Modelado de Inversores Resonantes

Introduction

Fundamentos

Modelos equivalentes

Simulación de la aproximación fundamental

Simulación de las envolventes

Francisco Javier Azcondo Sánchez

En un convertidor cc/cc obtenemos un modelo equivalente promediado siendo el ciclo de trabajo el parámetro de control.

En un convertidor resonante la tensión de salida depende de:

La frecuencia de conmutación (FM).

El desfase de la intensidad resonante (PM).

La tensión de entrada (AM).

La campana de resonancia nos da a conocer el punto de trabajo.

Lo que queremos conocer es la respuesta del convertidor ante perturbaciones de los parámetros de control.

p.e. Cuánto varía la tensión de salida si la frecuencia de conmutación varía 1Hz a una frecuencia de 1, 10, 100Hz, etc...

Qué desfase tiene la variación de la tensión de salida con respecto a la variación de la frecuencia.

Utilizando la aproximación fundamental si la frecuencia de conmutación es constante, una función del inversor se puede expresar como

$$x(t) = \mathrm{Re}\left[\bar{x}(t) e^{j w_s t}\right]$$

$\bar{x}(t)$ **Es la amplitud del fasor que puede variar en el tiempo**

Si w_s **puede variar en el tiempo, el fasor queda redefinido de la siguiente forma**

$$x(t) = \mathrm{Re}\left[\bar{x}(t) e^{j \int w_s(t) dt}\right]$$

Fundamentos (II)

Tensiones e intensidades en el circuito resonantes quedan da la forma

$$v(t) = \mathrm{Re}\left[\bar{v}(t)e^{j\int w_s(t)dt}\right]$$

$$i(t) = \mathrm{Re}\left[\bar{i}(t)e^{j\int w_s(t)dt}\right]$$

En el caso de una inductancia

$$L\frac{di_L(t)}{dt} = v_L(t)$$ **Relaciona valores instantáneos**

$$L\frac{d\bar{i}_L(t)}{dt} + jw_s(t)L\bar{i}_L(t) = \bar{v}_L(t)$$ **Relaciona amplitudes (envolventes)**

Fundamentos (III)

En el caso de un condensador

$$C\frac{dv_C(t)}{dt}=i_C(t)$$ **Relaciona valores instantáneos**

$$C\frac{d\bar{v}_C(t)}{dt}+jw_s(t)C\bar{v}_C(t)=\bar{i}_C(t)$$ **Relaciona amplitudes (envolventes)**

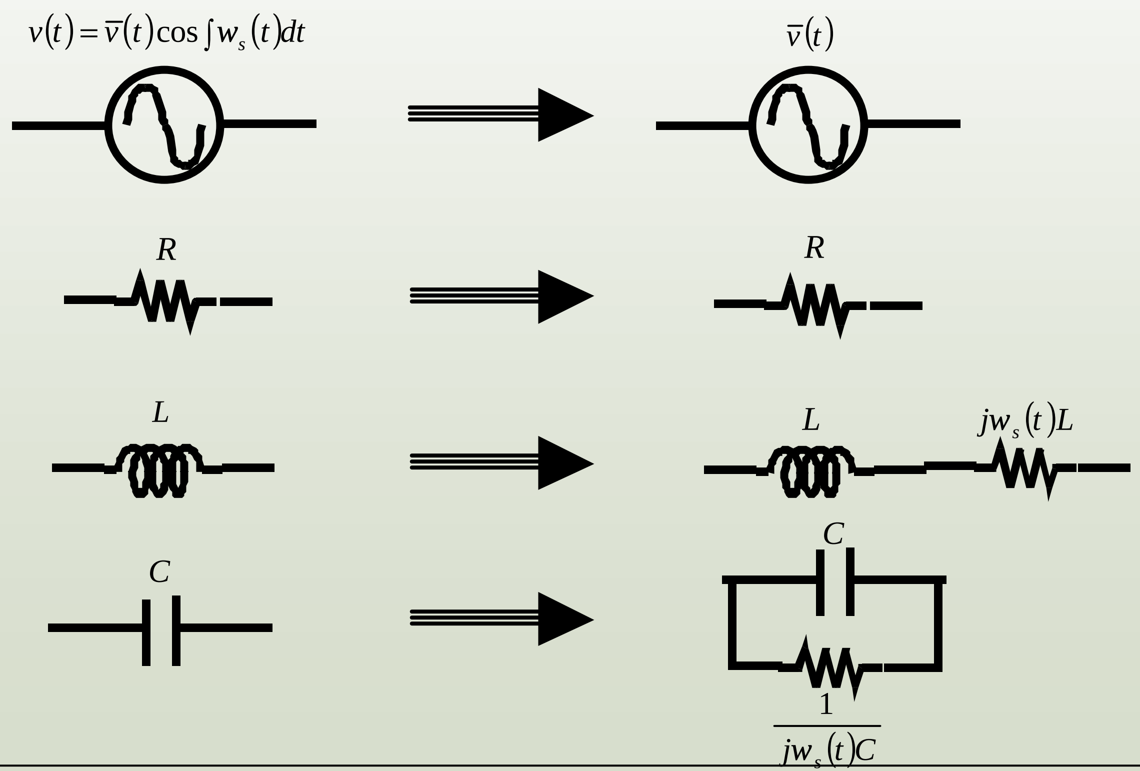
En el caso de una fuente de tensión

$$v(t)=\mathrm{Re}\left[\bar{v}(t)e^{j\int w_s(t)dt}\right] \Longrightarrow v(t)=\bar{v}(t)\cos\left(\int w_s(t)dt\right)$$

Modelos equivalentes (I)

Si quiero estudiar las funciones envolventes en lugar de los valores instantáneos utilizaré el circuito que me relaciona las variables $\overline{x}(t)$

En gran señal, para obtener la simulación .tran de las envolventes



Modelos equivalentes (II)

Los valores de los componentes equivalentes de inductancias y condensadores tienen parte real y parte imaginaria por lo que nos posible realizar la simulación.

Solución: simular el circuito que obtiene cada componente ortogonal de las envolventes y posteriormente realizar la suma cuadrática.

$$\bar{x}(t) = x_1(t) + jx_2(t) \qquad \left|\bar{x}(t)\right| = \sqrt{x_1^2(t) + x_2^2(t)}$$

$$L\frac{d\bar{i}_L(t)}{dt} + jw_s(t)L\bar{i}_L(t) = \bar{v}_L(t)$$

$$L\frac{d\left(i_{1L}(t) + ji_{2L}(t)\right)}{dt} + jw_s(t)L\left(i_{1L}(t) + ji_{2L}(t)\right) = v_{1L}(t) + jv_{2L}(t)$$

$$L\frac{di_{1L}(t)}{dt} - w_s(t)Li_{2L}(t) = v_{1L}(t) \qquad L\frac{di_{2L}(t)}{dt} + w_s(t)Li_{1L}(t) = v_{2L}(t)$$

Modelos equivalentes (III)

$$C\frac{d\bar{v}_C(t)}{dt}+jw_s(t)C\bar{v}_C(t)=\bar{i}_C(t)$$

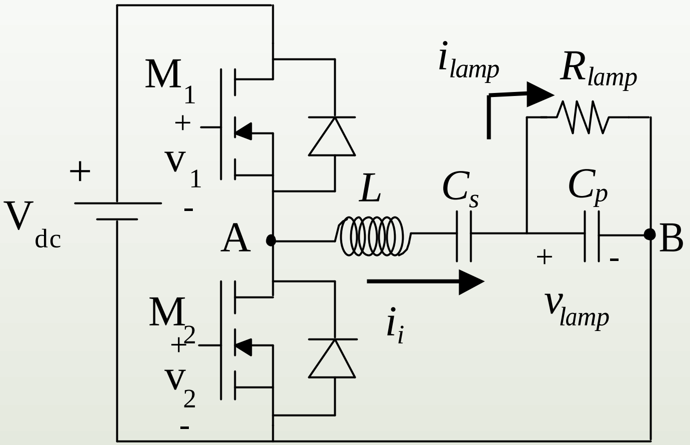
$$C\frac{d\left(v_{1C}(t)+jv_{2C}(t)\right)}{dt}+jw_s(t)C\left(v_{1C}(t)+jv_{2C}(t)\right)=\left(i_{1C}(t)+ji_{2C}(t)\right)$$

$$C\frac{dv_{1C}(t)}{dt}-w_s(t)Cv_{2C}(t)=i_{1C}(t) \qquad C\frac{dv_{2C}(t)}{dt}+w_s(t)Cv_{1C}(t)=i_{2C}(t)$$

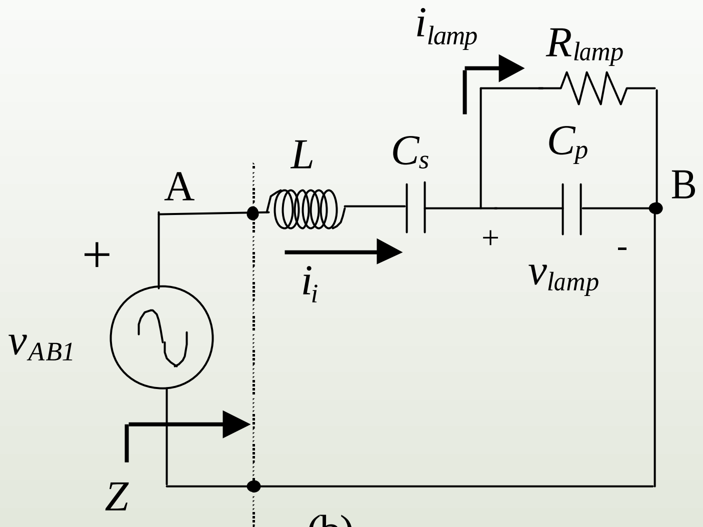
$$\bar{v}(t)=v_1(t)+jv_2(t)$$

$$v_{1R}(t)=Ri_{1R}(t) \qquad v_{2R}(t)=Ri_{2R}(t)$$

Ejemplo de inversor resonante LCpCs



(a)



(b)

$$v_{AB1} = v(t) = \bar{v}(t)\cos\left(\int w_s(t)dt\right)$$

Simulación de la aproximación fundamental (II)

Si no existe AM ni FM

$$v_{AB1} = \hat{V}_{AB1} \sin\left(w_s t\right)$$

Si existe AM y no FM

$$v_{AB1} = \left[\hat{V}_{AB1} + A_{AM} \sin\left(2pf_{AM}\, t\right)\right] \sin\left(w_s t\right)$$

A_{AM} es la amplitud de la modulación de amplitud
f_{AM} es la frecuencia de la modulación de amplitud

Si existe FM y no AM

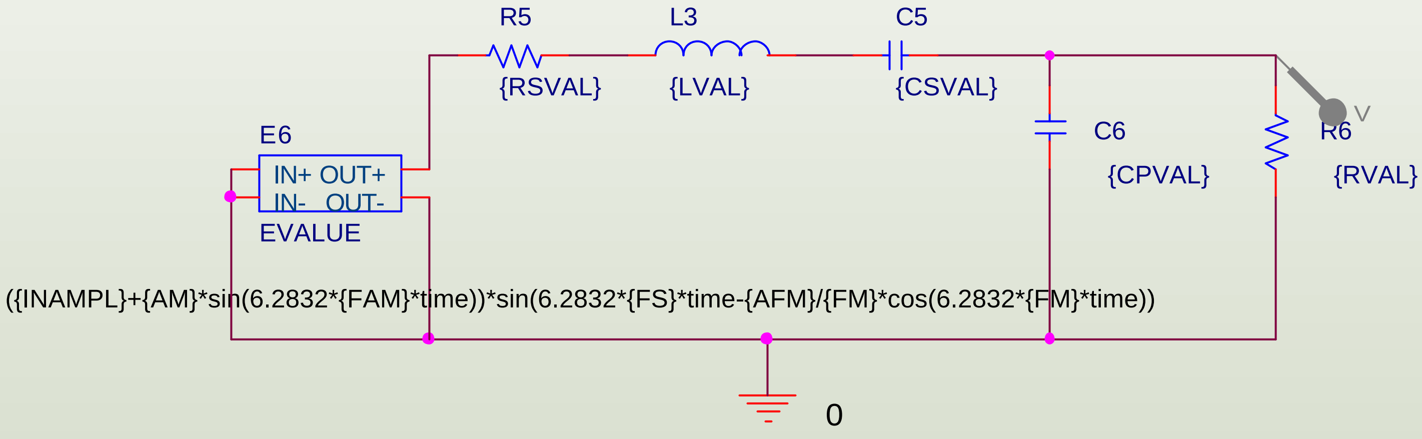
$$v_{AB1} = \hat{V}_{AB1} \sin\left(\int \left[w_s + 2pA_{FM} \sin\left(2pf_{FM}\, t\right)\right] dt\right)$$

A_{FM} es la amplitud de la modulación de amplitud
f_{FM} es la frecuencia de la modulación de amplitud

Simulación de la aproximación fundamental (III)

Si existe AM y FM

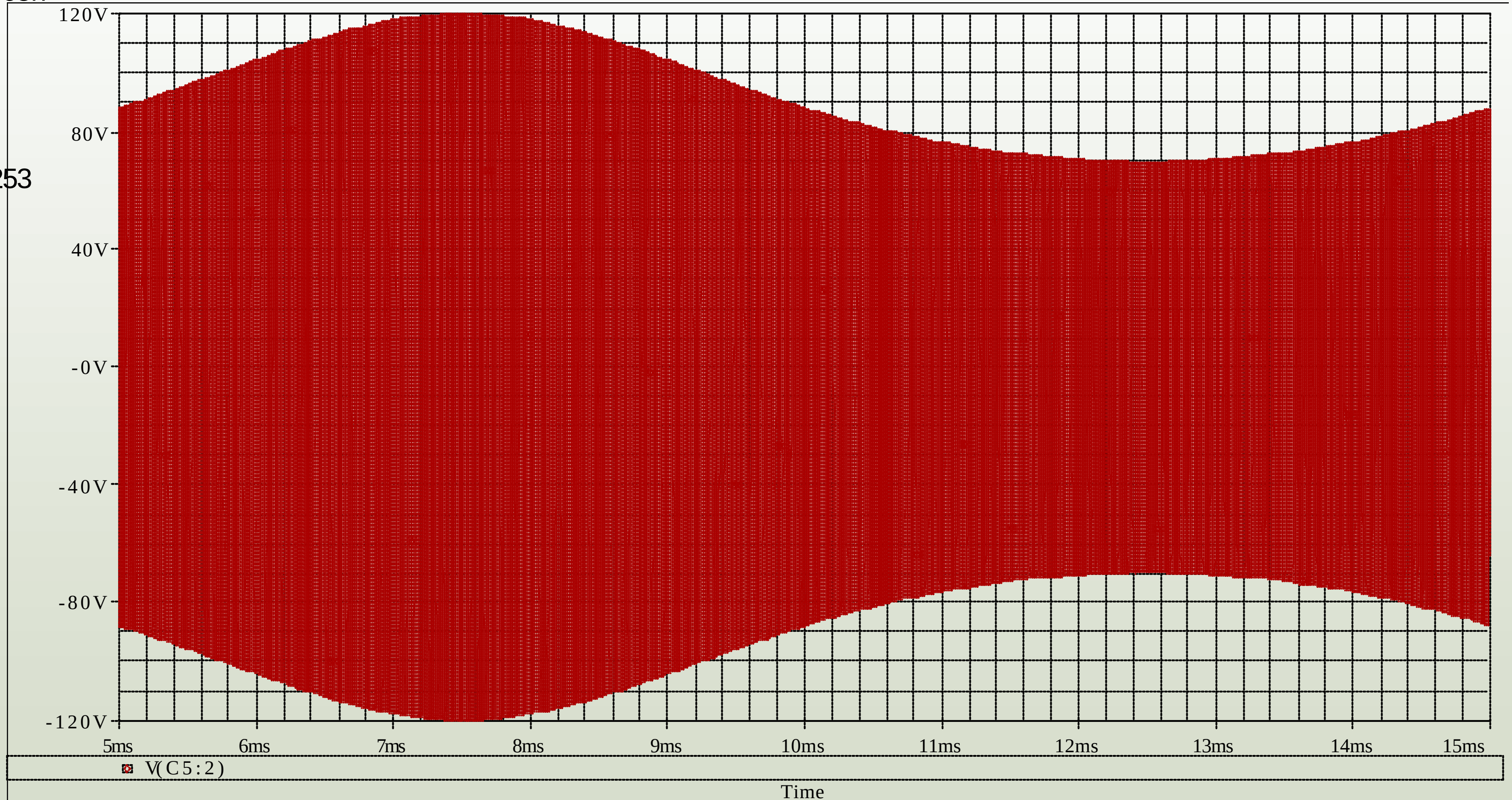
$$v_{AB1} = \left[\hat{V}_{AB1} + A_{AM}\,\sin\left(2pf_{AM}\,t\right)\right]\sin\left(2pf_s t + \frac{A_{FM}}{f_{FM}}\cos\left(2pf_{FM}\,t\right)\right)$$



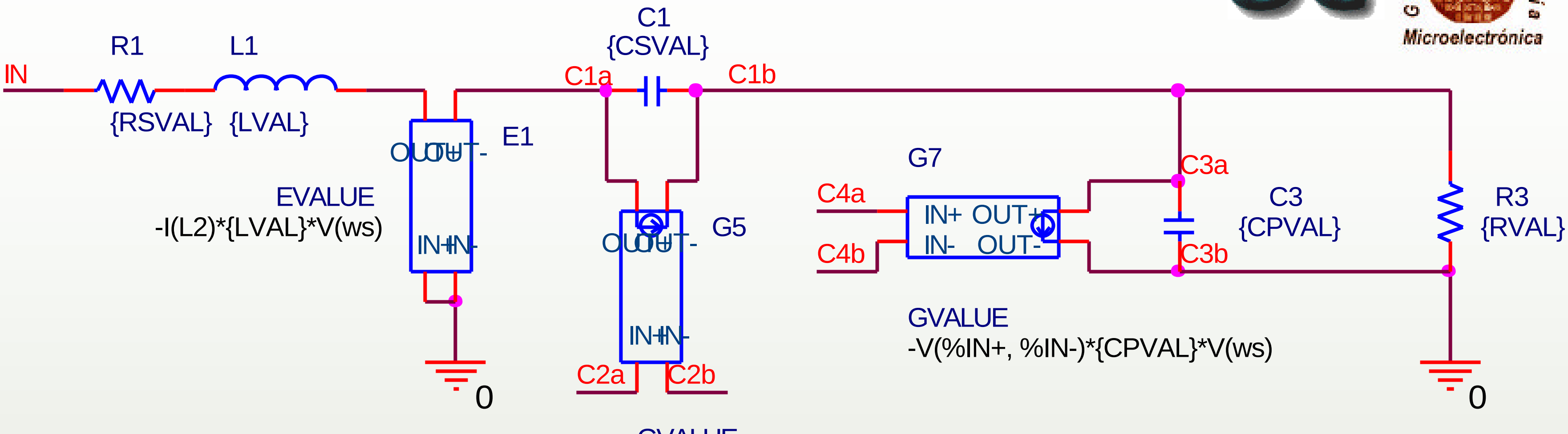
Simulación de la aproximación fundamental (IV)

PARAMETERS:

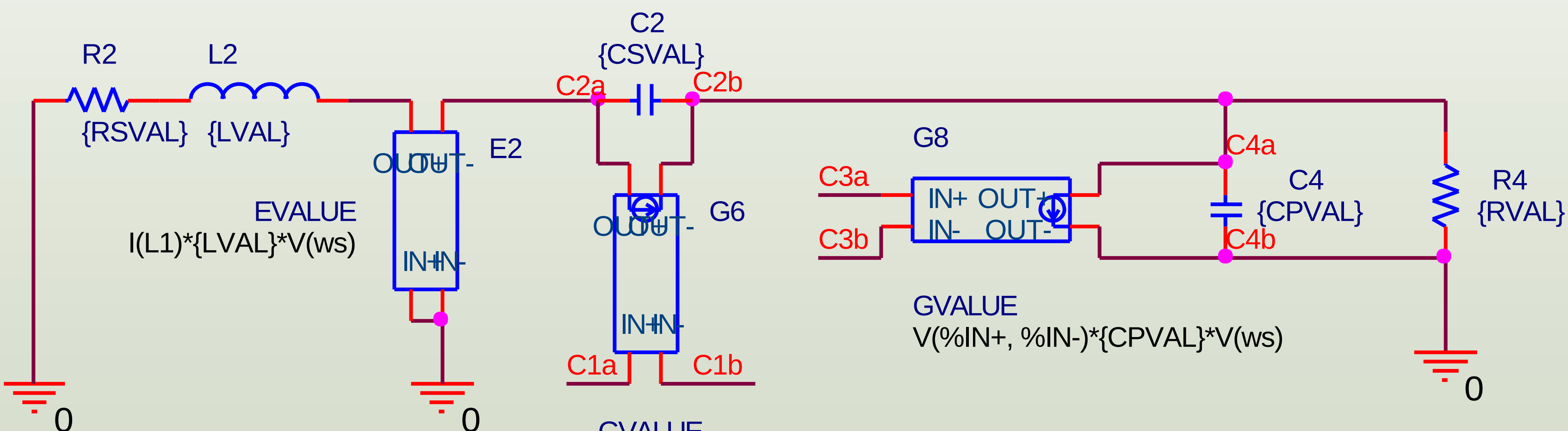
RVAL = 66
LVAL = 330u
CSVAL = 16.5n
CPVAL = 1.65n
FS = 125k
FAM = 100
AM = 0
AFM = 20k
FM = 100
INAMPL = 253
RSVAL = 2



Simulación de las envolventes (I)

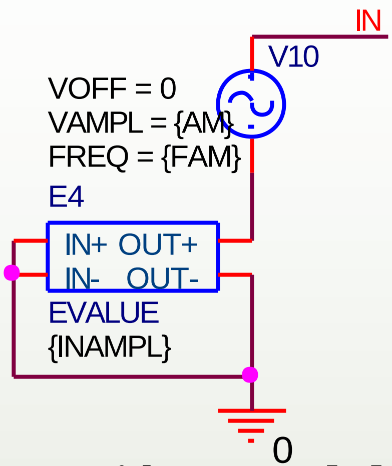


Parte real

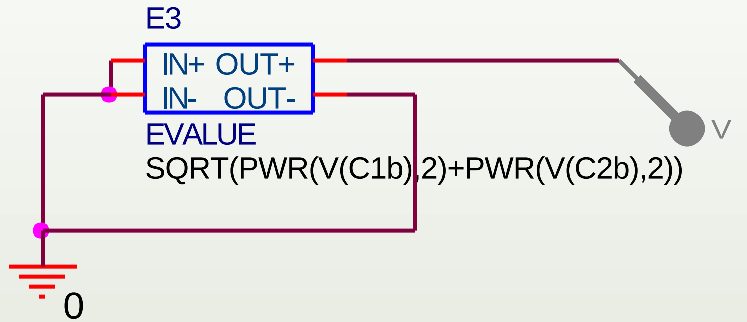


Parte imaginaria

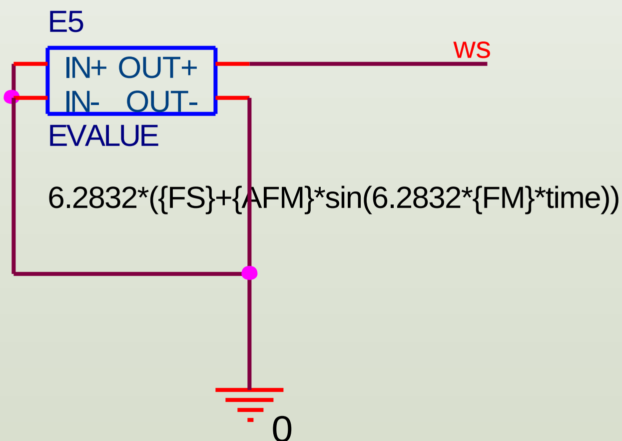
Simulación de las envolventes (II)



Alimentación y modulación de amplitud



Obtención de la tensión de salida

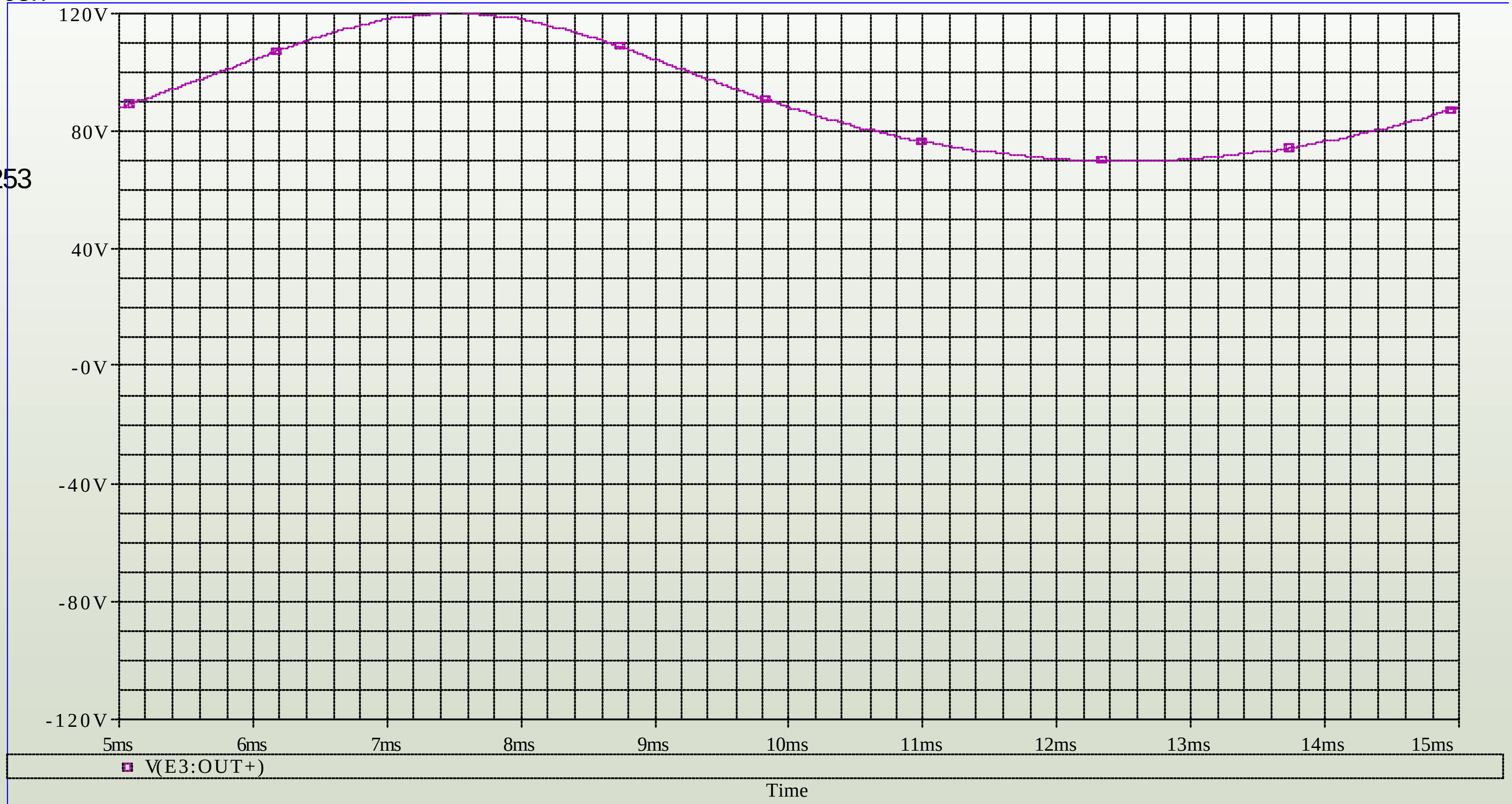


Frecuencia de conmutación y modulación de frecuencia

Simulación de las envolventes (III)

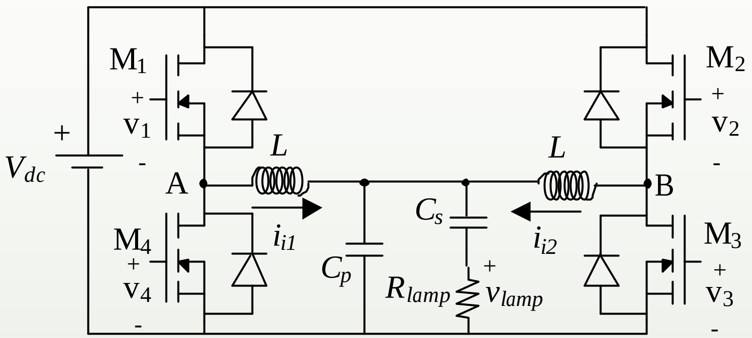
PARAMETERS:

RVAL = 66
LVAL = 330u
CSVAL = 16.5n
CPVAL = 1.65n
FS = 125k
FAM = 100
AM = 0
AFM = 20k
FM = 100
INAMPL = 253
RSVAL = 2

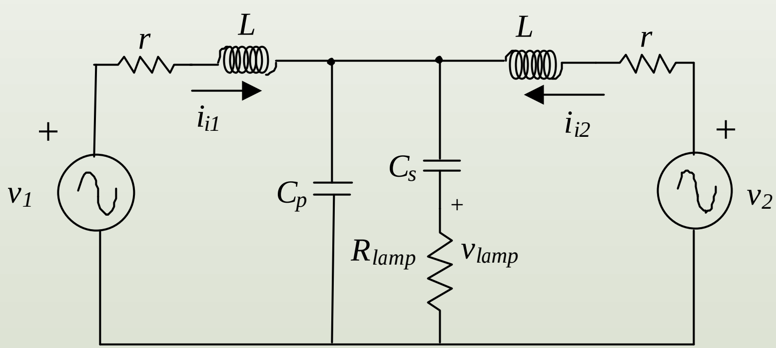


Caso del doble LCC (I)

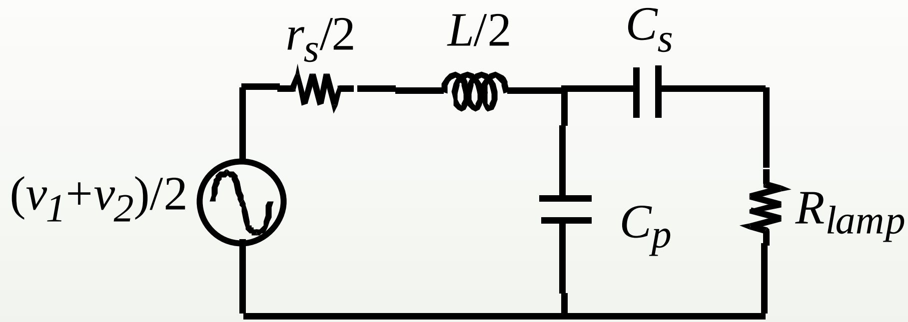
Aproximación fundamental



(a)



(b)



$$v_{1,2}(t) = \frac{2V_{dc}}{p}\cdot\sin\left(w_s t \pm \frac{\Psi}{2}\right)$$

$$\bar{v}_{1,2} = \frac{2V_{dc}}{p}\cdot e^{\pm j(\Psi/2)}$$

$$\frac{v_1+v_2}{2} = \frac{2V_{dc}}{p}\cdot\sin(w_s t)\cos\left(\frac{\Psi}{2}\right)$$

Caso del doble LCC (II)

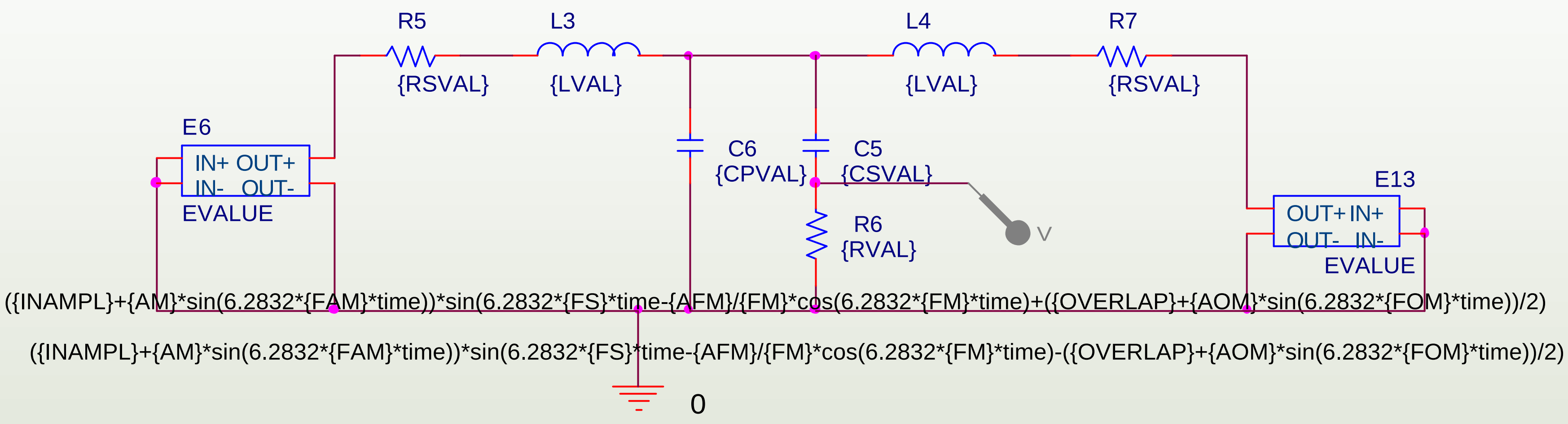
Aproximación fundamental

$$v_1 = \left[\hat{V}_{AB1} + A_{AM}\sin\left(2pf_{AM}t\right)\right]\sin\left(2pf_s t + \frac{A_{FM}}{f_{FM}}\cos\left(2pf_{FM}t\right) + \frac{y + A_{OM}\sin\left(2pf_{OM}t\right)}{2}\right)$$

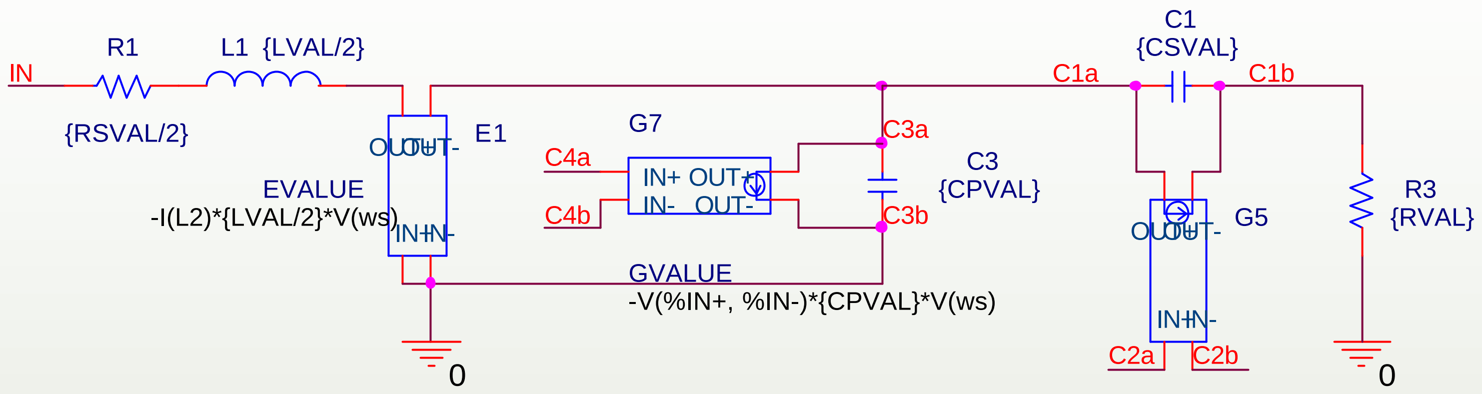
$$v_2 = \left[\hat{V}_{AB1} + A_{AM}\sin\left(2pf_{AM}t\right)\right]\sin\left(2pf_s t + \frac{A_{FM}}{f_{FM}}\cos\left(2pf_{FM}t\right) - \frac{y + A_{OM}\sin\left(2pf_{OM}t\right)}{2}\right)$$

Siendo y **el ángulo de solape del punto de trabajo, A_{OM} la amplitud de la modulación del solape (ambos en radianes) y f_{OM} la frecuencia de la modulación del solape.**

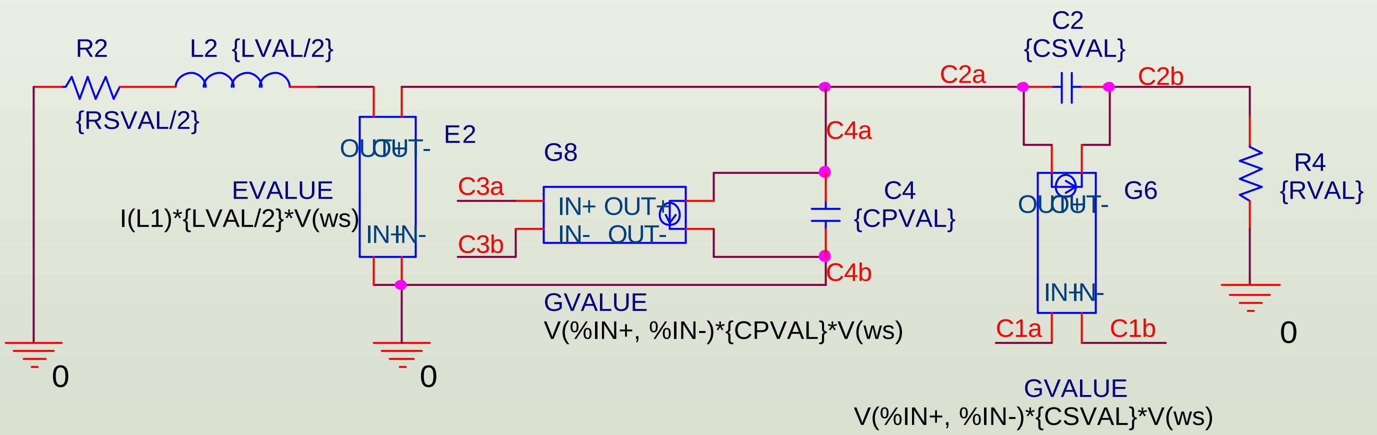
Simulación de la aproximación fundamental.



Simulación de las envolventes, caso 1.

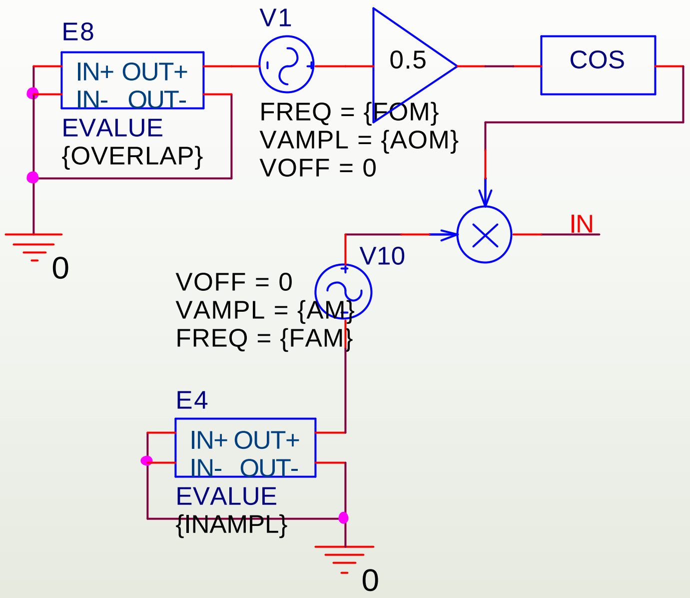


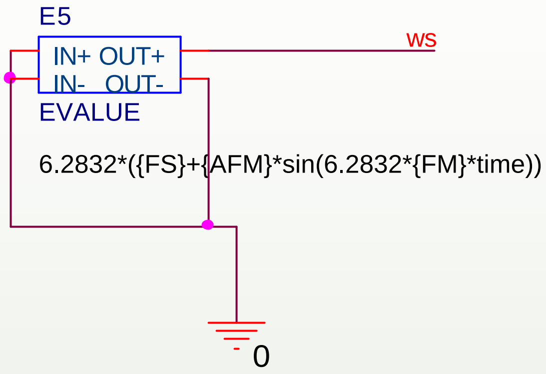
Parte real



Parte imaginaria

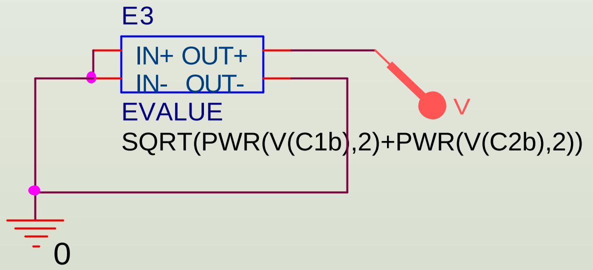
Caso del doble LCC (V)





Frecuencia de conmutación y modulación de frecuencia

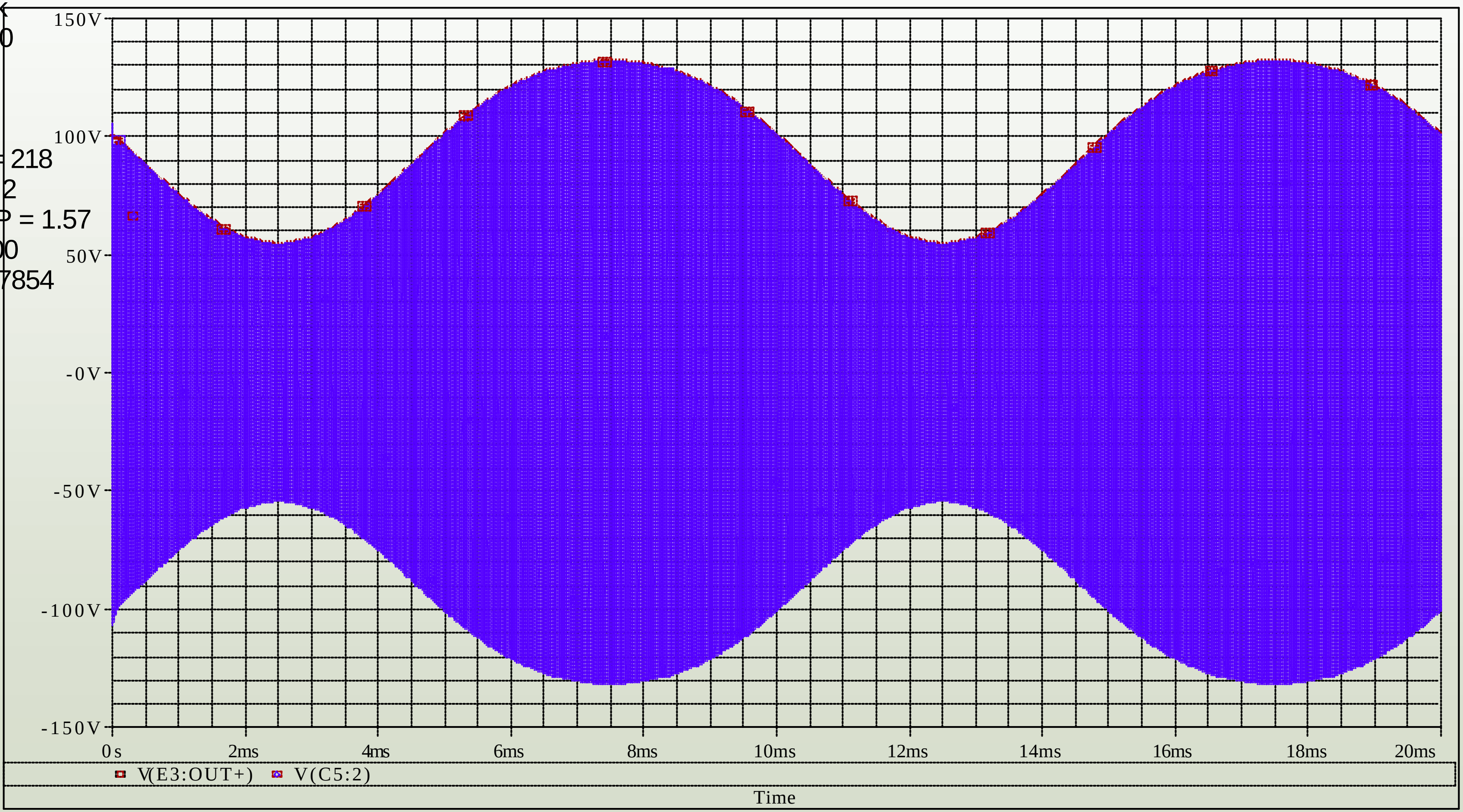
Alimentación, modulación de amplitud, solape y modulación de solape



Obtención de la tensión de salida

Caso del doble LCC (VI)

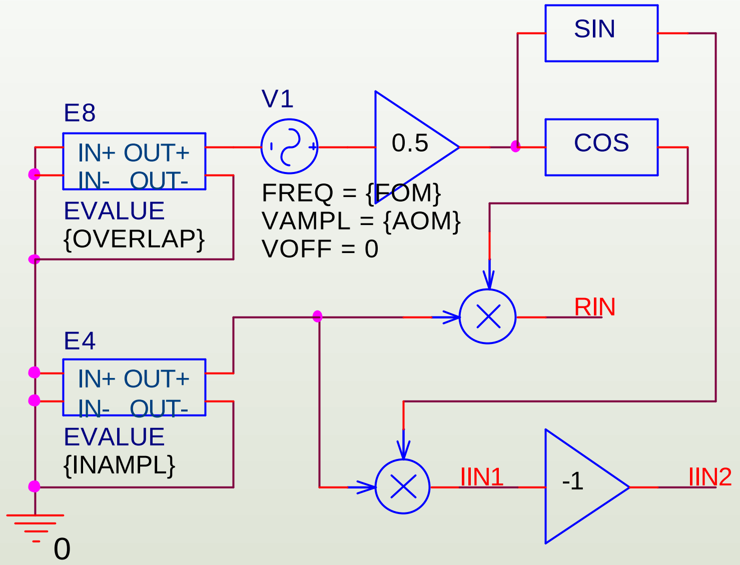
PARAMETERS:
RVAL = 67
LVAL = 293u
CSVAL = 470n
CPVAL = 4.7n
FS = 100k
FAM = 100
AM = 0
AFM = 0
FM = 100
INAMPL = 218
RSVAL = 2
OVERLAP = 1.57
FOM = 100
AOM = 0.7854



Caso del doble LCC (VII)

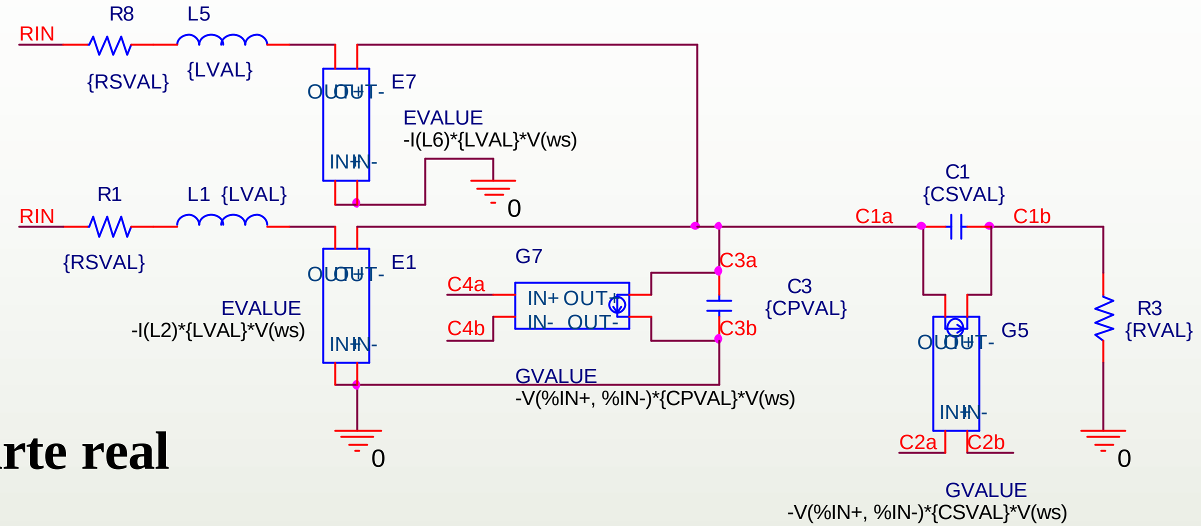
Simulación de las envolventes, caso 2 generalizable para n fases.

$$\bar{v}_{1,2} = \frac{2V_{dc}}{p} \cdot e^{\pm j(\Psi/2)} \qquad \bar{v}_{1,2} = \mathrm{Re}[\bar{v}_{12}] \pm j\,\mathrm{Im}[\bar{v}_{12}]$$

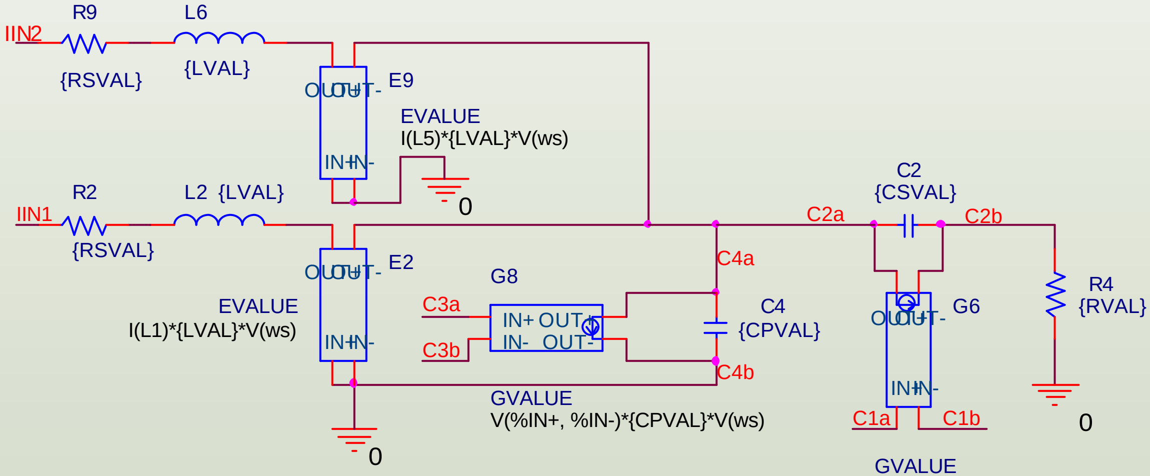


Alimentación, modulación de amplitud, solape y modulación de solape para la parte real e imaginaria

Caso del doble LCC (VIII)



Parte real



Parte imaginaria

Pequeña señal (I)

$$\bar{x} = \bar{X} + \hat{\bar{x}}$$

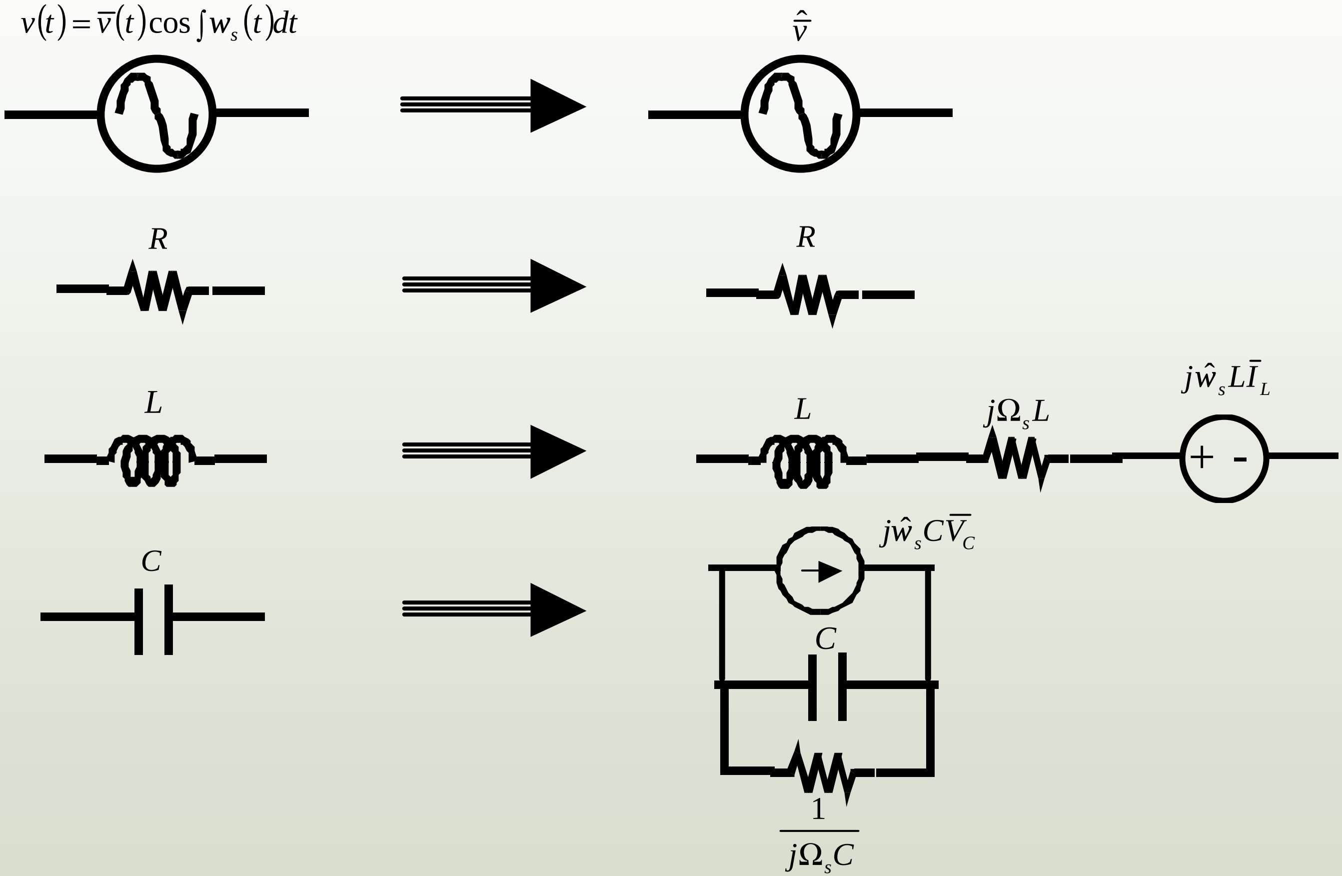
$$\bar{V}_L + \hat{\bar{v}}_L = L\frac{d\left(\bar{I}_L + \hat{\bar{i}}_L\right)}{dt} + j\left(\Omega_s + \hat{w}_s\right)L\left(\bar{I}_L + \hat{\bar{i}}_L\right)$$

$$\hat{\bar{v}}_L = L\frac{d\hat{\bar{i}}_L}{dt} + jL\hat{w}_s\bar{I}_L + jL\Omega_s\hat{\bar{i}}_L$$

$$\bar{I}_C + \hat{\bar{i}}_C = C\frac{d\left(\bar{V}_C + \hat{\bar{v}}_C\right)}{dt} + j\left(\Omega_s + \hat{w}_s\right)C\left(\bar{V}_C + \hat{\bar{v}}_C\right)$$

$$\hat{\bar{i}}_C = C\frac{d\hat{\bar{v}}_C}{dt} + jC\hat{w}_s\bar{V}_C + jC\Omega_s\hat{\bar{v}}_C$$

Si quiero estudiar las funciones de transferencia



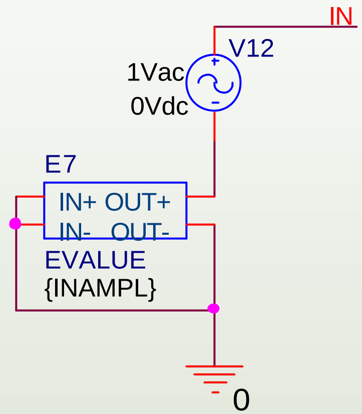
Para obtener el valor de las variables en ac partimos de las componentes ortogonales de las variables en ac

$$\left|\bar{x}(t)\right| = \sqrt{x_1^2(t) + x_2^2(t)} = x_{en}(t)$$

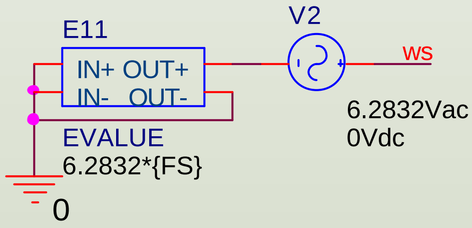
$$\hat{x}_{en} = \frac{X_1 \hat{x}_1 + X_2 \hat{x}_2}{\sqrt{X_1^2(t) + X_2^2(t)}} = \frac{X_1 \hat{x}_1 + X_2 \hat{x}_2}{X}$$

Pequeña señal (IV)

Pero no tengo que modificar el circuito PSPICE, sino que utilizando el mismo modelo de envolventes fijaré un punto de funcionamiento añadiendo fuentes v_{ac} y realizando una simulación .ac

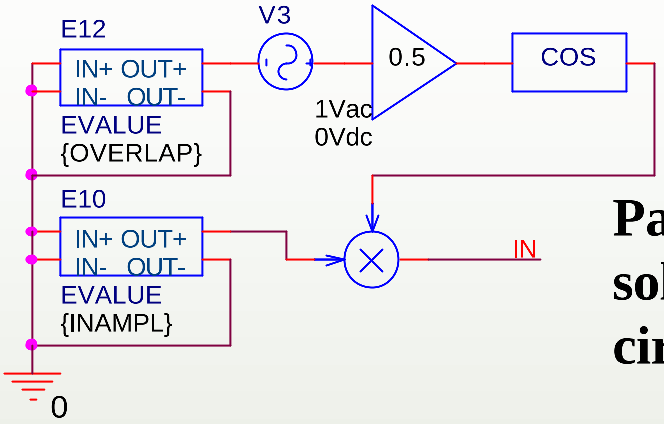


Para obtener la simulación .ac con modulación de amplitud

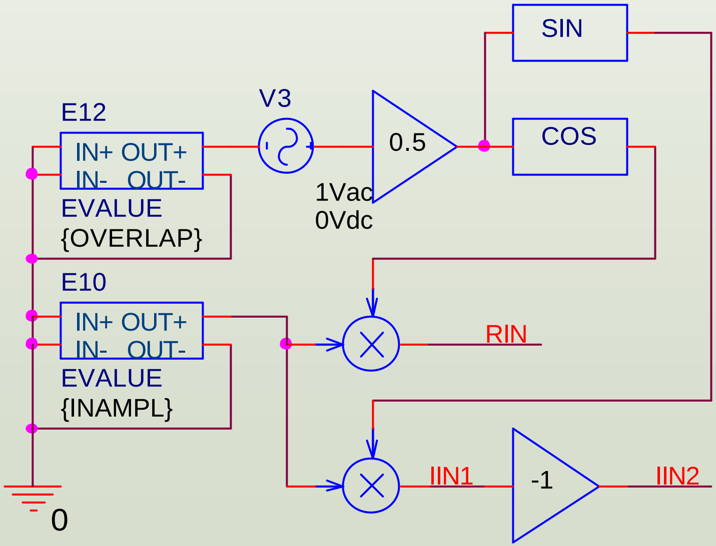


Para obtener la simulación .ac con modulación d frecuencia

Pequeña señal (V)



Para obtener la simulación .ac con modulación del solape en el doble LCC. Caso 1, utilizando el circuito monofásico equivalente



Para obtener la simulación .ac con modulación del solape en el doble LCC. Caso2, Sin utilizar el circuito monofásico equivalente.

Pequeña señal (VI)

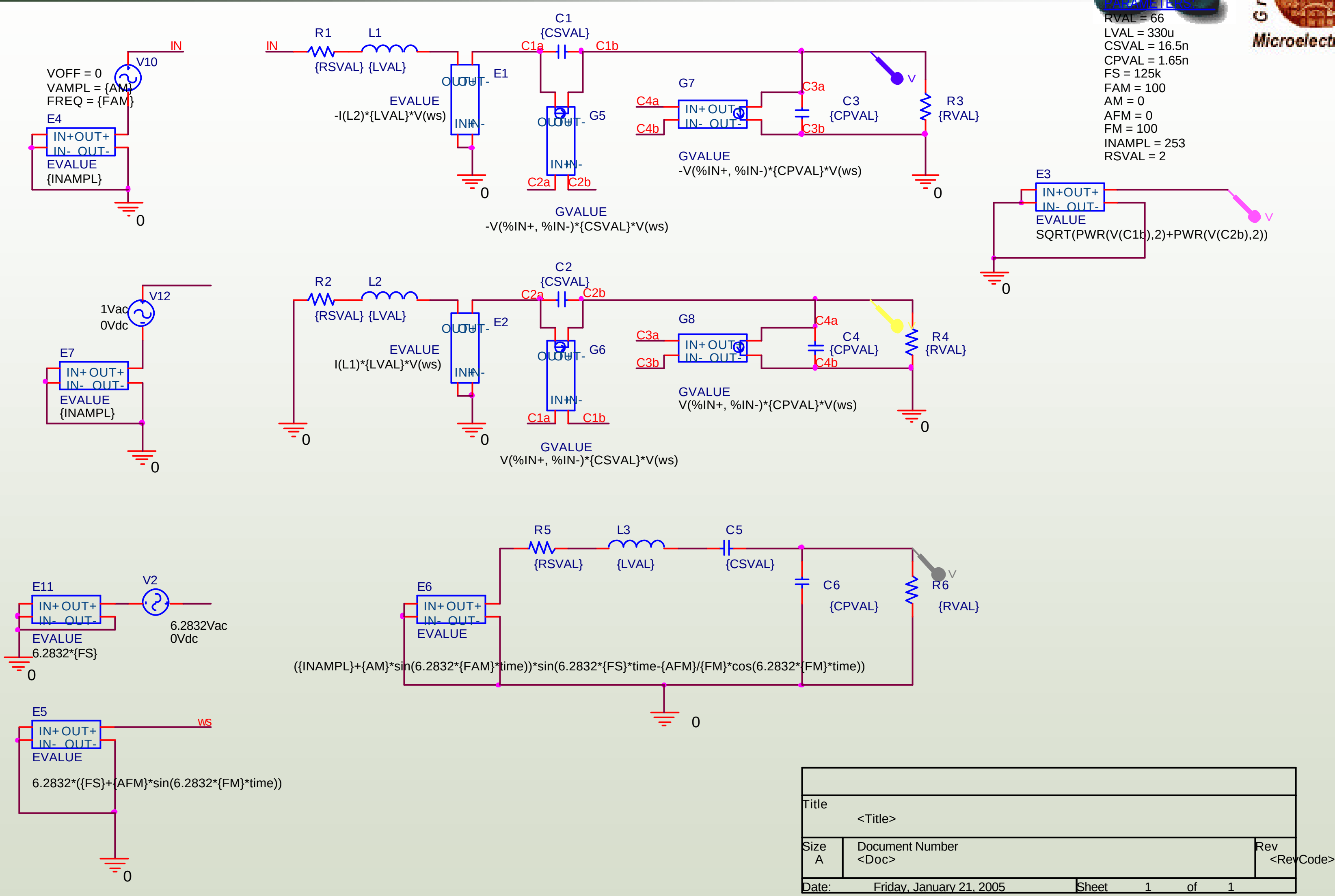
Paso 1. Realizar la simulación con el modelo de envolventes sin aplicar modulación para obtener los valores de las X_1, X_2 y X de interés.

Paso 2. Realizar la simulación .ac de la que se obtienen valores $\hat{x}_1, \ \hat{x}_2$

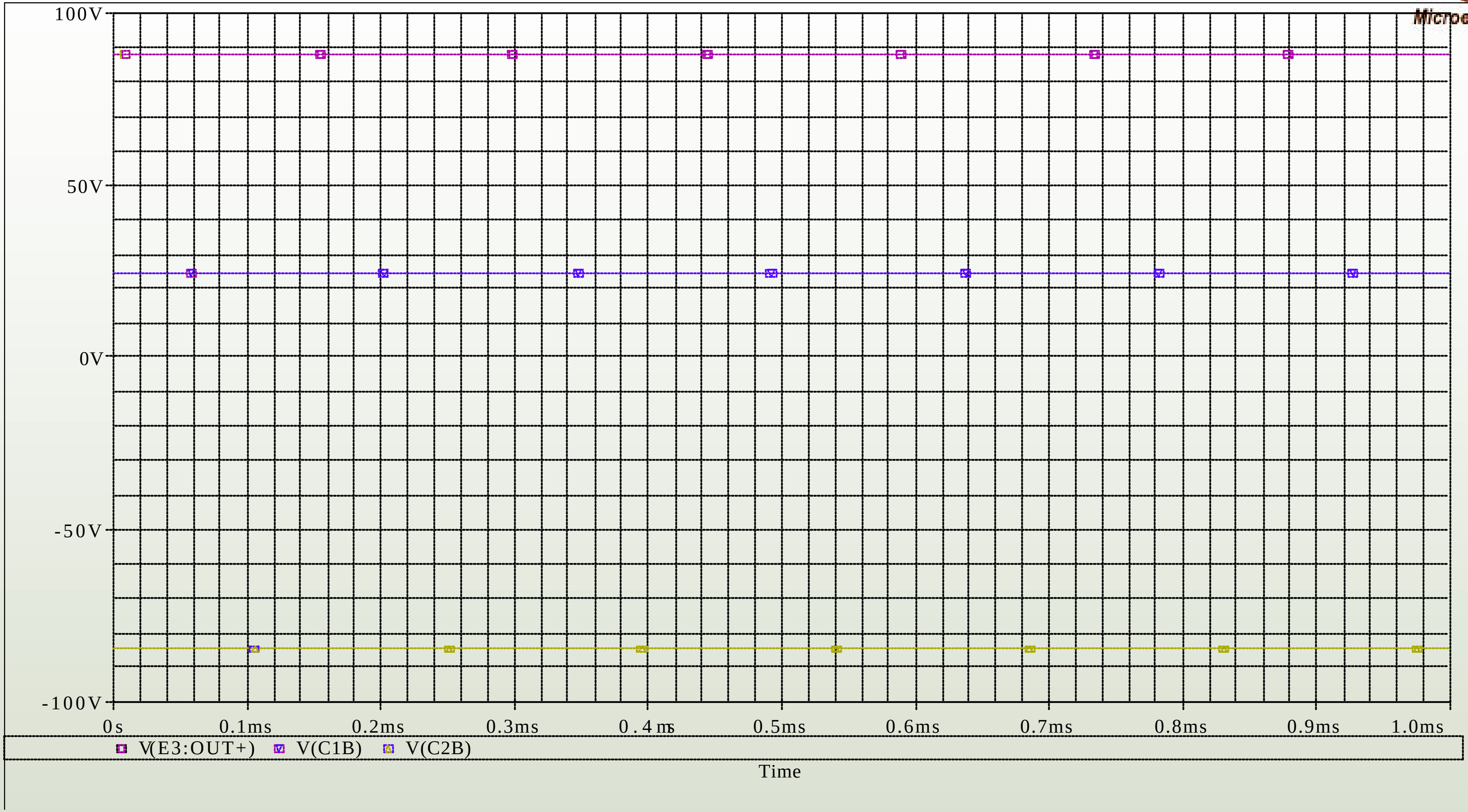
Paso 3. Realizar en la gráfica de resultados la operación

$$\hat{x}_{en} = \frac{X_1\hat{x}_1 + X_2\hat{x}_2}{\sqrt{X_1^2(t) + X_2^2(t)}} = \frac{X_1\hat{x}_1 + X_2\hat{x}_2}{X}$$

Pequeña señal (VII)



Pequeña señal (VIII)

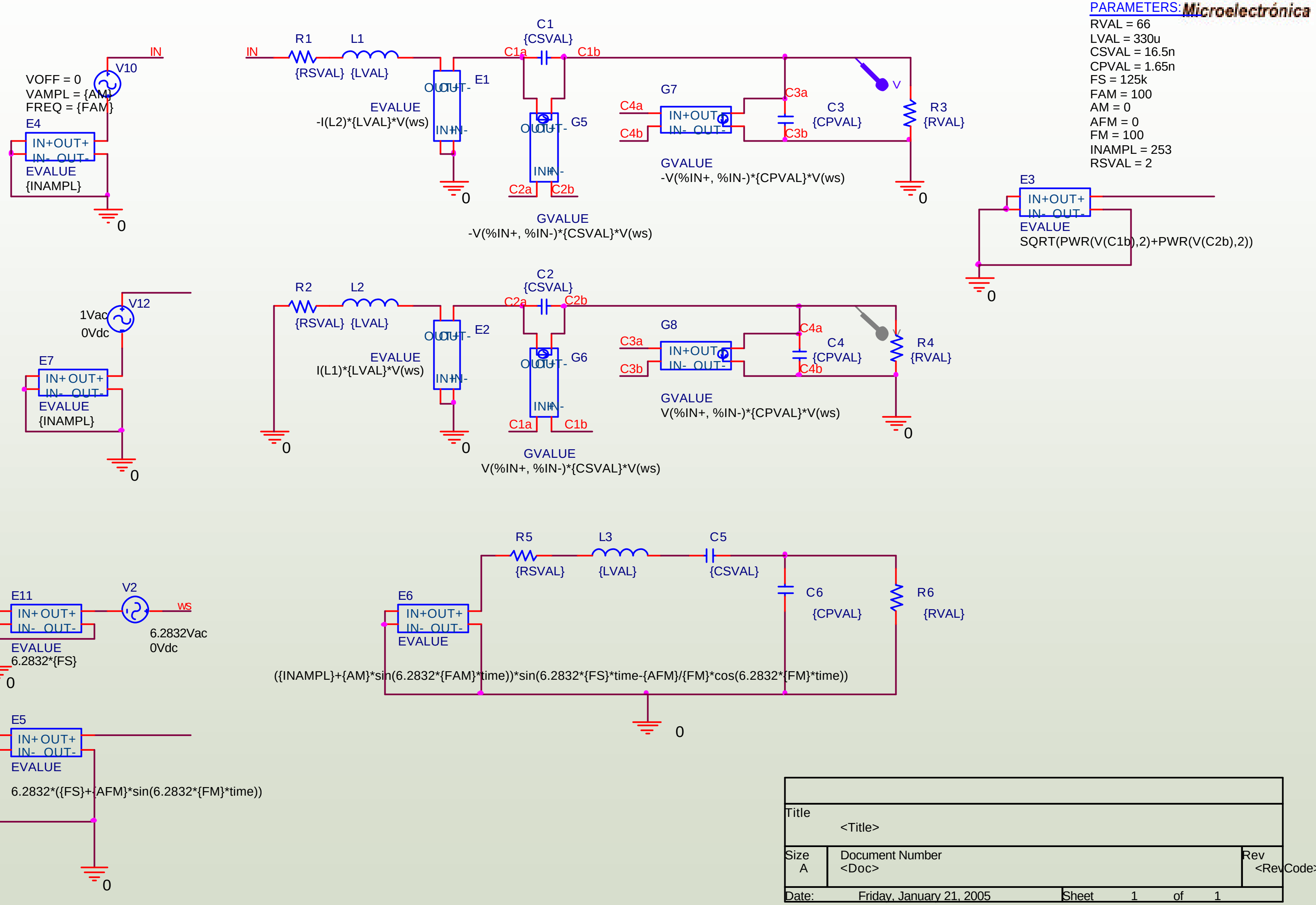


Valor de la amplitud de la tensión de salida

V_{lamp}=88,078V, V_{lamp1}=24,36V, V_{lamp2}=-84,643V

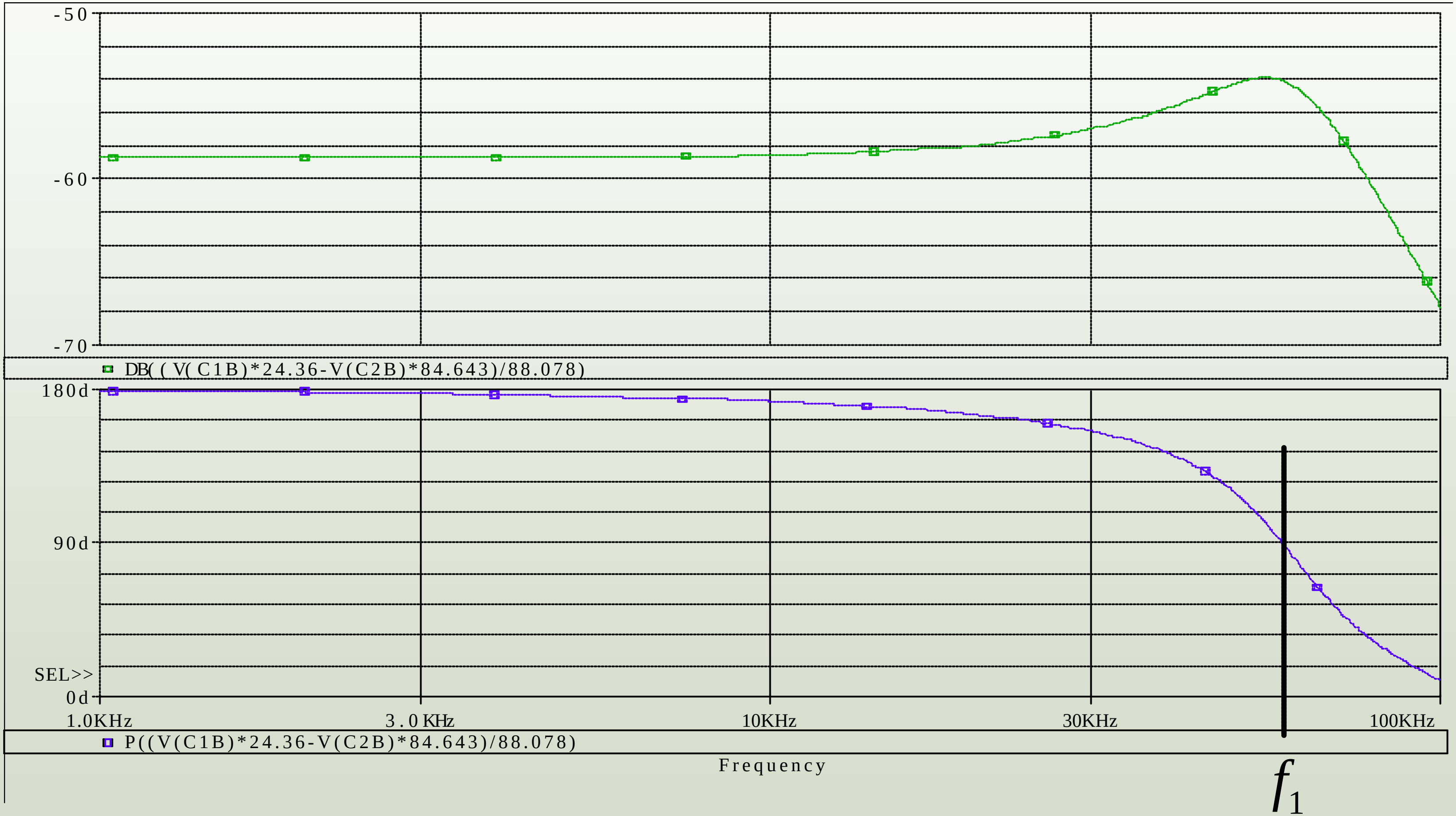
Pequeña señal (IX)

$$\frac{\hat{v}_{lamp}}{\hat{f}_s}$$



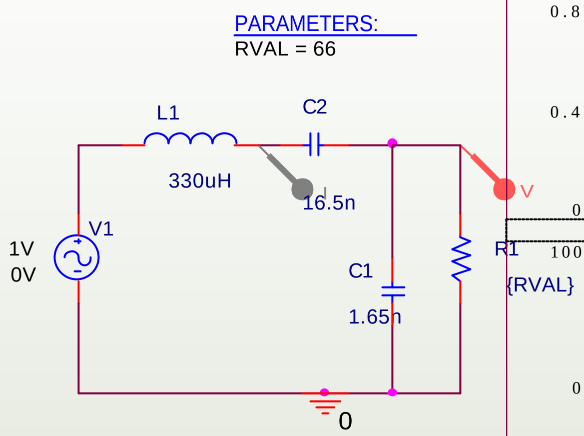
Pequeña señal (X)

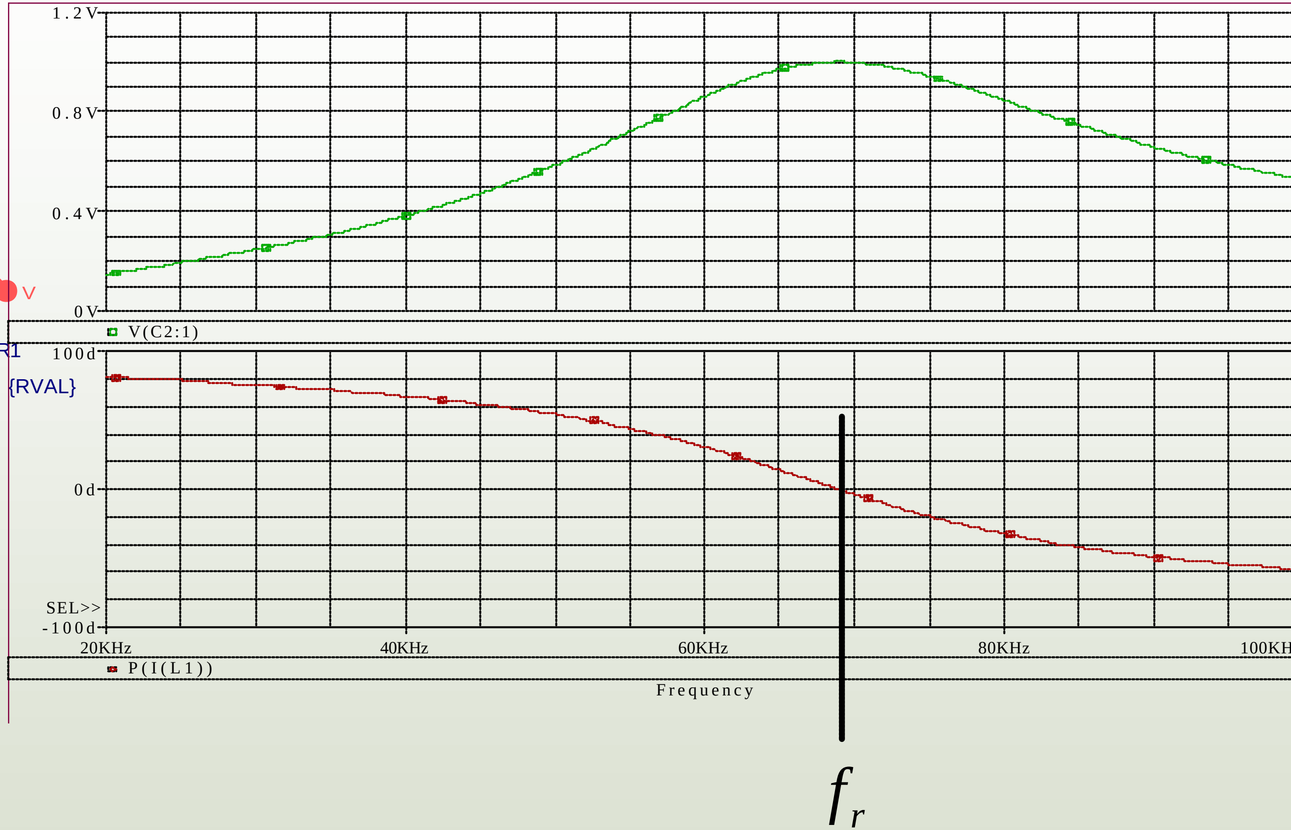
Diagrama de bode $\dfrac{\hat{v}_{lamp}}{\hat{f}_s}$



Pequeña señal (XI)

Obtención de f_1





$$f_1 \approx \left| f_s - f_r \right|$$

Incluso modelando la lámpara como R_{lamp} f_1 cambia mucho con el envejecimiento

References

[1] Yan Yin, Regan Zane, John Glaser and Robert Erickson. Small Signal Analysis of Frequency-Controlled Electronic Ballast. IEEE Trans. on Circuit and Systems – I: Fundamental Theory and Applications. Vol. 50, No.8 August 2003. pp.1103-1110.

[2] Yan Yin, Regan Zane, John Glaser and Robert Erickson. Direct Modeling of Envelope Dynamics in Resonant Converters. Proc. of the IEEE PESC pp1313-1318.