVER FLOTANTE.

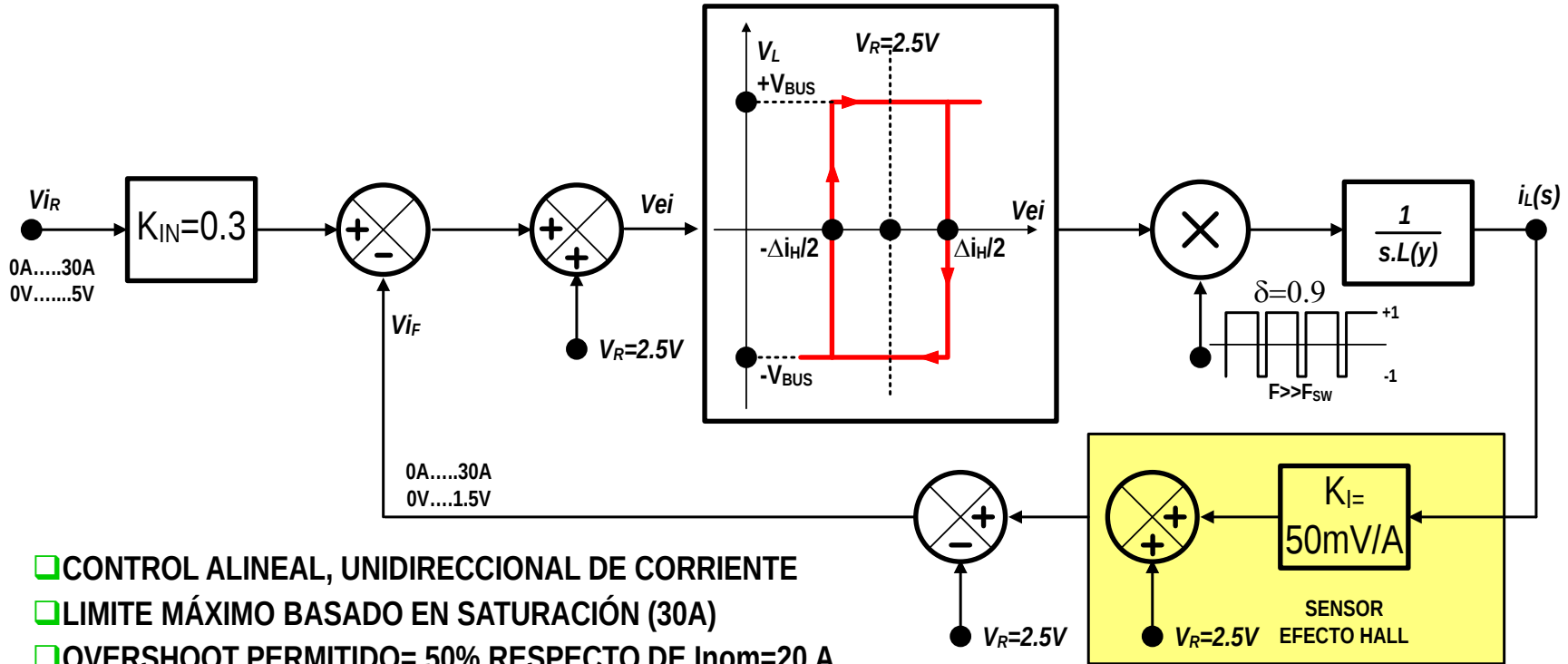


IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE CORRIENTE:

NL5 2.4 (C)2018

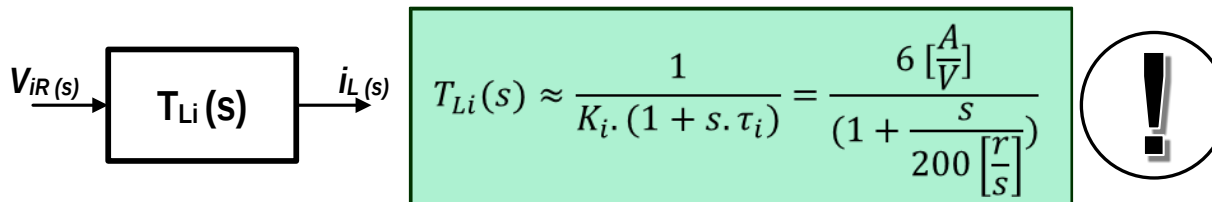


MODELO DEL CONTROLADOR DE CORRIENTE IMPLEMENTADO:



- ❑ CONTROL ALINEAL, UNIDIRECCIONAL DE CORRIENTE
- ❑ LIMITE MÁXIMO BASADO EN SATURACIÓN (30A)
- ❑ OVERSHOOT PERMITIDO= 50% RESPECTO DE $I_{nom}=20\text{ A}$
- ❑ RESPUESTA DINÁMICA LIMITADA POR SLEW RATE
- ❑ ANCHO DE BANDA DEPENDIENTE DE VALOR DE INDUCTANCIA $L(y)$

$$\Delta i_L \cdot \omega_{BW} = \frac{di_L}{dt} \leq \frac{V_{BUS}}{L(y)} \rightarrow \omega_{BW} \approx \frac{V_{BUS}}{\Delta i_L \cdot L(y)} \approx 200 \left[\frac{r}{s} \right]$$



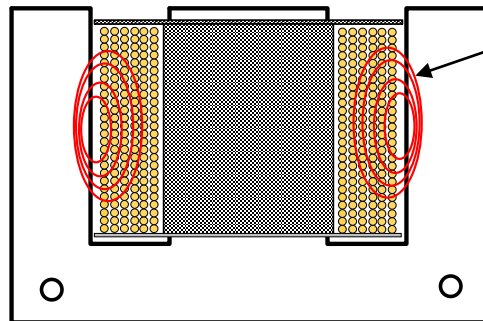
Sensor efecto Hall
HSLR16
50mV/A



ENSAYO DEL ELECTROIMÁN

Se ensaya el electroimán con el amplificador de corriente y se analiza la forma de onda obtenida para diferentes gaps de aire "y"

Aproximando: $L(y) \cong \Delta V_L \cdot \frac{\Delta t}{\Delta i_L}$



Líneas de campo H que no atraviesan el gap "y"

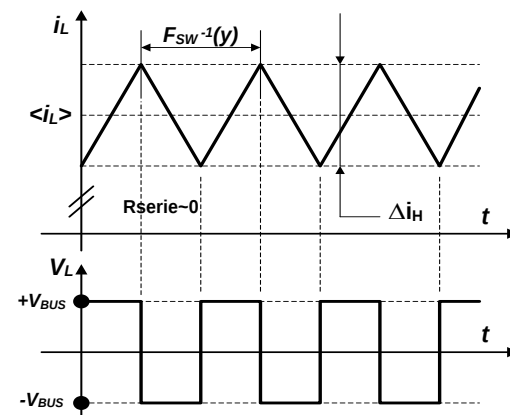
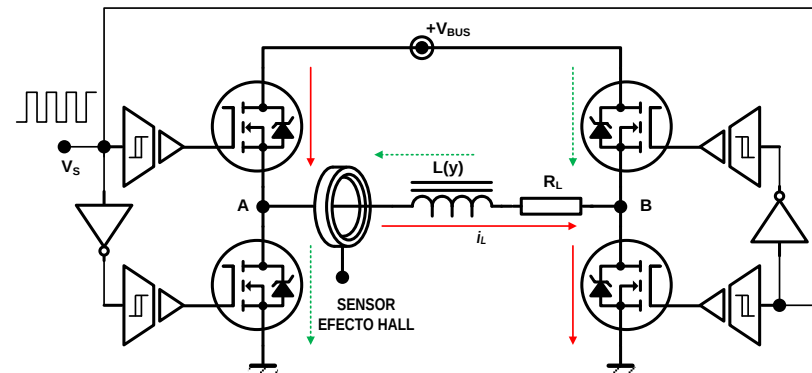
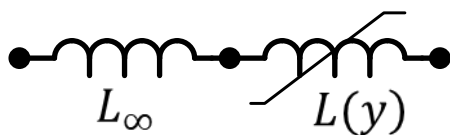
VALORES MEDIDOS:

y [mm]	Lmed(y) [mH]
1	39.9
1.7	28.2
3	20.0
4	15.7
∞	9.0

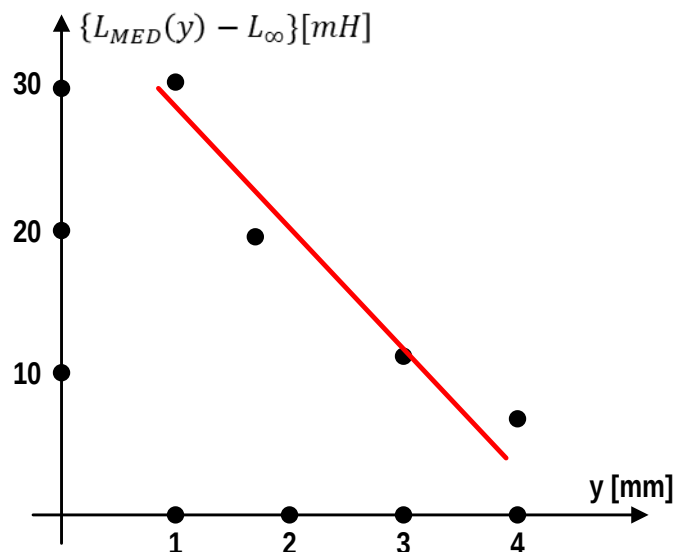
Modelo equivalente:

$$L_{EF} \cong L_{\infty} + L(y)$$

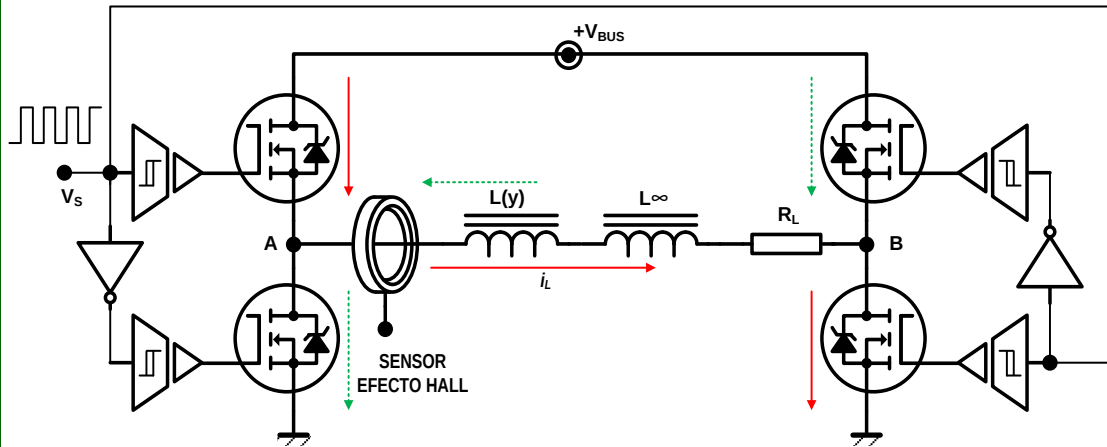
$$L_{\infty} \cong 9.0mH$$



Resulta un inductor función del gap "y" que responde al modelo inicial L(y), pero con un inductor adicional en serie.



IMPLEMENTACIÓN DE UN ESTIMADOR DE DISTANCIA “Y”:



Se observa de la medición de corriente, que:

$$\pm V_{BUS} - L(y) \cdot \left| \frac{di_L}{dt} \right| - L_{\infty} \cdot \left| \frac{di_L}{dt} \right| - R_L \cdot i_L = 0$$

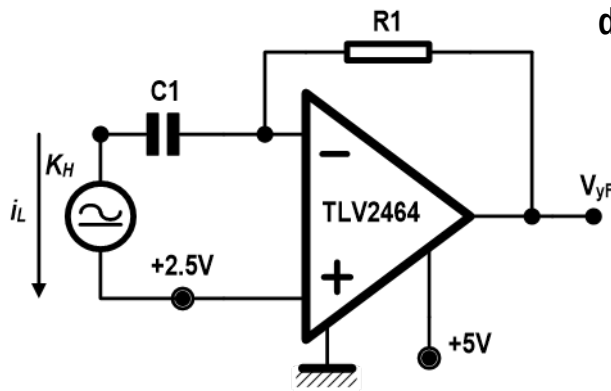
Siendo además: $L(y) \approx \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{2 \cdot y}$

Si la resistencia del inductor es despreciable: $V_{BUS} \gg i_L \cdot R_L$

Con lo cual: $\left| \frac{di_L}{dt} \right| \cong \frac{V_{BUS}}{L_{EF}} \cong \frac{V_{BUS}}{L(y) + L_{\infty}}$

Sustituyendo $L(y)$: $\left| \frac{di_L}{dt} \right| \cong \frac{2 \cdot V_{BUS} \cdot y}{2 \cdot y \cdot L_{\infty} + \mu_0 \cdot N^2 \cdot A}$

Mediante un derivador elemental:



Si k_H es la constante del sensor hall:

...expresión $f(y)$ linealizable entorno de y_0 por desarrollo en serie de Taylor como: $f(y) \sim f(y_0) + f'(y_0) \cdot (y - y_0)$.

$$|v_{yF}| \cong k_H \cdot \left| \frac{di_L}{dt} \right| \cdot C_1 \cdot R_1 = \frac{2 \cdot V_{BUS} \cdot k_H \cdot C_1 \cdot R_1 \cdot y}{2 \cdot y \cdot L_{\infty} + \mu_0 \cdot N^2 \cdot A}$$

Para evitar la saturación del estimador implementado: $|v_{yF}| \leq 2.5V$

Lo que significa en el peor caso que:

$$C_1 \cdot R_1 \leq \frac{2.5[V] \cdot L_{MIN}}{V_{BUS} \cdot k_H} \rightarrow C_1 \cdot R_1 \leq 32.7mS$$

Habiéndose tomado $L_{MIN} = 15.7mH$ correspondiente a $y=4mm$ medido

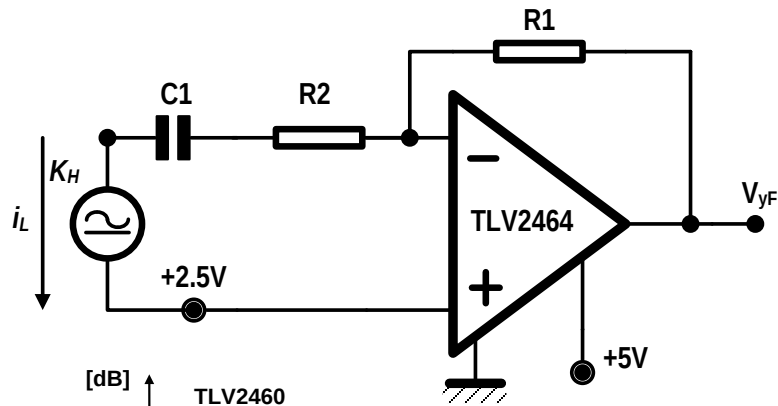
Se adopta:

$$C_1 \cdot R_1 = 20mS$$



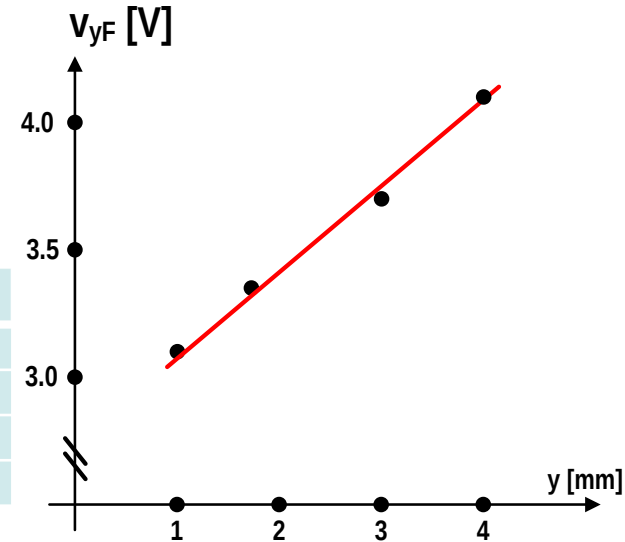
IMPLEMENTACIÓN DE UN ESTIMADOR DE DISTANCIA “Y”:

DERIVADOR COMPENSADO:



RESPUESTA DEL CIRCUITO DERIVADOR:

$y[mm]$	$L_{MED}[mH]$	$ v_{yF} [V]$
1	39.9	3.10
1.7	28.2	3.35
3	20.0	3.70
4	15.7	4.10



Hallando la recta por encaje mínimo cuadrático:

$$|v_{yF}| \cong 2.7931 [V] + 0.3233 \left[\frac{V}{mm} \right] \cdot y[mm]$$

...y cancelando el offset de la respuesta:

$$\frac{|v_{yF}|}{y} \cong 0.32 [V/mm]$$

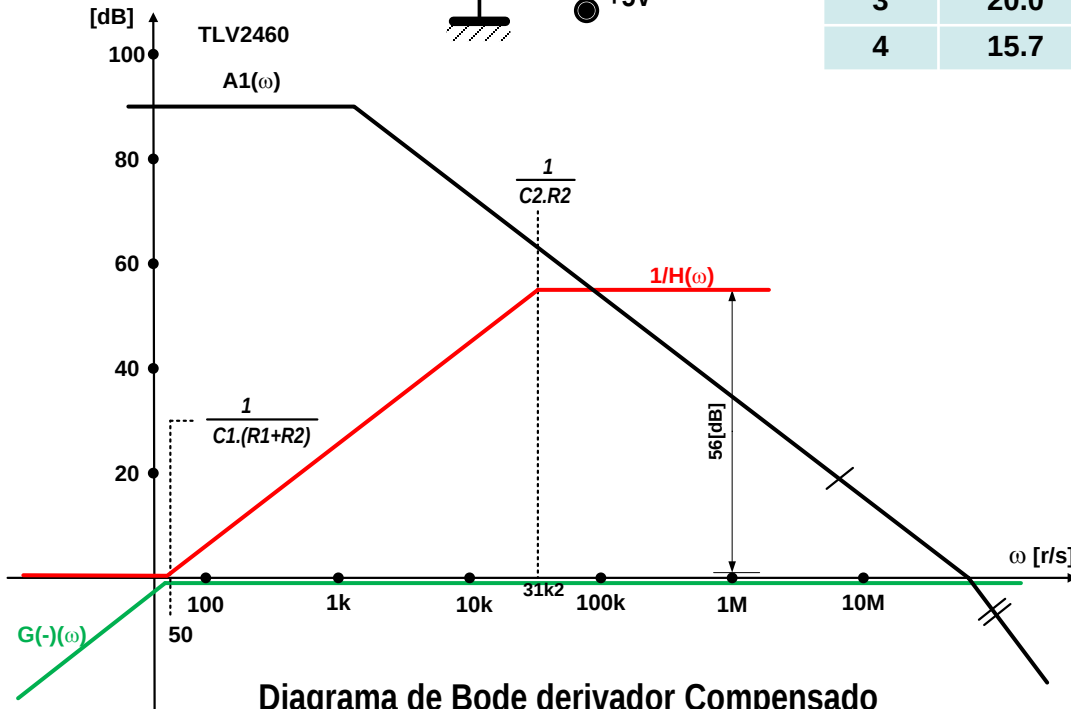
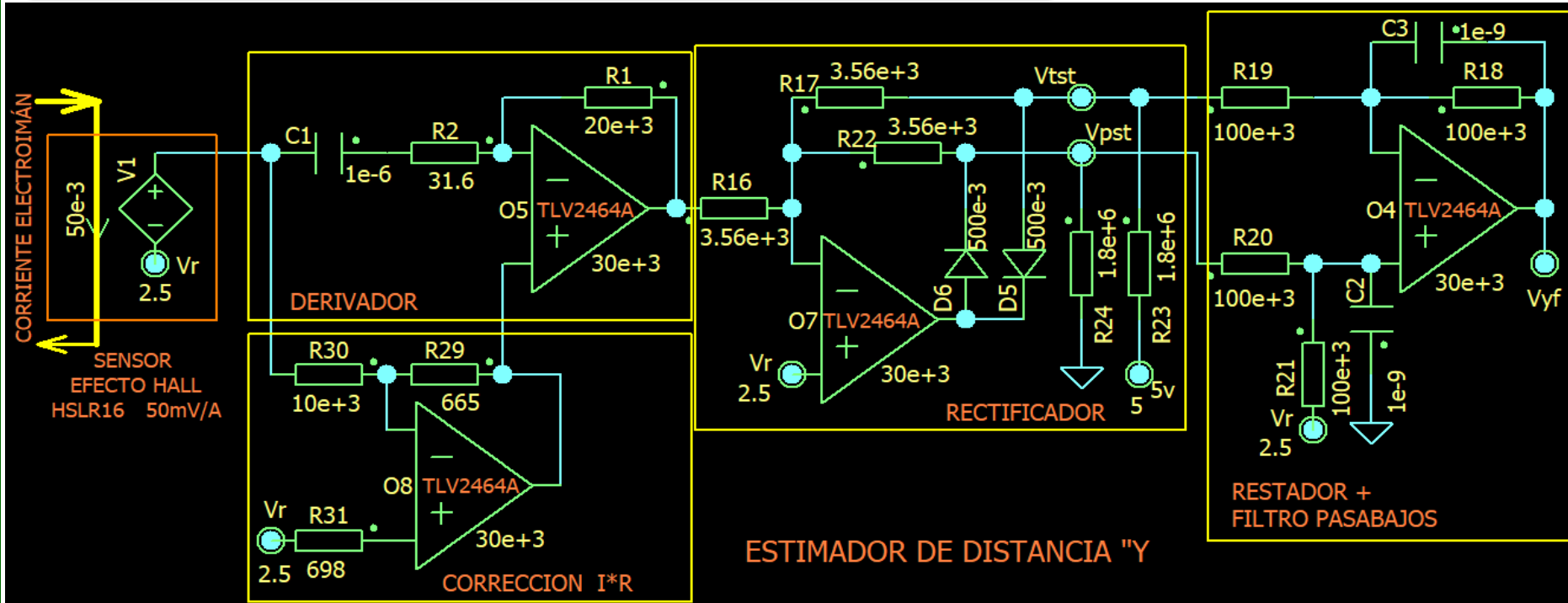


Diagrama de Bode derivador Compensado

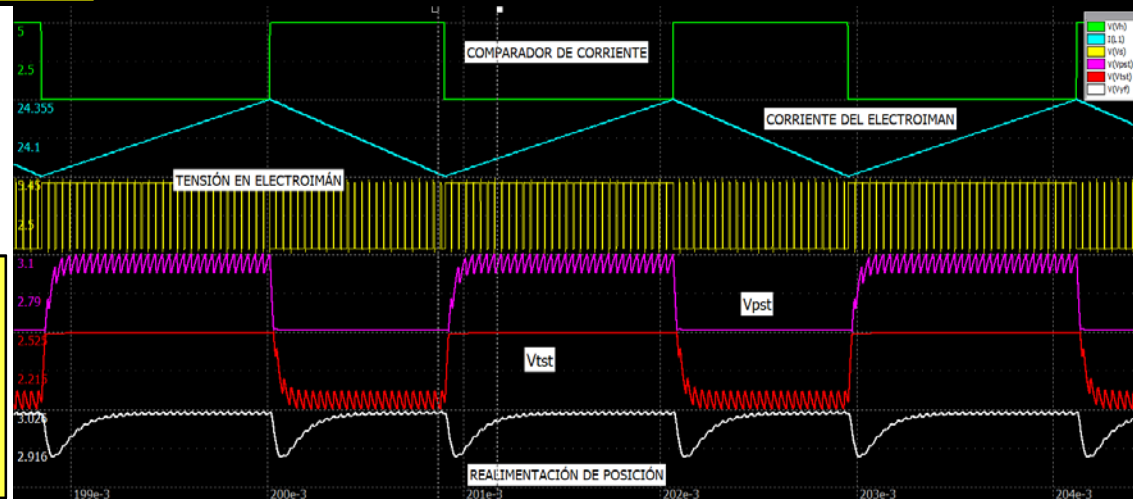


IMPLEMENTACIÓN DE UN ESTIMADOR DE DISTANCIA "Y":



- ❑ FILTRADO ADICIONAL (BW ~ 10krad/s)
- ❑ CORRECCIÓN I*R ELECTROIMÁN
- ❑ GANANCIA DE MEDICIÓN: 0.32V/mm
- ❑ RIPPLE DE MEDIDA ~ 130mVpp
- ❑ 1mm.....3mm => 3.12V.....3.76V

$$H_Y(s) = \frac{|v_{yF}|(s)}{y} \cong \frac{320 \left[\frac{V}{m} \right]}{\left(1 + \frac{s}{10 \left[\frac{krad}{s} \right]} \right)}$$



MODELO DE PLANTA A CONTROLAR:

$$\sum F = m \cdot \ddot{y} = m \cdot g - F_M \quad \text{Siendo:} \quad |F_M| \approx \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{4} \cdot \left(\frac{i_L}{y}\right)^2 \quad \text{Con lo cual:}$$

$$m \cdot \ddot{y} - m \cdot g + \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{4} \cdot \left(\frac{i_L}{y}\right)^2 = 0$$

Donde i_L es la acción de control y el punto de equilibrio cumple: $\rightarrow$

$$\left| \frac{i_{L0}}{y_0} \right| = \sqrt{\frac{4 \cdot m \cdot g}{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}}$$

Linealizando entorno del punto de equilibrio $\{i_{L0}; y_0\}$ por Taylor: $\left(\frac{i_L}{y}\right)^2 \approx \left(\frac{i_{L0}}{y_0}\right)^2 \left(1 + \frac{2 \cdot i_L}{i_{L0}} - \frac{2 \cdot y}{y_0}\right)$

$$\ddot{y} - 2g \cdot \left(\frac{y}{y_0}\right) + 2g \cdot \left(\frac{i_L}{i_{L0}}\right) \cong 0$$

DINÁMICA DE LA PLANTA LINEALIZADA

- ❑ PARA $i_L = \text{cte}$. LA EC. CARACTERÍSTICA TIENE UN CERO EN RHP Y OTRO EN LHP (SILLA DE MONTAR)
- ❑ AL LINEALIZAR SE IGNORA LA DEPENDENCIA DE LA DINÁMICA CON EL PUNTO DE EQUILIBRIO

Aplicando la transformación de Laplace a la ecuación diferencial:

Resultando una expresión para la transferencia de la planta en el punto de operación: $\mathcal{L} \rightarrow$

$$G_P(s) = \frac{Y(s)}{I_L(s)} \cong \frac{y_0}{i_{L0}} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{y_0}{2g} \cdot s^2\right)} = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{4 \cdot m \cdot g}} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{y_0}{2g} \cdot s^2\right)}$$

Notando que los polos y la ganancia dependen del punto de operación m, y_0

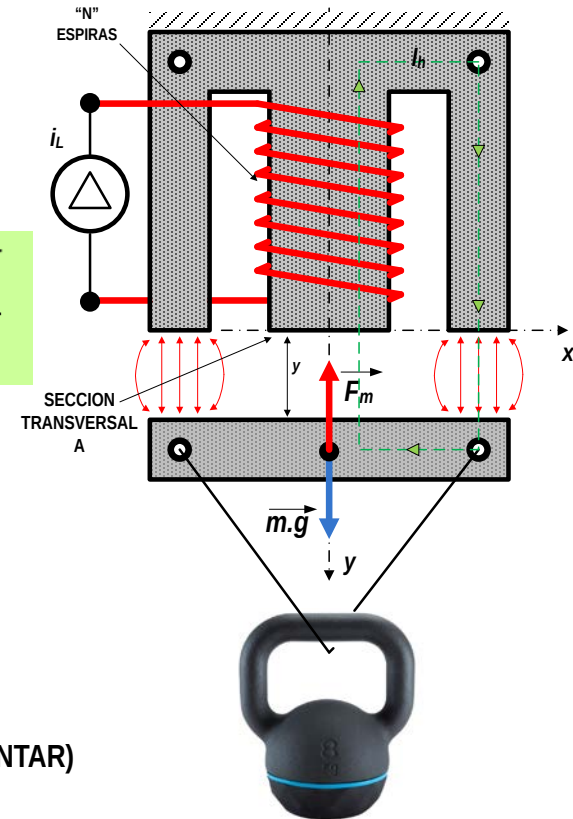
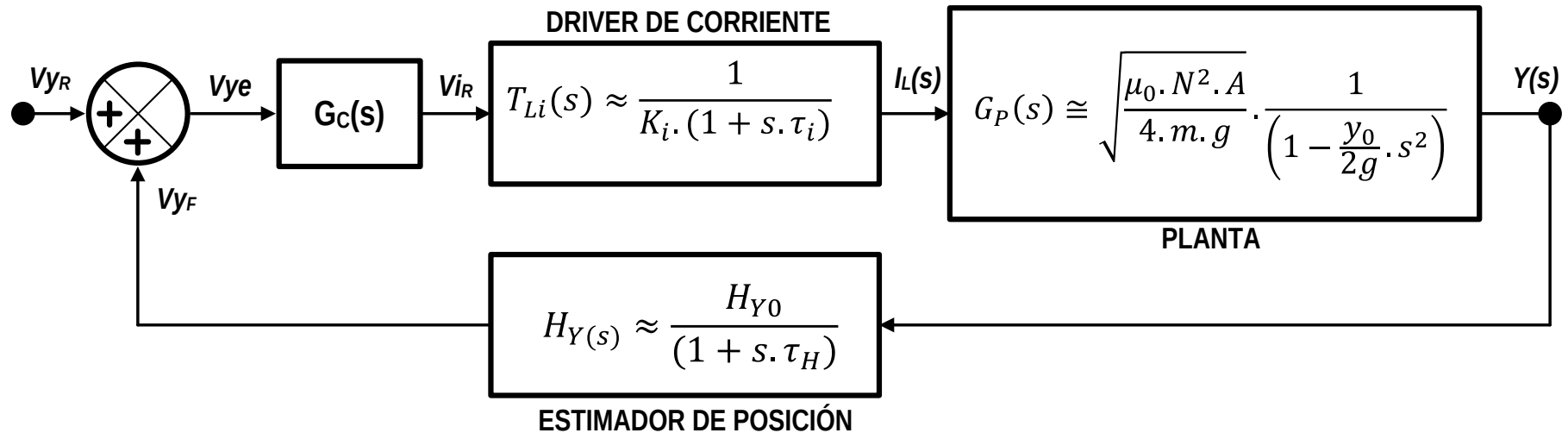


DIAGRAMA EN BLOQUES DEL SISTEMA LINEALIZADO A CONTROLAR:



Siendo:

τ_i^{-1}	200 [r/s]
K_i^{-1}	6 [A/V]
H_{Y0}	320 [V/m]
τ_H^{-1}	10 [krad/s]
i_{L0}	13.3 [A] @2mm/80kg

$$i_{L0} = y_0 \sqrt{\frac{4 \cdot m \cdot g}{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}} = f(m, y_0)$$

- ❑ NOTAR EL SIGNO DEL SUMADOR DEBIDO A LA REPRESENTACIÓN DE LA PLANTA
- ❑ NOTAR LA RESPUESTA A UNA PERTURBACIÓN EN $Y(s)$
- ❑ PARA EVALUAR ESTABILIDAD POR LUGAR DE RAÍCES ANALIZAR EL CRL O BIEN $x(-1)$



SISTEMA DE CONTROL LINEALIZADO: LUGAR DE RAÍCES

$$G.H(s)_{orig} = T_{Li} \cdot G_P \cdot H_Y \cong \frac{1}{K_i \cdot (1 + s \cdot \tau_i)} \cdot \left[\frac{(-) \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{4 \cdot m \cdot g}}}{\left(1 - \frac{y_0}{2g} \cdot s^2\right)} \right] \cdot \frac{H_{Y0}}{(1 + s \cdot \tau_H)}$$

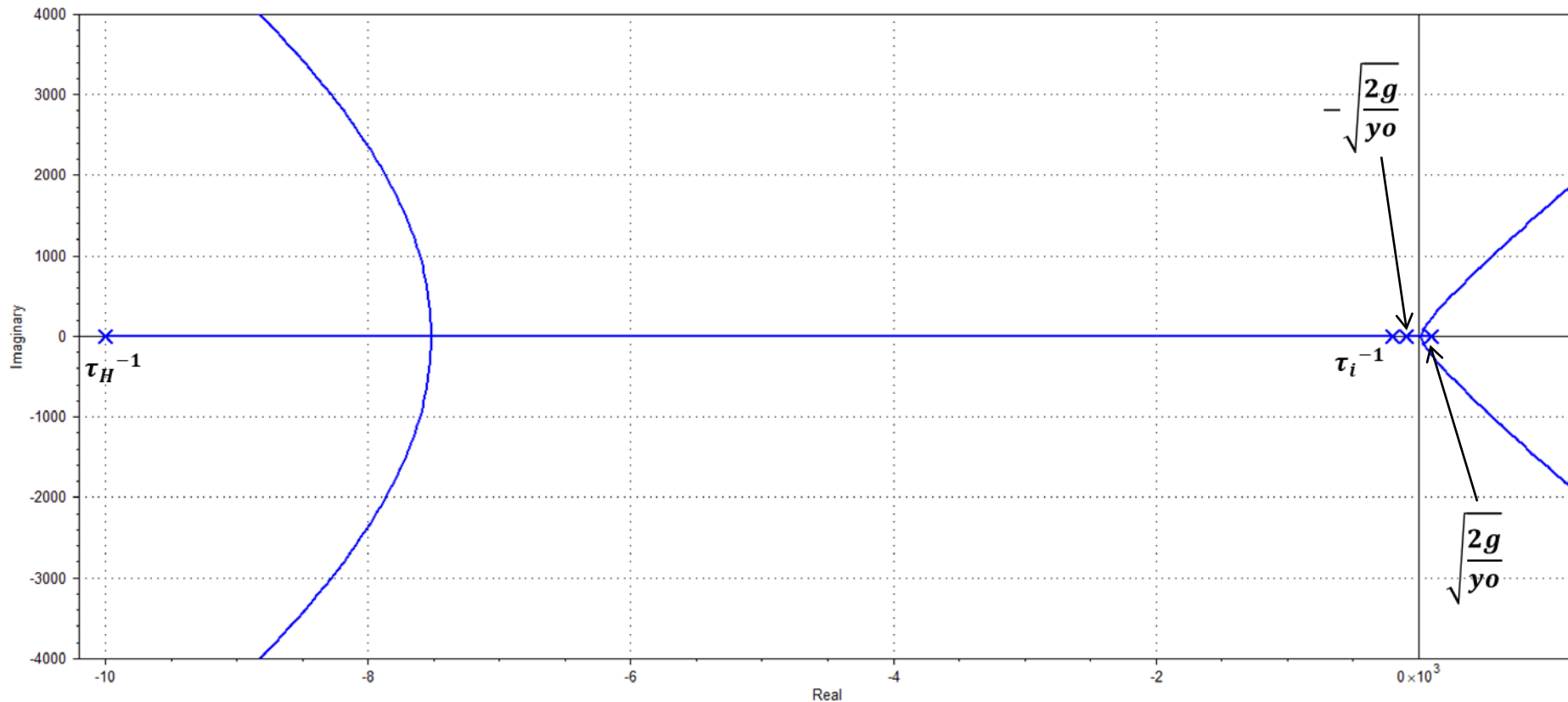
$$G.H(s)_{orig} = T_{Li} \cdot G_P \cdot H_Y \cong \frac{0.008}{\left(1 + s/200\left[\frac{r}{s}\right]\right)} \cdot \frac{1}{\left(1 + s/99\left[\frac{r}{s}\right]\right) \cdot \left(-1 + s/99\left[\frac{r}{s}\right]\right)} \cdot \frac{1}{\left(1 + s/10000\left[\frac{r}{s}\right]\right)}$$

Ganancia de lazo sin compensador
para $m=80\text{kg}$, $y_0=2\text{mm}$.

Asíntotas a 45° ; 135° ; 225° ; 315°

$P=4$, $N=0$

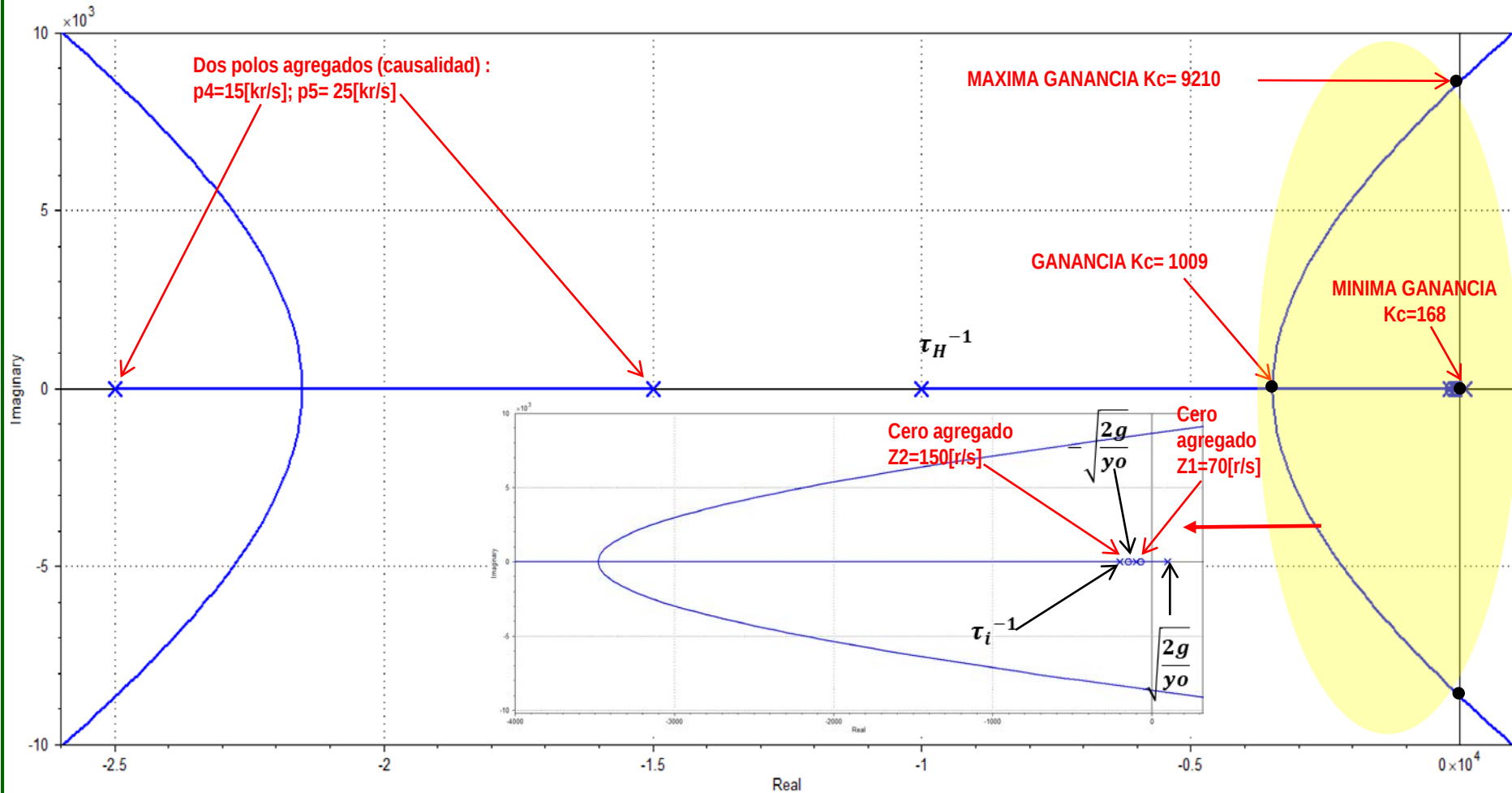
Inestable para cualquier $k>0$ real



SISTEMA DE CONTROL LINEALIZADO: LUGAR DE RAÍCES

$$G \cdot H(s) = T_{Li} \cdot G_P \cdot H_Y \cdot G_C \cong \frac{1}{K_i \cdot (1 + s \cdot \tau_i)} \cdot \left[\frac{(-) \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{4 \cdot m \cdot g}}}{\left(1 - \frac{y_0}{2g} \cdot s^2\right)} \right] \cdot \frac{H_{Y0}}{(1 + s \cdot \tau_H)} \cdot \frac{K_C \left(1 + \frac{s}{Z1}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{Z2}\right)}{\left(1 + \frac{s}{p4}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{p5}\right)}$$

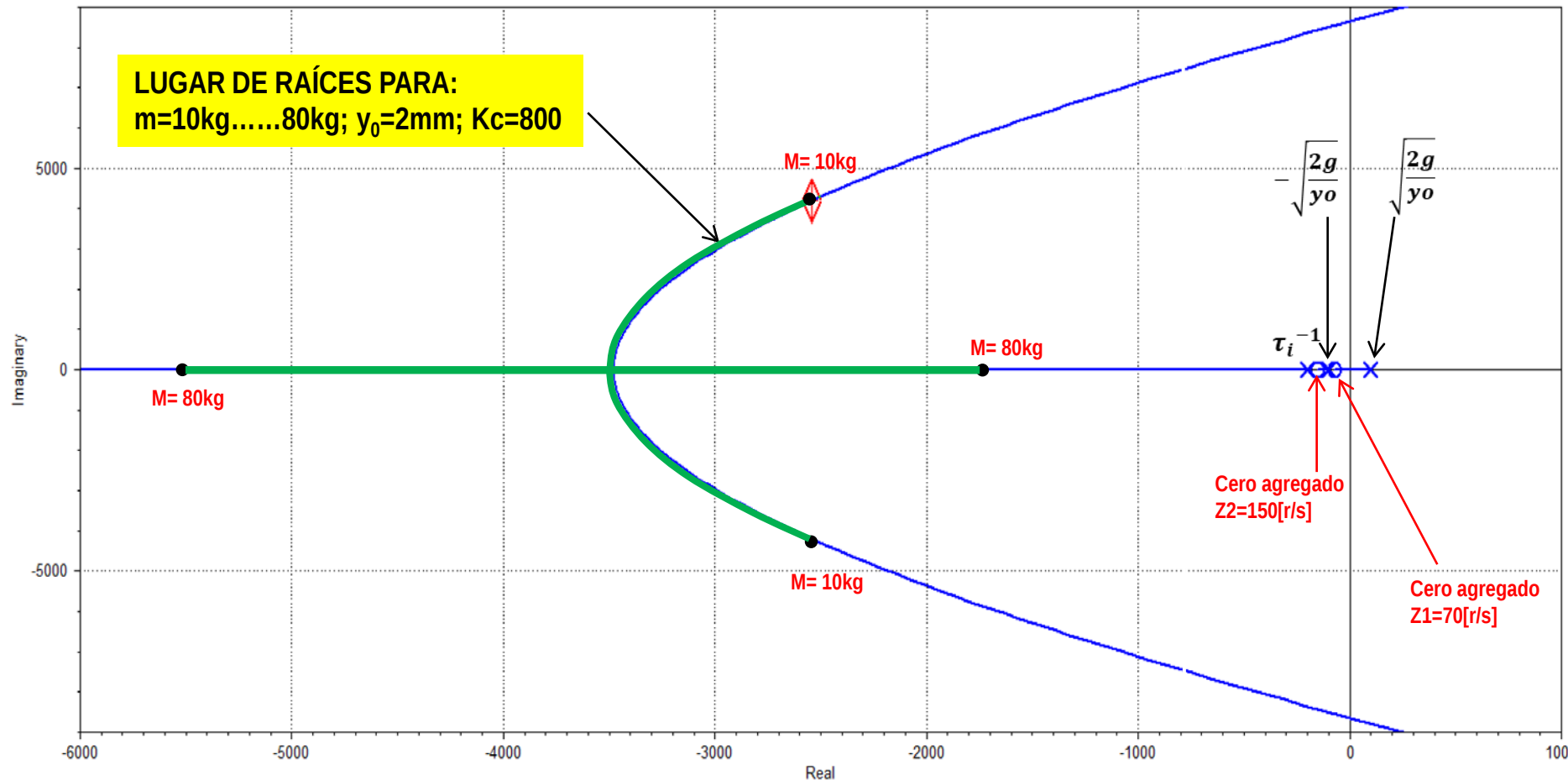
τ_i^{-1}	200 [r/s]
Z1	70 [r/s]
Z2	150 [r/s]
τ_H^{-1}	10 [krad/s]
p4	15 [kr/s]
p5	25 [kr/s]



SISTEMA DE CONTROL LINEALIZADO: LUGAR DE RAÍCES

$$G \cdot H(s) = T_{Li} \cdot G_P \cdot H_Y \cdot G_C \cong \frac{1}{K_i \cdot (1 + s \cdot \tau_i)} \cdot \left[\frac{(-) \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot s}{4 \cdot m \cdot g}}}{\left(1 - \frac{y_0}{2g} \cdot s^2\right)} \right] \cdot \frac{H_{Y0}}{(1 + s \cdot \tau_H)} \cdot \frac{K_C \left(1 + \frac{s}{z1}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{z2}\right)}{\left(1 + \frac{s}{p4}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{p5}\right)}$$

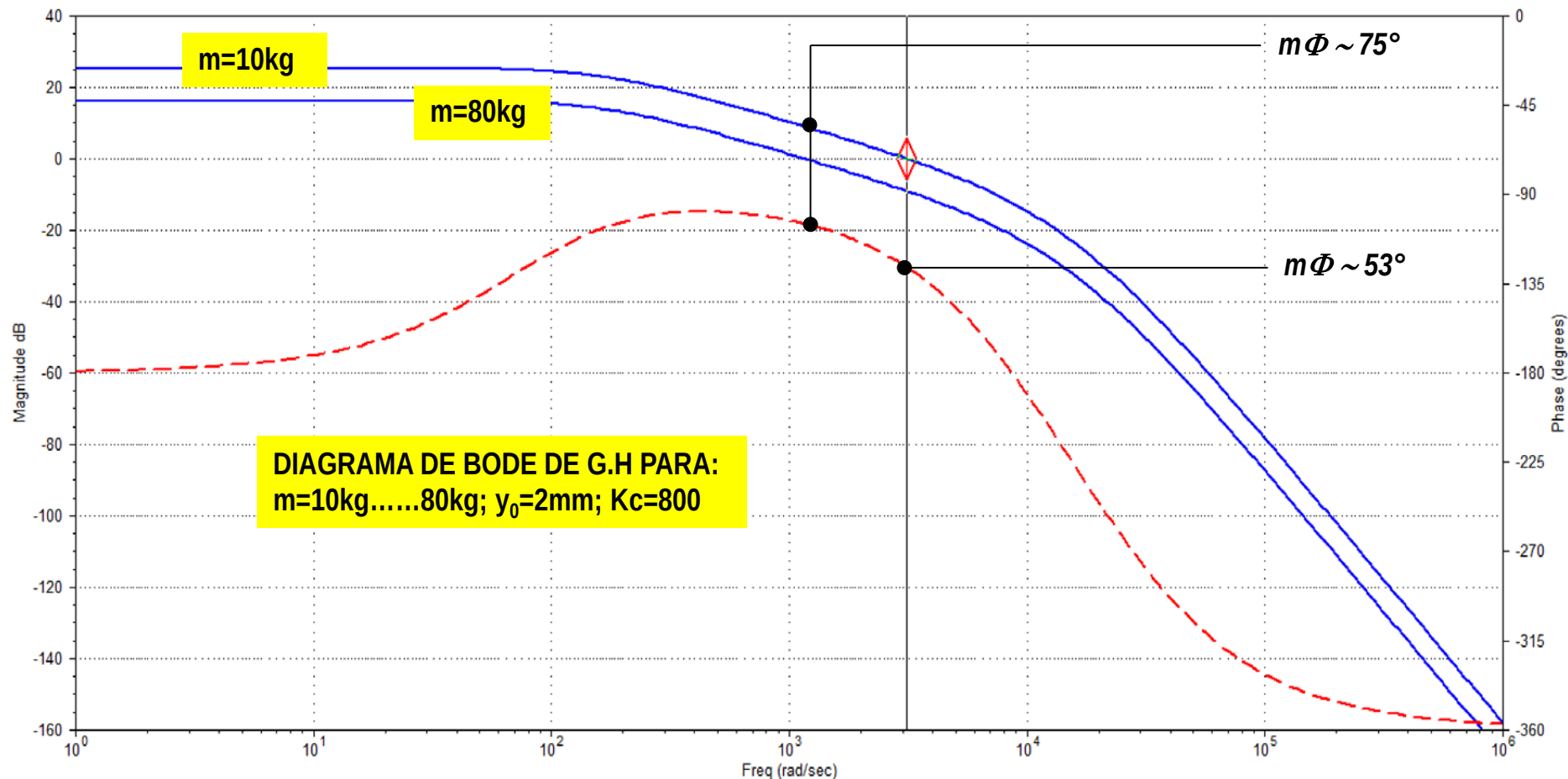
EFFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA MASA EN LA ESTABILIDAD



SISTEMA DE CONTROL LINEALIZADO: DIAGRAMA DE BODE

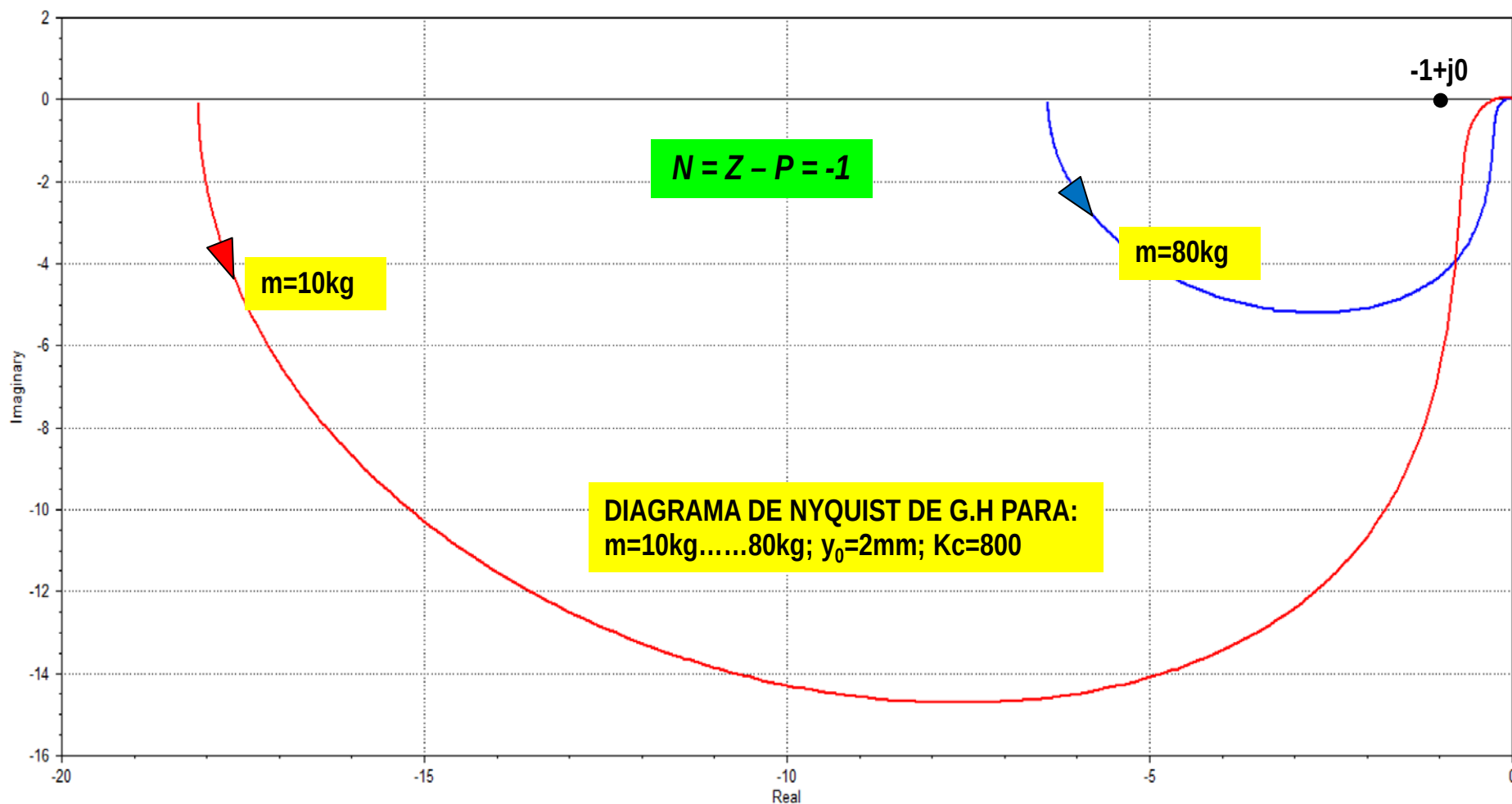
$$G \cdot H(s) = T_{Li} \cdot G_P \cdot H_Y \cdot G_C \cong \frac{1}{K_i \cdot (1 + s \cdot \tau_i)} \cdot \left[\frac{(-) \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot s}{4 \cdot m \cdot g}}}{\left(1 - \frac{y_0}{2g} \cdot s^2\right)} \right] \cdot \frac{H_{Y0}}{(1 + s \cdot \tau_H)} \cdot \frac{K_C \left(1 + \frac{s}{z1}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{z2}\right)}{\left(1 + \frac{s}{p4}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{p5}\right)}$$

EFFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA MASA EN LA ESTABILIDAD



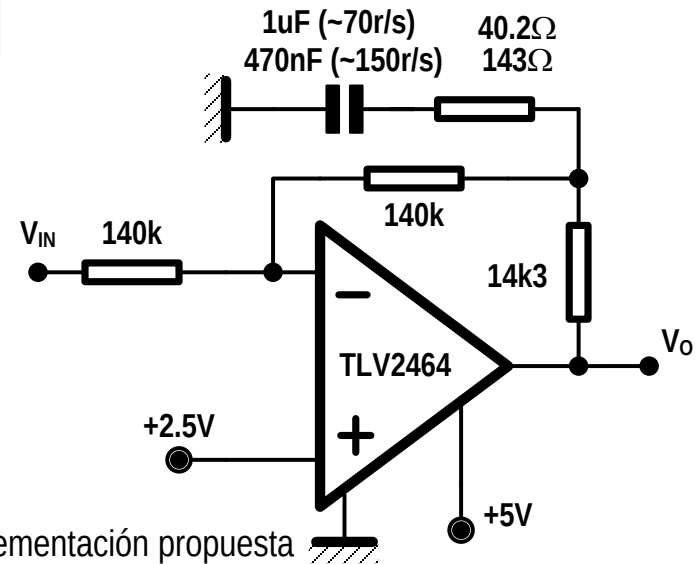
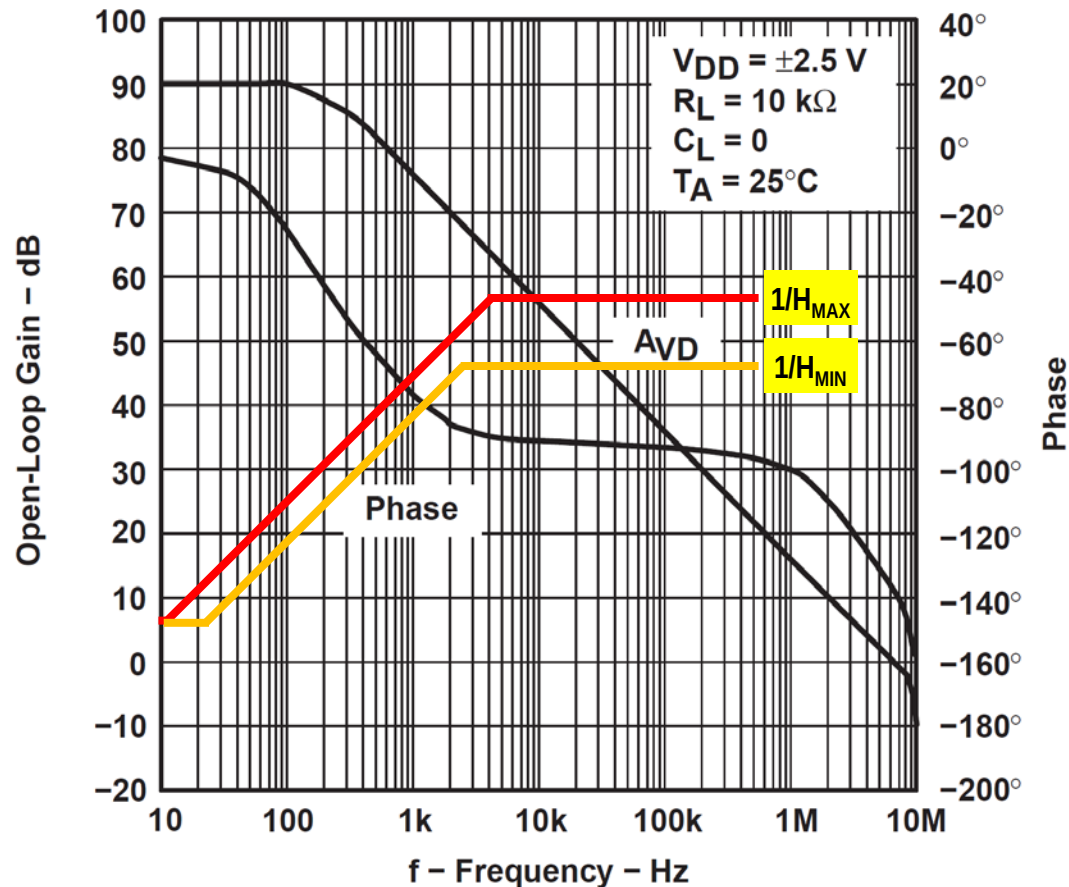
SISTEMA DE CONTROL LINEALIZADO: DIAGRAMA DE NYQUIST

$$G.H(s) = T_{Li} \cdot G_P \cdot H_Y \cdot G_C \cong \frac{1}{K_i \cdot (1 + s \cdot \tau_i)} \cdot \left[\frac{(-) \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot s}{4 \cdot m \cdot g}}}{\left(1 - \frac{y_0}{2g} \cdot s^2\right)} \right] \cdot \frac{H_{Y0}}{(1 + s \cdot \tau_H)} \cdot \frac{K_C \left(1 + \frac{s}{z1}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{z2}\right)}{\left(1 + \frac{s}{p4}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{p5}\right)}$$



CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR ANALÓGICO

$$G_C(s) = \frac{\left(1 + \frac{s}{z1}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{z2}\right)}{\left(1 + \frac{s}{p4}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{p5}\right)} = \frac{\left(1 + \frac{s}{70[\frac{r}{s}]}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{150[\frac{r}{s}]}\right)}{\left(1 + \frac{s}{15k[\frac{r}{s}]}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{25k[\frac{r}{s}]}\right)}$$



Implementación propuesta
con AOV: **TLV2464**.

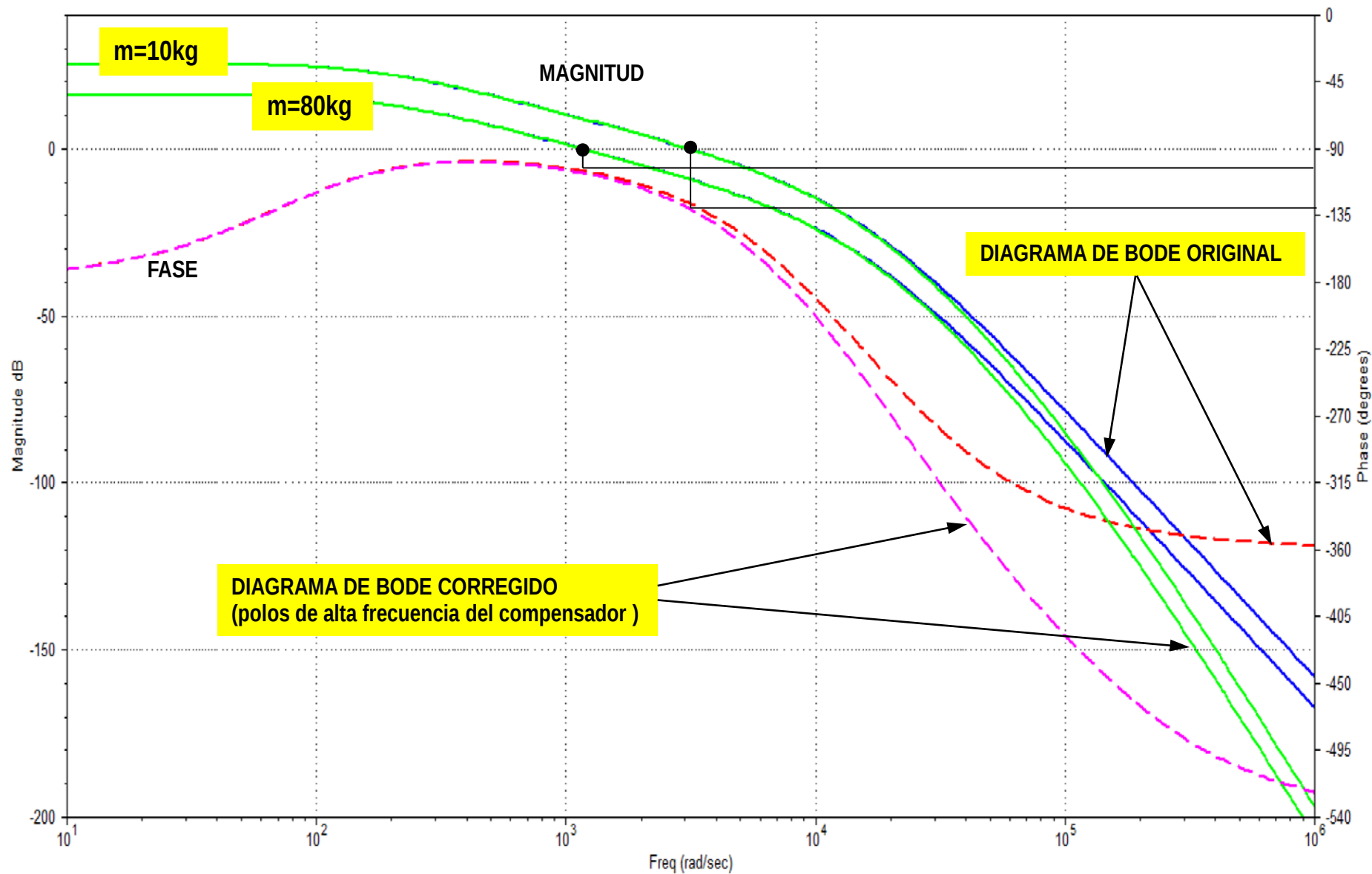
Compensador obtenido con la limitación del AOV
Dos TLV2464 en cascada

$$G_C^*(s) = \frac{\left(1 + \frac{s}{z1}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{z2}\right)}{\left(1 + \frac{s}{p4}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{p5}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{p6}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{p7}\right)}$$

Z1	70 [r/s]
Z2	150 [r/s]
p4	15 [kr/s]
p5	25 [kr/s]
p6	63 [kr/s]
p7	188 [kr/s]



CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR ANALÓGICO (cont.)



CIRCUITO FINAL

