



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Diego Andrés Cisternas Herrera

**Armónicas en Sistemas de Baja
Tensión**

Trabajo N°3

Profesor Sr. Domingo Ruiz Caballero



Escuela de Ingeniería Eléctrica



Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo proyectar y simular un emulador resistivo (basado en el convertidor Boost) y un filtro activo de potencia (basado en inversor alimentado en tensión de 2 niveles). Los cuáles serán aplicados a solo una fase de los sistemas ya analizados en los trabajos 1 y 2, logrando obtener en el PCC factor de potencia unitario y distorsión armónica cercana a cero. Para ambos filtros activos se realizará el circuito de control de lazo de corriente por corriente media.

Índice general

Introducción.....	1
1 Emulador Resistivo	2
1.1 Cálculo de parámetros.....	3
1.1.1 Cálculo de parámetros convertidor Boost	3
1.1.2 Cálculo de parámetros del lazo de Control	4
1.1.3 Diagrama de Bode del lazo de control.....	5
1.2 Formas de onda de Simulación	6
2 Filtro Activo	10
2.1 Cálculo de parámetros.....	10
2.1.1 Cálculo de parámetros del inversor	10
2.1.2 Cálculo de parámetros del lazo de Control	11
2.2 Formas de onda de Simulación	12
2.3 Adicionamiento de otra Carga.....	15
Discusión y conclusiones.....	17
Bibliografía	18

Introducción

En la mayoría de los sistemas se encuentran presentes cargas con naturaleza no-lineal que resultan en contenido armónico no deseado para la fuente, por lo cual en este trabajo se estudiará la solución a este problema mediante a la implementación de filtros tipo activos los cuales tienen la particularidad de llevar una lazo de control, más específicamente en este informe se desarrollará el control por corriente media.

Primero se implementará el emulador resistivo el cual está basado en el convertidor Boost, el cual se aplica a cargas tipo fuente de tensión, y se implementa “después” de la rectificación en la carga.

Luego se trabajará con filtro activo basado en el inversor de dos niveles de tensión, el cual tiene la particularidad de poder ser implementado ante cualquier tipo de carga, se dispone en paralelo a las cargas y a la fuente, y su principal función es disponer del contenido armónico que solicite la carga, dejando que la fuente trabaje con formas de onda en la fundamental.

Ambos filtros activos tienen la “misión” de dejar a la fuente trabajando con factor de potencia cercano al unitario y con distorsión armónica lo más cercana a cero posible.

1 Emulador Resistivo

El emulador resistivo basado en el convertidor Boost será aplicado a la ‘peor’ fase del Sistema 2 de la tarea 1 (sistema con carga tipo fuente de tensión). Por tanto para seleccionar la peor de ellas es que se presenta a continuación la Tabla 1-1 especificando el THDi, THDv y Factor de Potencia para cada una de las fases del sistema sin intervenir, obtenidas de PSIM.

Tabla 1-1: THD en el PCC de sistema 2

	Fase A	Fase B	Fase C
THDi	109%	75.9%	106%
THDv	5.88%	13.4%	5.53%
FP	0.667	0.749	0.677

En base a los resultados obtenidos de la Tabla 1-1 se puede observar que la **Fase A** es la que presenta mayor distorsión en la corriente y el peor factor de potencia, por tanto esta es seleccionada para proyectar el filtro activo.

Del enunciado del problema se tiene para proyectar el convertidor Boost lo siguiente:

$$V_o = 550 [V]$$

$$F_s = 15000 [Hz]$$

$$\eta = 0.95 [-]$$

La parte resistiva de la carga es fija y tiene valor de $25[\Omega]$, la cual será aumentada a $250[\Omega]$, con el fin de suministrar una potencia de valor más bajo, dada por:

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} = \frac{550^2}{250} = 1210[W]$$

1.1 Cálculo de parámetros

Se elige proyectar el emulador resistivo para condición de **conducción continua**.

A continuación se da paso a calcular los parámetros del emulador resistivo y luego del circuito de control, para los cuales se utilizarán las ecuaciones de proyecto vistas en los apuntes del curso.

1.1.1 Cálculo de parámetros convertidor Boost

Se tiene que el inductor Boost está dado por:

$$L_B = \frac{\overline{\Delta I(wt)} \cdot V_p}{\Delta I_{MAX} \cdot F_S}$$

Primero $\overline{\Delta I(wt)}$ se considera el máximo y se debe obtener para:

$$\frac{V_p}{V_o} = \frac{311.127}{550} = 0.565685$$

De los apuntes tenemos la ecuación de $\overline{\Delta I(wt)}$ la cual se grafica en MATLAB para la razón de tensión indicada, obteniendo:

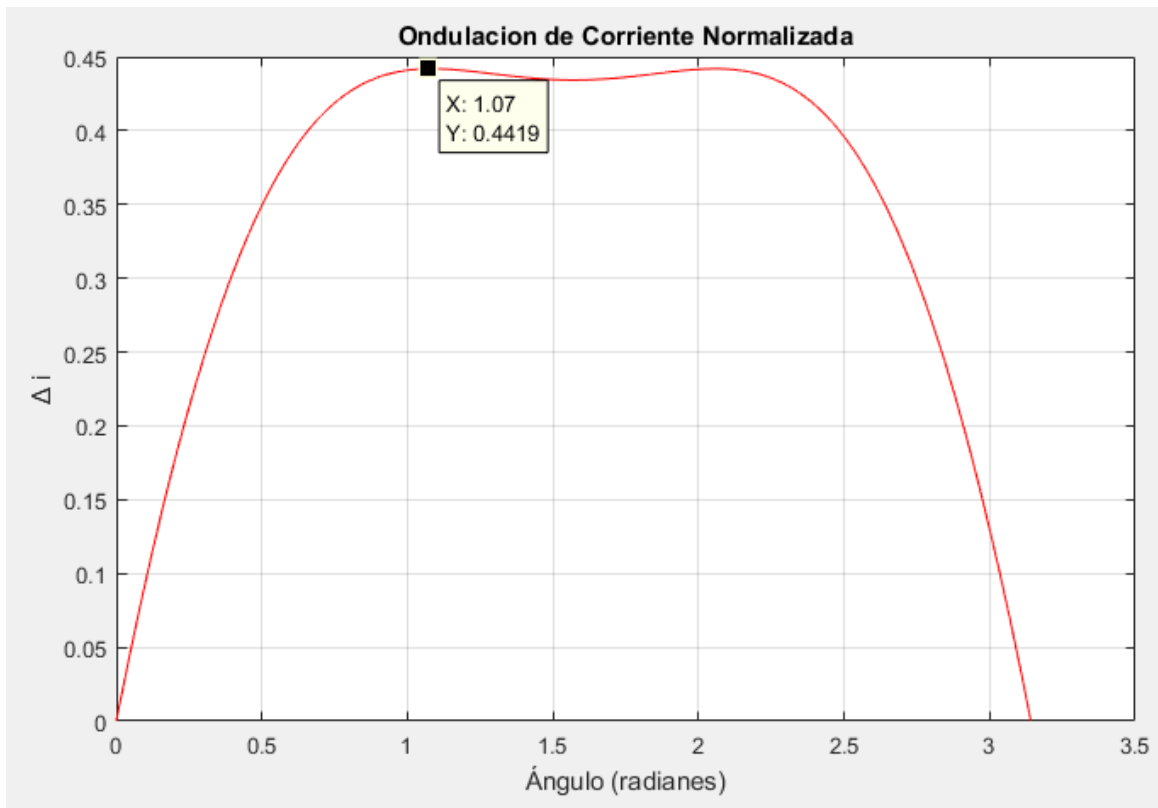


Figura 1-1: Ondulación de corriente normalizada

Observando el máximo podemos plantear la ondulación normalizada para el proyecto como:

$$\overline{\Delta I(wt)} = 0.4419$$

Ahora es necesario encontrar ΔI_{MAX} para el cual se considerará una oscilación del 20% de la corriente peak que circulará por la inductancia Boost, el cálculo se presenta a continuación:

$$I_{1ef} = \frac{P_o}{\eta \cdot V_{1ef}} = \frac{1210}{0.95 \cdot 220} = 5.7895[A_{rms}]$$

$$I_p = I_{1ef} \cdot \sqrt{2} = 8.1875[A]$$

Entonces:

$$\Delta I_{MAX} = I_p \cdot 0.2 = 1.6375[A]$$

Ahora teniendo los datos, se calcula la inductancia del convertidor Boost:

$$L_B = \frac{0.4419 \cdot 311.127}{1.6375 \cdot 15000} = 5.597[mH]$$

Como la Fase presenta una capacitancia fija de $1.7[mF]$, a partir de esta se calcula la ondulación de tensión para ver si está dentro de un valor aceptable:

$$\Delta V_o = \frac{P_o}{2\pi \cdot f_s \cdot V_o \cdot C} = \frac{1210}{2\pi \cdot 100 \cdot 550 \cdot (1.7 \cdot 10^{-3})} = 2.059[V]$$

La ondulación de tensión que se espera en la carga es muy baja, esto se debe a que el valor de capacitancia es muy alto. Por lo tanto con la propia capacitancia de la carga ya es suficiente para tener baja ondulación porcentual de 0.37%.

1.1.2 Cálculo de parámetros del lazo de Control

Primero será necesario calcular las frecuencias angulares definidas como w_p , w_z y w_i , las cuales serán utilizadas según el criterio descrito a continuación:

- w_p se ubica a la mitad de la frecuencia del interruptor:

$$w_p = 2\pi \cdot \frac{F_s}{2} = 2\pi \cdot \frac{15000}{2} = 47123.9[rad/s]$$

- w_z se ubica una década bajo la frecuencia del interruptor:

$$w_z = 2\pi \cdot \frac{F_s}{10} = 2\pi \cdot \frac{15000}{10} = 9424.78[rad/s]$$

- w_i se ubica a 70% de w_p :

$$w_i = 0.7 \cdot w_p = 0.7 \cdot 47123.9 = 32986.7[rad/s]$$

Si se considera un valor de $R_f = 40[K\Omega]$, obtenemos la capacitancia C_{fz} como:

$$C_{fz} = \frac{1}{R_f \cdot w_z} = \frac{1}{40000 \cdot 9424.78} = 2652.58[pF]$$

Luego la capacitancia C_{fp} :

$$C_{fp} = \frac{C_{fz}}{R_f \cdot C_{fz} \cdot w_p - 1} = \frac{2.6526 \cdot 10^{-9}}{40000 \cdot 2.6526 \cdot 10^{-9} \cdot 47123.9 - 1} = 663.1[pF]$$

Continuando, ahora se calcula R_1 :

$$R_1 = \frac{1}{w_i \cdot (C_{fz} + C_{fp})} = \frac{1}{32986.7 \cdot (2.6526 + 0.6631) \cdot 10^{-9}} = 9142.86[\Omega]$$

Se realizará la consideración que se sugiere en los apuntes de tomar $R_i = R_1 = 9142.86[\Omega]$.

Además se usará una fuente de corriente sinusoidal de amplitud peak $I_x = 90[\mu A]$, frecuencia 50[Hz] y sin desfase, para ser rectificadora y llegar a la entrada no inversora del amplificador operacional.

Luego se calcula R_{sh} :

$$R_{sh} = \frac{I_x \cdot R_i}{I_p} = \frac{90 \cdot 10^{-6} \cdot 9142.86}{8.1875} = 0.1005[\Omega]$$

1.1.3 Diagrama de Bode del lazo de control

Una vez calculado todos los parámetros se hace uso de MATLAB para graficar el diagrama de Bode del lazo de control de corriente, para ello se escribe la función de transferencia como se muestra en el código:

```
1 - clear all
2 - clc
3
4 - wi=32986.7;
5 - wz=9424.78;
6 - wp=47123.9;
7 - H=tf([wi/wz wi],[1/wp 1 0]);
8 - bode(H)
```

Figura1-2: Código MATLAB para graficar función de transferencia.

Corriendo el código se obtiene el diagrama mostrado a continuación en la Figura 1-3:

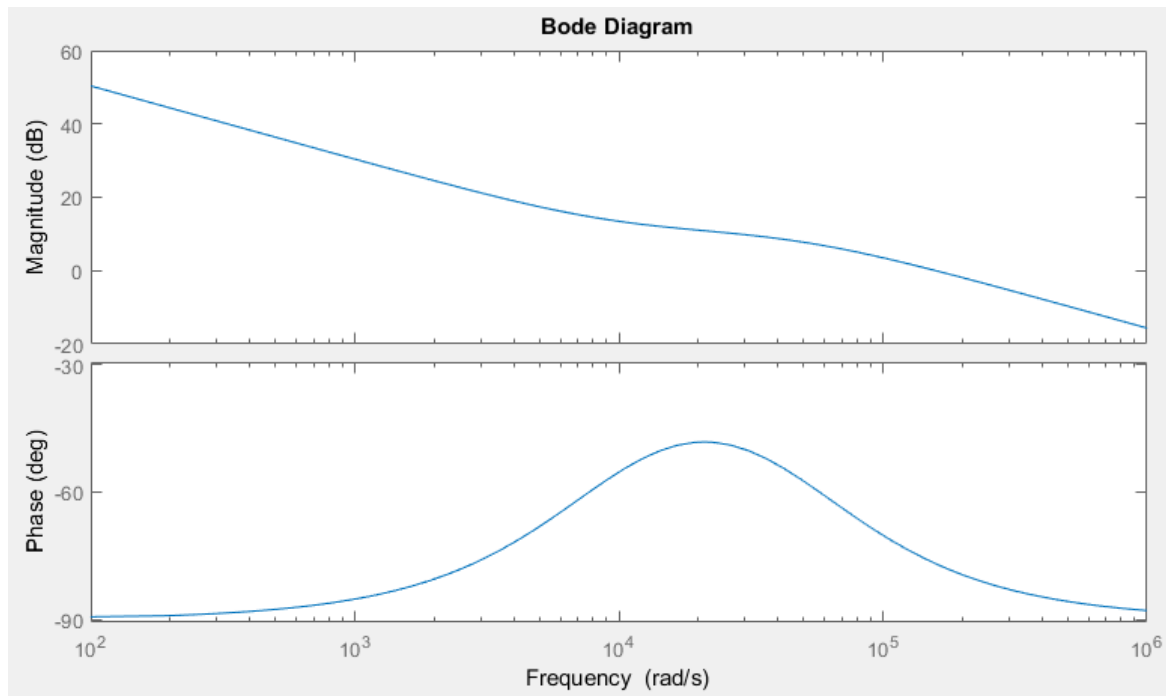


Figura1-3: Diagrama de Bode del lazo de control

Del diagrama se puede observar a grueso modo la ubicación del polo y cero de la función de transferencia, ubicados cualitativamente en 1 [KHz] y 100 [KHz].

1.2 Formas de onda de Simulación

Primero se presenta el circuito en el software PSIM, del cual se obtendrán las formas de onda de tensión y corriente en el PCC (especificando THD y FP), además de la tensión a la Salida del convertidor Boost que conforma el Emulador Resistivo y por último las señales que llegan al comparador que entrega los pulsos de comando al interruptor.

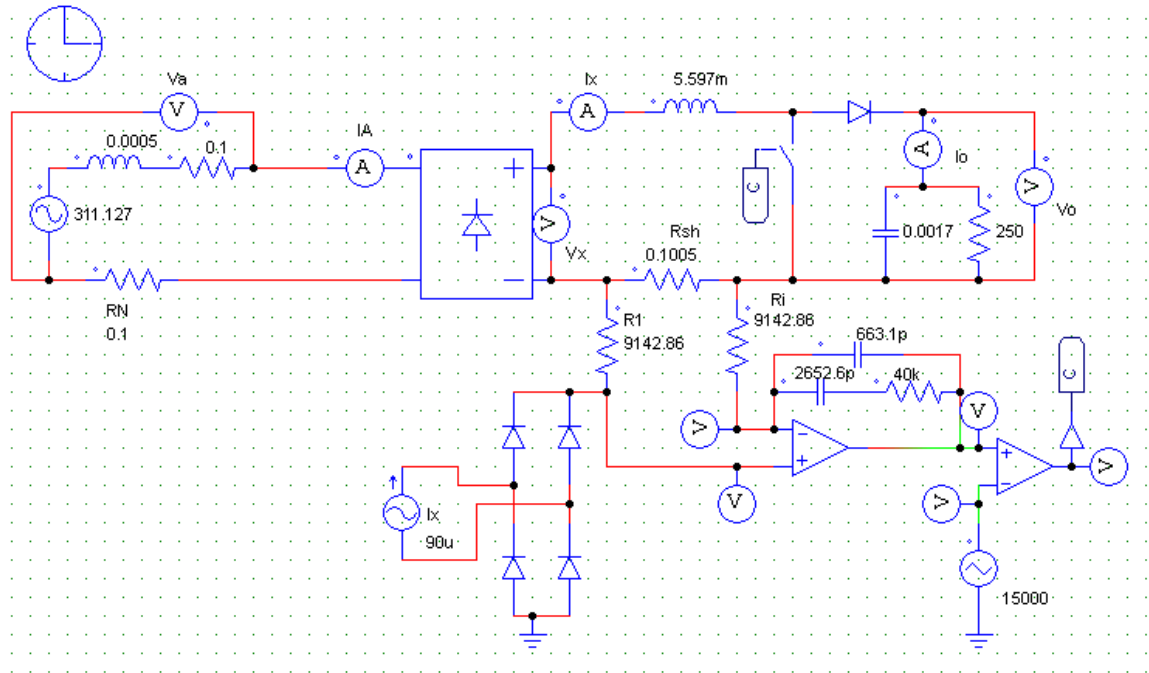


Figura 1-4: Sistema con Emulador Resistivo y los parámetros proyectados en PSIM.

De la simulación se obtuvo las formas de onda en el PCC, como se muestran:

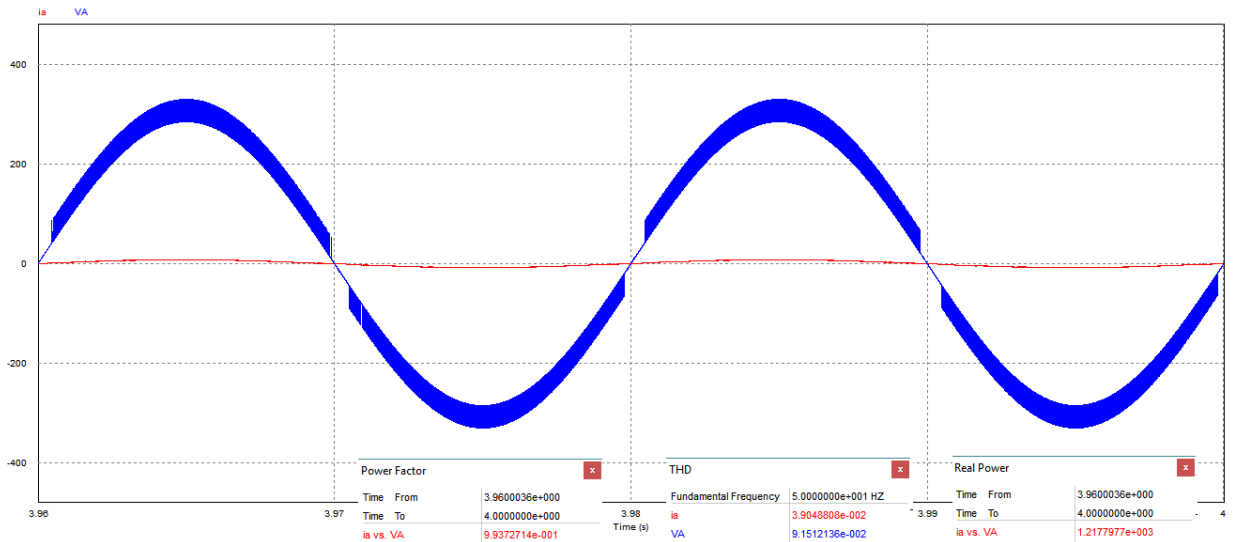


Figura 1-5: Formas de Onda PCC con THD y FP

Como se puede observar de la imagen el Factor de potencia es muy cercano a unitario siendo 0.994[-]. El THD de tensión es del 9.15% y se atribuye la distorsión a la circulación de corriente por la impedancia de la fuente. Y el THD de corriente es del 3.9%. Ambos valores de THD son bastante bajos cercanos a cero.

Además en la Figura 1-5 se especifica la potencia activa en el PCC y corresponde a 1217[W], por tanto se concluye que el control actúa como se espera.

Ahora se presenta con más detalle la forma onda de la corriente en el PCC:

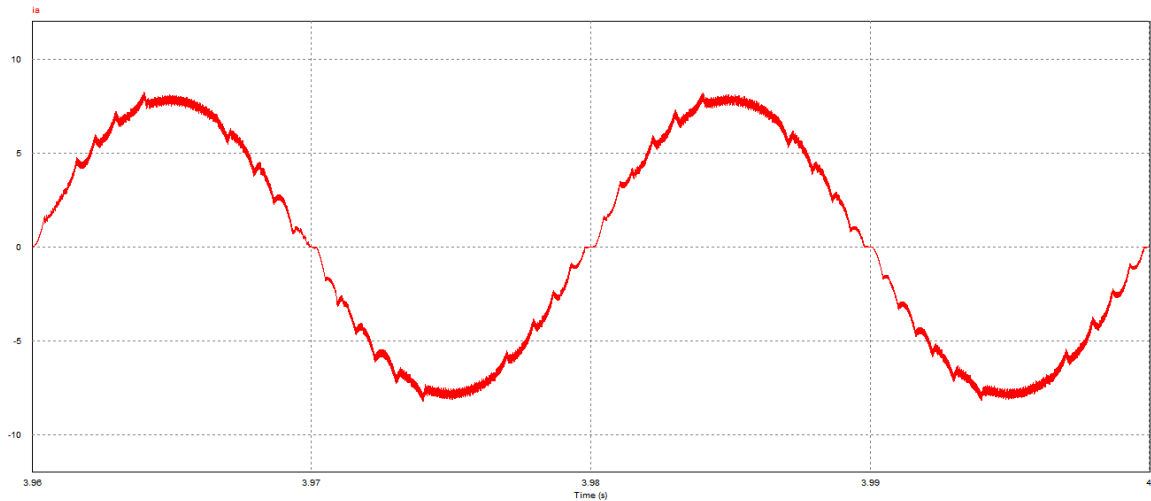


Figura 1-6: Forma de onda de corriente en el PCC.

En la Figura 1-6 se puede apreciar contenido armónico de alta frecuencia en la corriente, adicionalmente la forma de onda presenta una ‘mancha’ correspondiente a la señal triangular propia del control de corriente media.

Ahora se muestra la tensión a la salida del convertidor Boost:

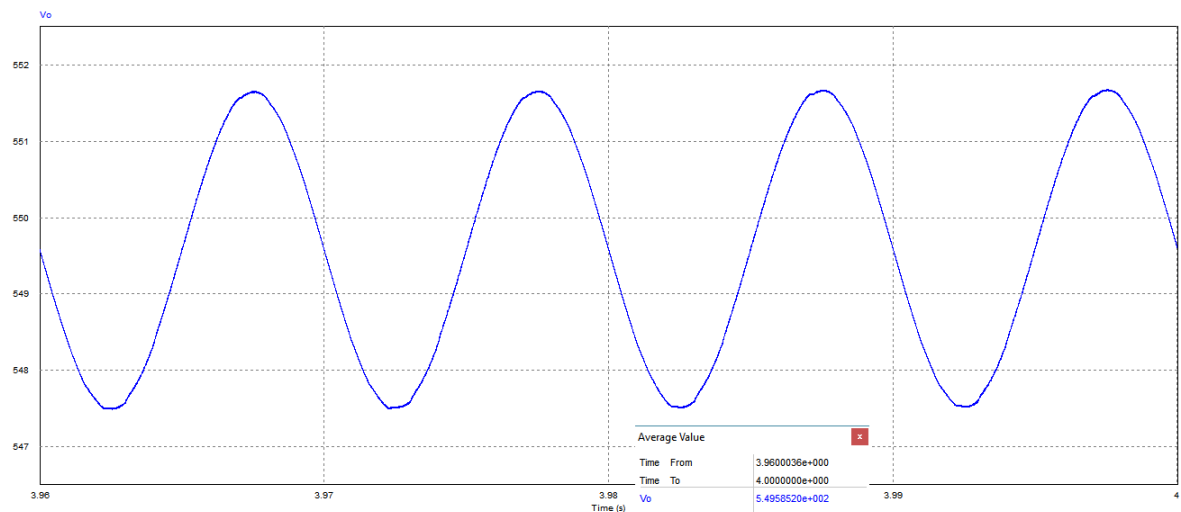


Figura 1-7: Tensión a la salida del convertidor Boost.

El valor medio de la tensión a la salida del convertidor Boost corresponde a 549.5V, el cual presenta un error mínimo respecto a 550V. Se concluye que el control aunque no es perfecto, se encuentra en un nivel aceptable. Además la ondulación de tensión es la esperada.

Por último se presentan las formas de onda correspondientes a la comparación realizada entre la moduladora y la portadora, y su salida correspondiente que son los pulsos de comando para el interruptor del convertidor Boost:

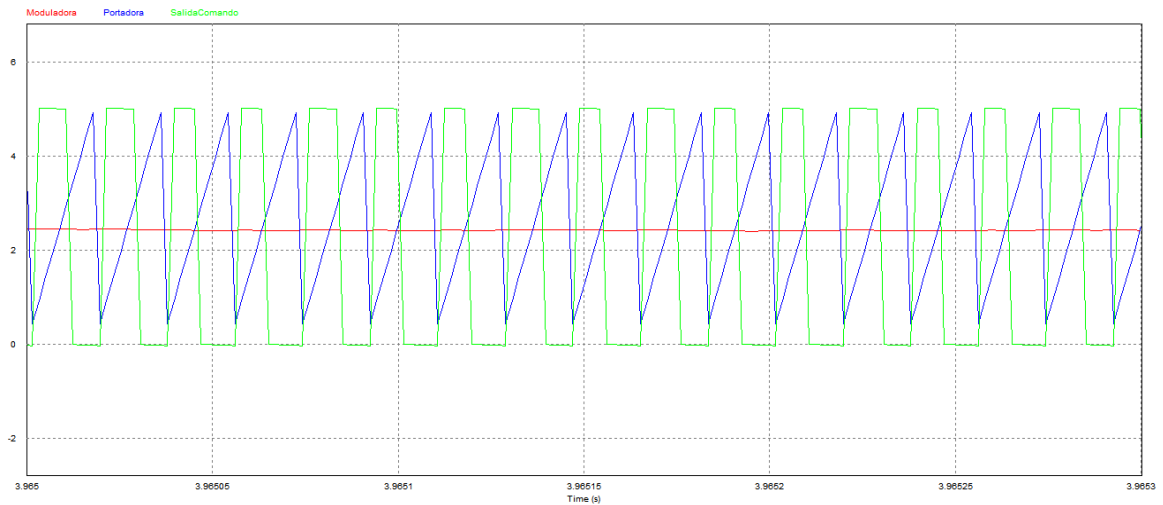


Figura 1-9: Resultado de comparación de señales.

Como se puede observar la 'SalidaComando', es correspondiente a la intercepción de la moduladora y la portadora, generando así los pulsos de accionamiento del interruptor del convertidor Boost.

2 Filtro Activo

El filtro activo basado en el inversor de 2 niveles será aplicado a una de las fases del Sistema 1 de la tarea 1 (sistema con carga tipo fuente de corriente), la cual presenta una rectificación por medio de puente de tiristores con **ángulo de disparo 65°** , para la cual será considerada una **resistencia en la carga de valor $20[\Omega]$** y se mantendrá el valor inductivo de **$10[mH]$** el cual al presentar elevado valor provoca el funcionamiento tipo fuente de corriente.

Del enunciado del problema se tiene para proyectar el inversor de dos niveles lo siguiente:

$$V_o = 350 [V]$$

$$F_s = 40000 [Hz]$$

$$\eta = 0.95 [-]$$

Se fijará una potencia de $2000[W]$ para proyectar los cálculos de los parámetros que conforman el filtro activo:

$$P_o = 2000[W]$$

2.1 Cálculo de parámetros

Se da paso a calcular los parámetros que conforman el circuito del inversor y luego del circuito de control, para ambos casos se utilizarán las ecuaciones vistas en los apuntes del curso.

2.1.1 Cálculo de parámetros del inversor

Primero se tiene que la inductancia de acoplamiento viene dada por:

$$L_c = \frac{0.25 \cdot V_o}{2 \cdot F_s \cdot \Delta I_{LMAX}}$$

Siendo V_o y F_s conocidas, queda calcular la ondulación de corriente máxima, para lo cual se elige considerar un 20% de i_{1P} . Luego se calcula como:

$$i_{1P} = \frac{2 \cdot P_o}{V_p} = \frac{2 \cdot 2000}{311.127} = 12.86[A]$$

Entonces:

$$\Delta I_{LMAX} = 0.2 \cdot i_{1P} = 0.2 \cdot 12.86 = 2.57[A]$$

Luego se calcula L_c :

$$L_c = \frac{0.25 \cdot 350}{2 \cdot 40000 \cdot 2.57} = 426[\mu H]$$

2.1.2 Cálculo de parámetros del lazo de Control

Primero será necesario calcular las frecuencias angulares definidas como w_p , w_z y w_i , las cuales serán utilizadas según el criterio descrito a continuación:

- w_p se ubica a la mitad de la frecuencia del interruptor:

$$w_p = 2\pi \cdot \frac{F_s}{2} = 2\pi \cdot \frac{40000}{2} = 125664[rad/s]$$

- w_z se ubica una década bajo la frecuencia del interruptor:

$$w_z = 2\pi \cdot \frac{F_s}{10} = 2\pi \cdot \frac{40000}{10} = 25132.7[rad/s]$$

- w_i se ubica a 70% de w_p :

$$w_i = 0.7 \cdot w_p = 0.7 \cdot 125664 = 87964.6[rad/s]$$

Si se considera un valor de $R_f = 40[K\Omega]$, obtenemos la capacitancia C_{fz} como:

$$C_{fz} = \frac{1}{R_f \cdot w_z} = 994.72[pF]$$

Luego la capacitancia C_{fp} :

$$C_{fp} = \frac{C_{fz}}{R_f \cdot C_{fz} \cdot w_p - 1} = 248.68[pF]$$

Continuando, ahora se calcula R_1 :

$$R_1 = \frac{1}{w_i \cdot (C_{fz} + C_{fp})} = 9142.86[\Omega]$$

Se realizará la consideración que se sugiere en los apuntes de tomar $R_i = R_1 = 9142.86[\Omega]$.

Además se usará una fuente de corriente sinusoidal de amplitud peak $I_x = 90[\mu A]$, frecuencia 50[Hz] y sin desfase.

Luego se calcula R_{sh} :

$$R_{sh} = \frac{I_x \cdot R_i}{I_p} = \frac{90 \cdot 10^{-6} \cdot 9142.86}{12.86} = 0.063986[\Omega]$$

2.2 Formas de onda de Simulación

Primero se presenta el circuito en el software PSIM, del cual se obtendrán las formas de onda de tensión y corriente en el PCC (especificando THD y FP), además de la tensión y corriente en la carga RL, las señales que llegan a uno de los comparadores del control para el PWM y por último la corriente que inyecta al sistema el inversor.

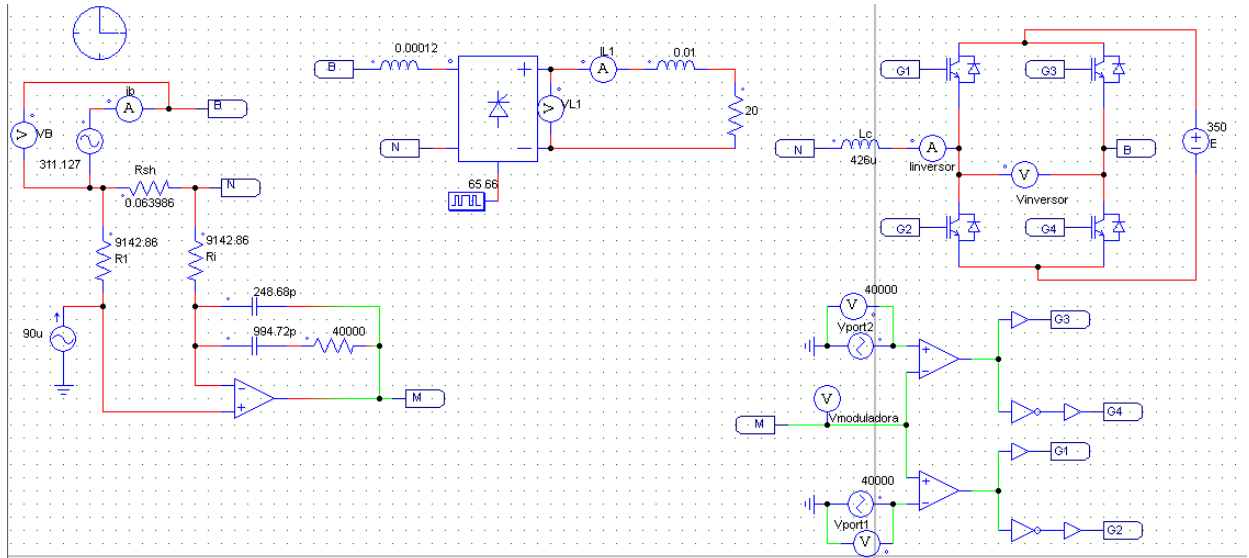


Figura 2-1: Sistema con Filtro Activo y los parámetros proyectados en PSIM.

De la Simulación se obtuvo las formas de onda de tensión y corriente en la fuente:

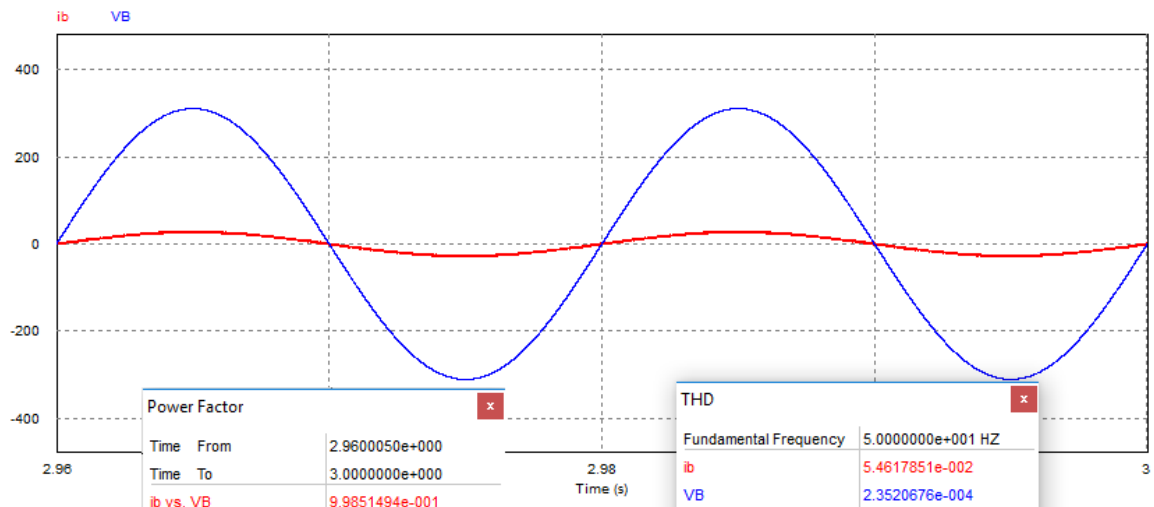


Figura 2-2: Formas de onda en la fuente con THD y FP.

Como se puede observar el factor de potencia es prácticamente unitario, alcanzando un valor de 0.9985[–]. Se puede apreciar que la tensión es prácticamente sinusoidal con THD

bajísimo cercano a cero. La corriente presenta un THD del 5.46%, bastante bajo y corresponde a el ruido en alta frecuencia característico del control por corriente media.

Se además muestra de forma más detallada la forma de onda de la corriente:

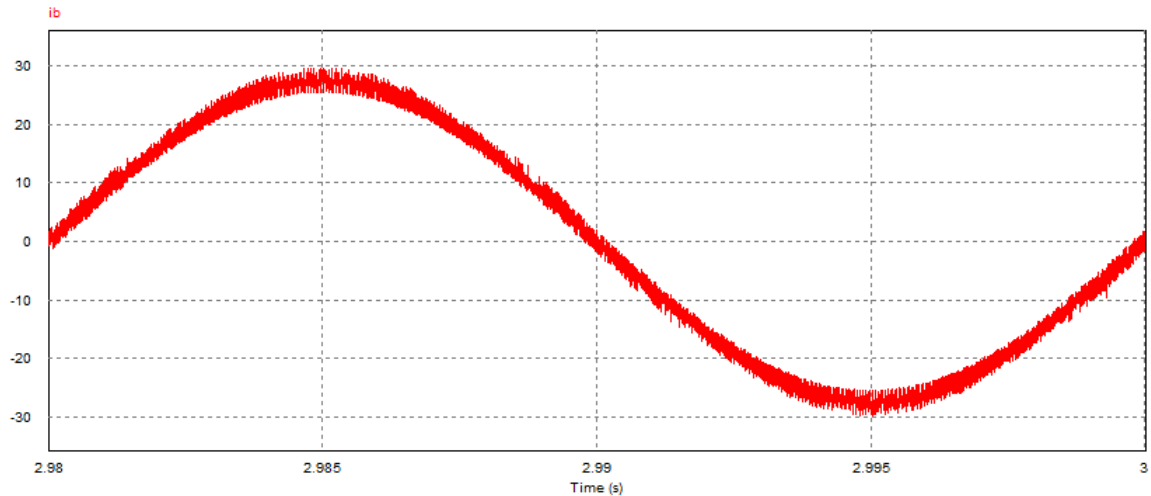


Figura 2-3: Forma de onda corriente en la Fuente.

Se puede observar con más detalle la corriente y su comportamiento, tal como es esperado.

A continuación se muestran las formas de onda de tensión y corriente en la carga RL del puente tiristorizado disparado en 65°:

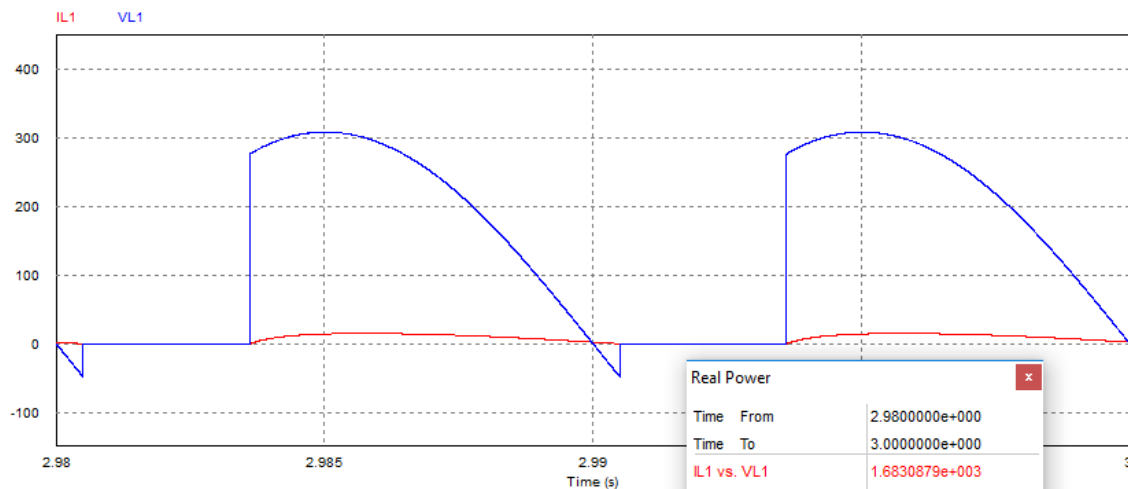


Figura 2-4: Formas de onda en la carga RL del puente tiristorizado.

Se puede notar que la potencia suministrada a la carga corresponde a 1683[W], por tanto al agregar otras cargas, hay que cuidar no exceder mucho la potencia debido a que se proyectó los parámetros para 2000[W].

Luego se muestran las señales moduladora y portadora que llegan al comparador para obtener los pulsos que van hacia los interruptores IGBT que conforman uno de los brazos del inversor:

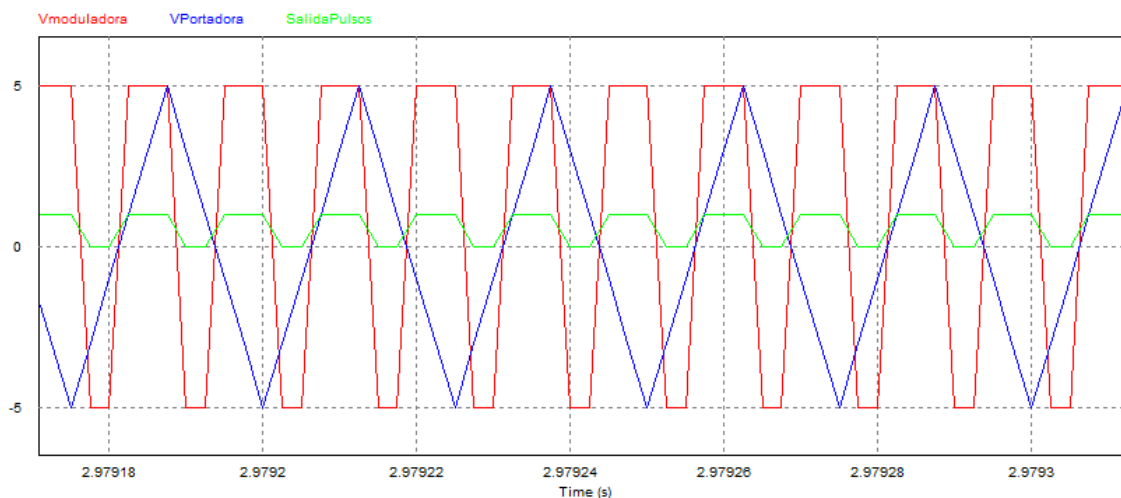


Figura 2-5: Comparación de uno de los comparadores.

Se puede observar la Salida de pulsos en verde, que resulta de las intercepciones de la señal moduladora y portadora, la cual genera los pulsos que van a los IGBT de uno de los brazos del inversor.

Finalmente se presenta la corriente que inyecta el inversor al sistema:

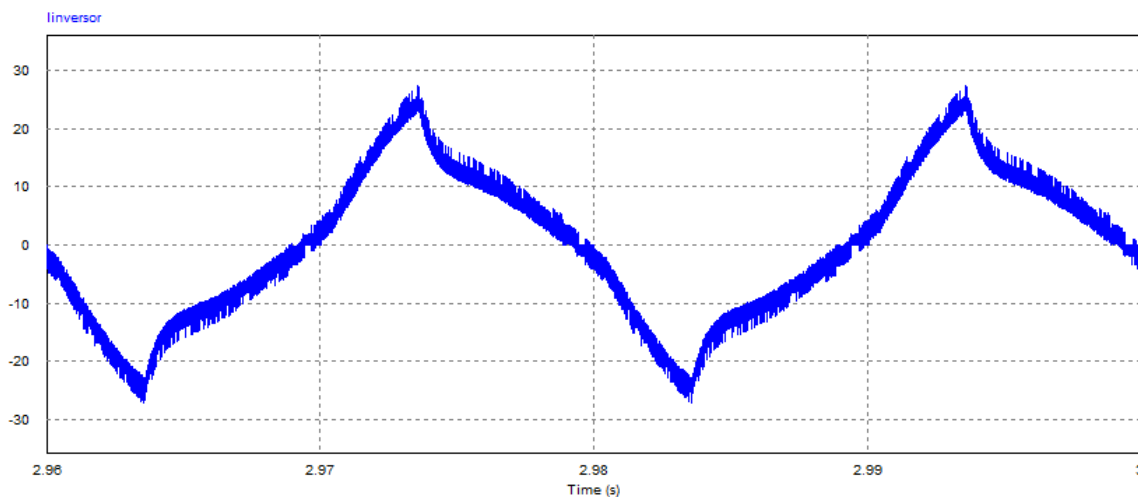


Figura 2-6: Corriente inyectada por el inversor al sistema.

Como se puede observar, el inversor inyecta la corriente armónica que necesita la carga, de modo que la corriente que aporta la fuente es casi puramente sinusoidal.

2.3 Adicionamiento de otra Carga

Se adiciona en paralelo una carga RC la cual se muestra a continuación:

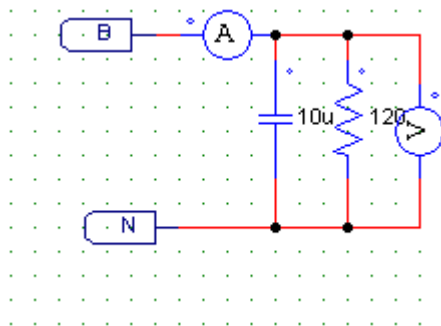


Figura 2-7: Carga RC adicionada en paralelo.

Se mostrarán las formas de onda de tensión y corriente en la fuente, especificando el THD y FP, las formas de onda de tensión y corriente en la carga RC y su respectiva potencia. Se espera que al adicionar otra carga, el control se encargue de lograr factor de potencia unitario y distorsión armónica cero para la fuente.

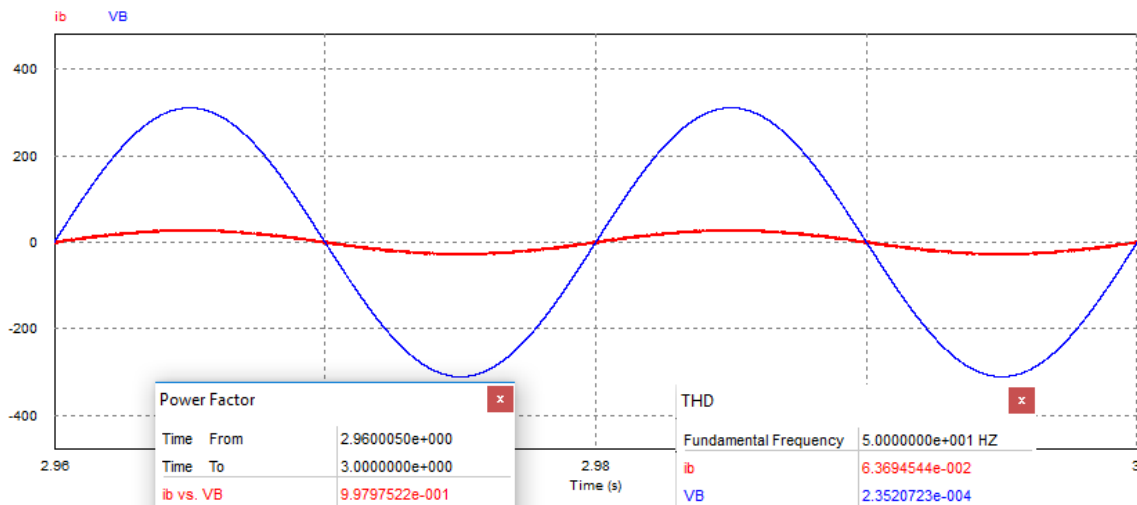


Figura 2-8: Tensión y corriente en la fuente, con THD y FP.

El THD de la corriente es 6.36%, un valor muy bajo, o sea que es prácticamente sinusoidal. El factor de potencia logrado es 0.998[–], por tanto el control cumple con su correcto funcionamiento.

Luego se muestra la forma de onda en la carga RC adicionada:

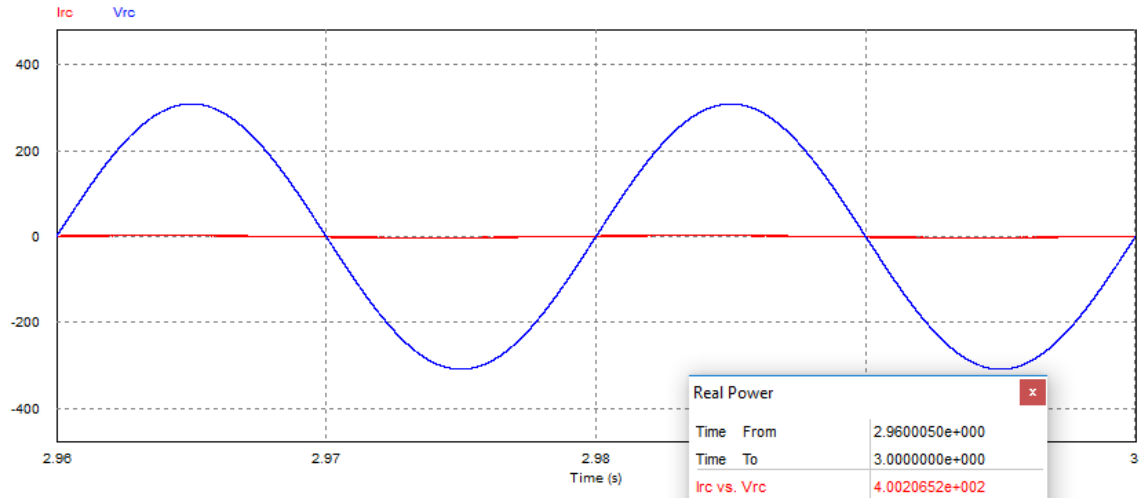


Figura 2-9: Tensión y corriente en la carga RC con Potencia activa.

Se puede observar que la potencia de la carga es $400[W]$, la cual si la sumamos con la potencia suministrada a la carga tipo fuente de corriente resulta $2083[W]$, excediendo levemente la potencia usada para proyectar los parámetros, pero funciona de forma satisfactoria.

Discusión y conclusiones

El cálculo de los parámetros para los filtros resulta mucho más sencillo que la implementación de filtros pasivos, pero el control requerido debe ser fino y rápido para lograr los efectos deseados sobre el sistema. Además viéndolo desde un punto de vista económico es que la implementación de filtros activos resulta más costoso.

Para ambas configuraciones activas se logró satisfactoriamente obtener la corriente casi sinusoidal para la fuente y con un factor de potencia prácticamente unitario.

Se pudo observar la corriente en la fuente ambos casos, obedecía la forma particular del control por corriente media visto en los apuntes del curso.

El filtro activo presenta ventaja frente al emulador resistivo al poder ser aplicado a distintas cargas y de distinta naturaleza, además de que no se requirió una re-cálculo de los parámetros al momento de agregar una carga adicional.

Para ambos casos de control, la forma de onda de la moduladora es obtenida del lazo de control, por tanto la proyección de los parámetros resulta fundamental para poder obtener una comparación que nos lleve a pulsos de comandos que logren una operación de los interruptores que nos lleven a buen funcionamiento de los convertidores implementados.



Bibliografía

[1] D. Ruiz Caballero, Armónicas en sistemas de baja tensión, Valparaíso, 2018.