

Capítulo 6

Resultados de simulación usando el control difuso

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan las simulaciones realizadas correspondientes al convertidor multinivel apilable; las simulaciones se realizaron con el software PSIM, esto con el fin de validar el funcionamiento del sistema de control de lazo cerrado. Se presenta el circuito y los parámetros para su simulación en lazo abierto, a continuación la simulación del sistema de control basado en lógica difusa el cual se aplicará en el lazo cerrado, posteriormente la programación del control en lógica difusa y por último el diseño completo del SMC aunado al control en lazo cerrado así como los resultados del mismo. Los análisis se realizaron a variaciones de carga (resistiva) y voltaje de entrada.

6.2 Parámetros del SMC para su simulación

El circuito SMC que se usó para la simulación se presenta en la Figura 6.1, dicho circuito presenta los filtros de balance y salida (mencionados en el capítulo 2), así como los capacitores flotantes, los cuales se obtuvieron con la Ecuación 2.6.

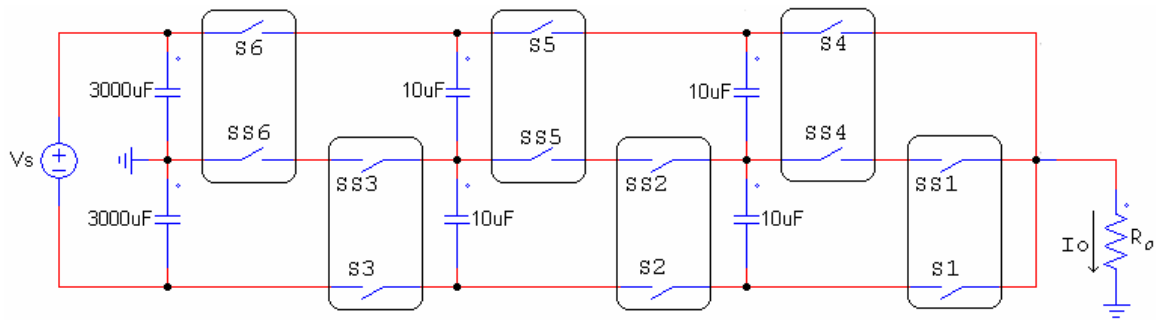


Figura 6.1 Convertidor multinivel apilable de 3X2.

Los parámetros que maneja el SMC para su funcionamiento en lazo abierto, se muestran en la tabla 6.1

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada (V_s)	100 V_{CD}
Frecuencia de conmutación (F_s)	20 KHz
Voltaje de salida (V_o)	35.35 V_{CA}
Frecuencia del voltaje de salida	60 Hz
Resistencia de carga (R_o)	266 Ω

Tabla 6.1 Parámetros del prototipo de simulación.

En la Figura 6.2 y 6.3 se muestra el voltaje y la corriente de salida del SMC de 3X2 para una carga resistiva sin filtros de balance y salida.

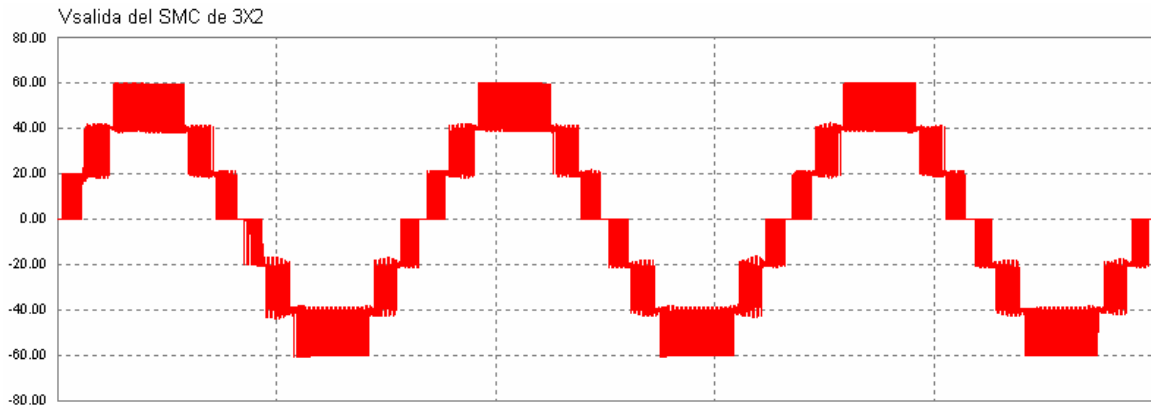


Figura 6.2. Voltaje de salida del SMC de 3X2.

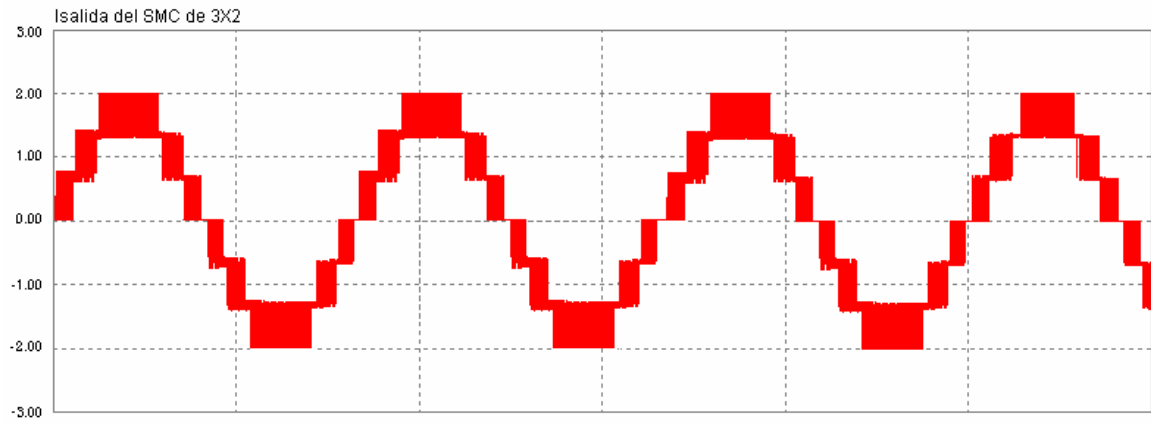


Figura 6.3 Corriente de salida del SMC de 3X2.

Ahora, para los filtros de salida y balance se obtuvieron los siguientes resultados:

Parámetro	Valor
Inductor de salida (Lo)	4.375mH
Capacitor de salida (Co)	33nF
Resistencia de balance	1 Ω
Inductancia de balance	79.58uH
Capacitor de balance	795.7nF

Tabla 6.2 Parámetros de los filtros de salida y balance

A partir de dichos valores calculados, se tiene que el voltaje y la corriente de salida son como se muestran en las Figuras 6.4 y 6.5.

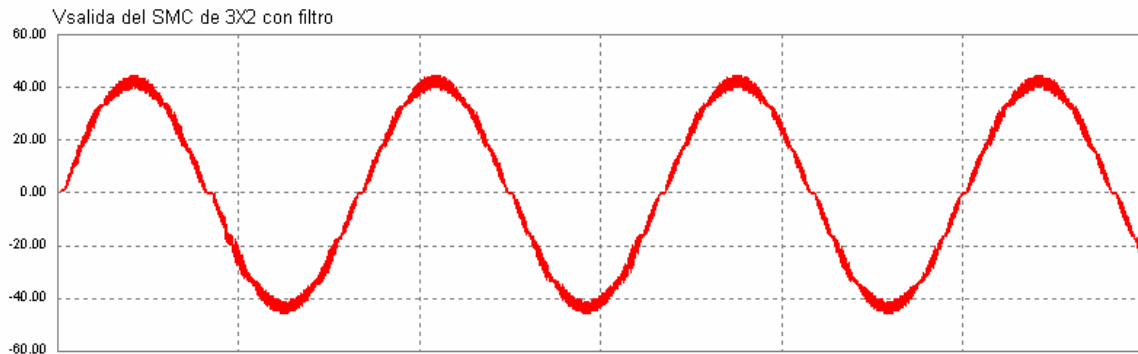


Figura 6.4 Corriente de salida del SMC de 3X2 con filtro de salida

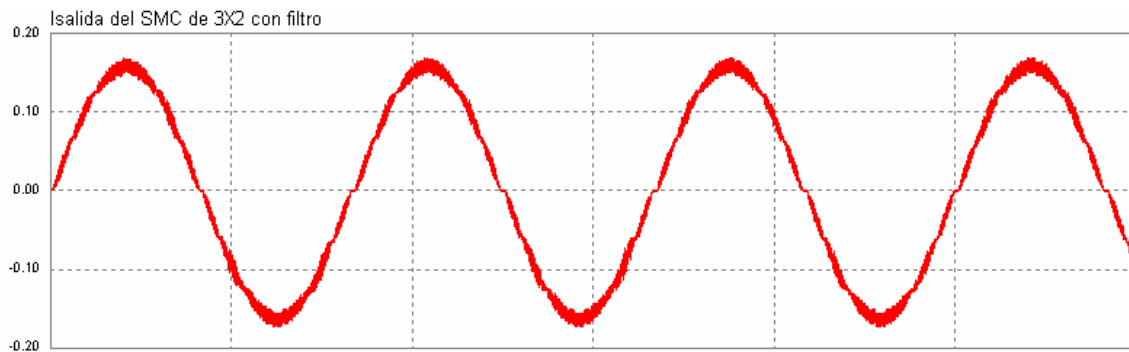


Figura 6.5 Corriente de salida del SMC de 3X2 con filtro de salida

6.3 Resultados del Toolbox de Matlab

La interfase gráfica que ofrece el Matlab para el tema de control difuso, presenta un apartado en el cual se muestra la visualización de los valores de entrada, la inferencia y defusificación de manera amigable, esta interfase ayuda a comprobar qué tanto se aproxima el control creado con el sistema que uno desea controlar. Observe que la Figura 6.6 muestra dicha interfase.

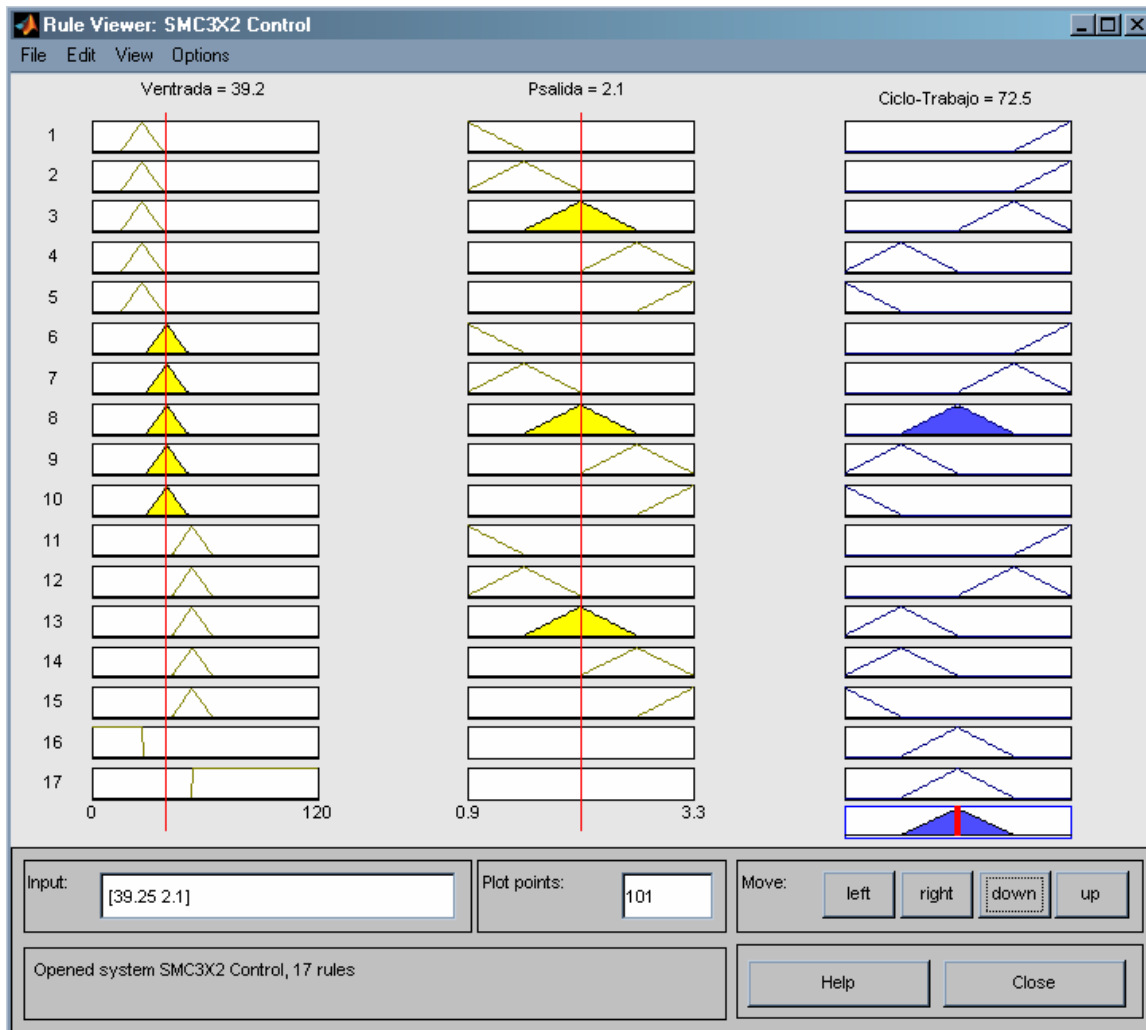


Figura 6.6 Visualizador de reglas de “Toolbox Fuzzy”.

Se observa en la Figura 6.6 que existen 3 columnas, cada una corresponde a una variable, las primeras dos corresponden a las variables de entrada y la última variable a la de salida. Cada una de las reglas para la inferencia se enumera de lado izquierdo, por lo que se busca que se cumplan la base de conocimientos de la Tabla 4.1.

Por ejemplo para un voltaje de entrada “nominal” y una potencia de salida “muy baja” será necesario un ciclo de trabajo “muy grande”, es todo con el objetivo de poder alcanzar la potencia de salida nominal; en la Figura 6.7 se muestran las reglas que se activan en el visualizador de reglas.

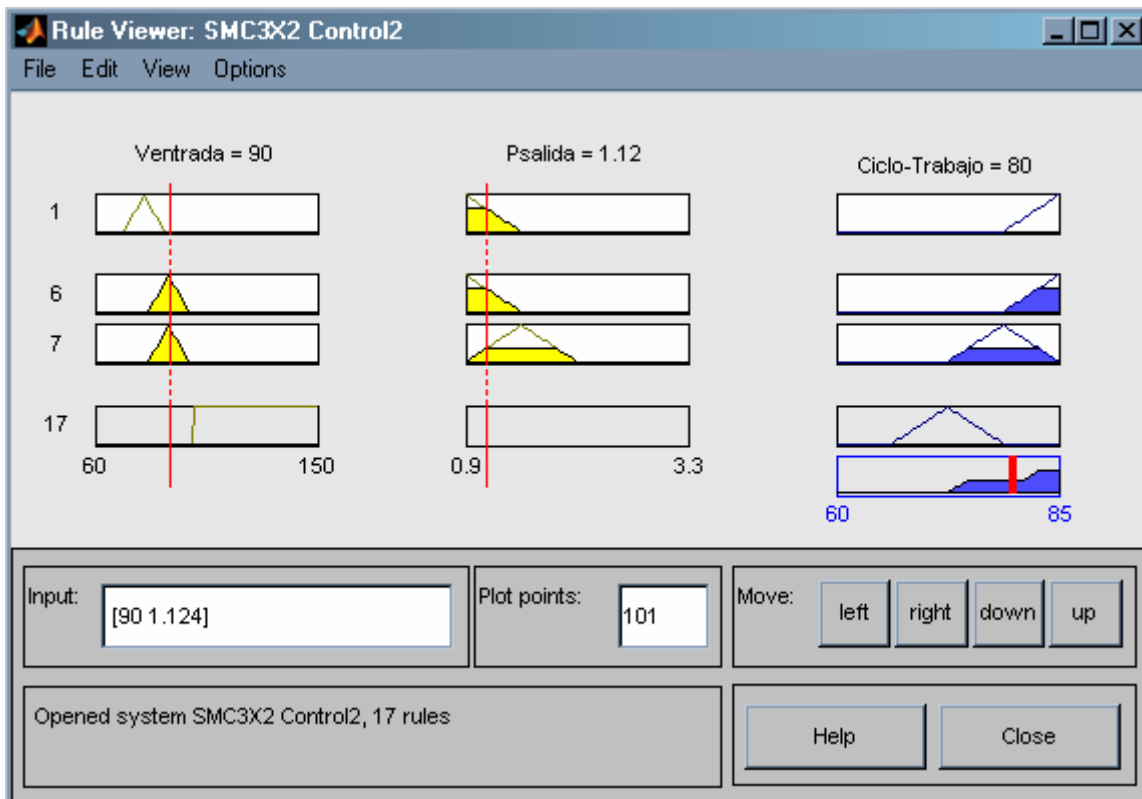


Figura 6.7. Ejemplo para V_{in} “nominal”, P_o “muy bajo” y *Ciclo de trabajo* “muy grande”.

Los términos de muy bajo, bajo, nominal, alto y muy alto, se establecen con base al rango que se esta trabajando.

Ahora, como segundo ejemplo, si el voltaje de entrada fuera “muy alto” y una potencia de salida “nominal” será necesario un ciclo de trabajo “muy grande”, es todo con el objetivo de poder alcanzar la potencia de salida nominal; en la Figura 6.8 se muestran las reglas que se activan en el visualizador de reglas.

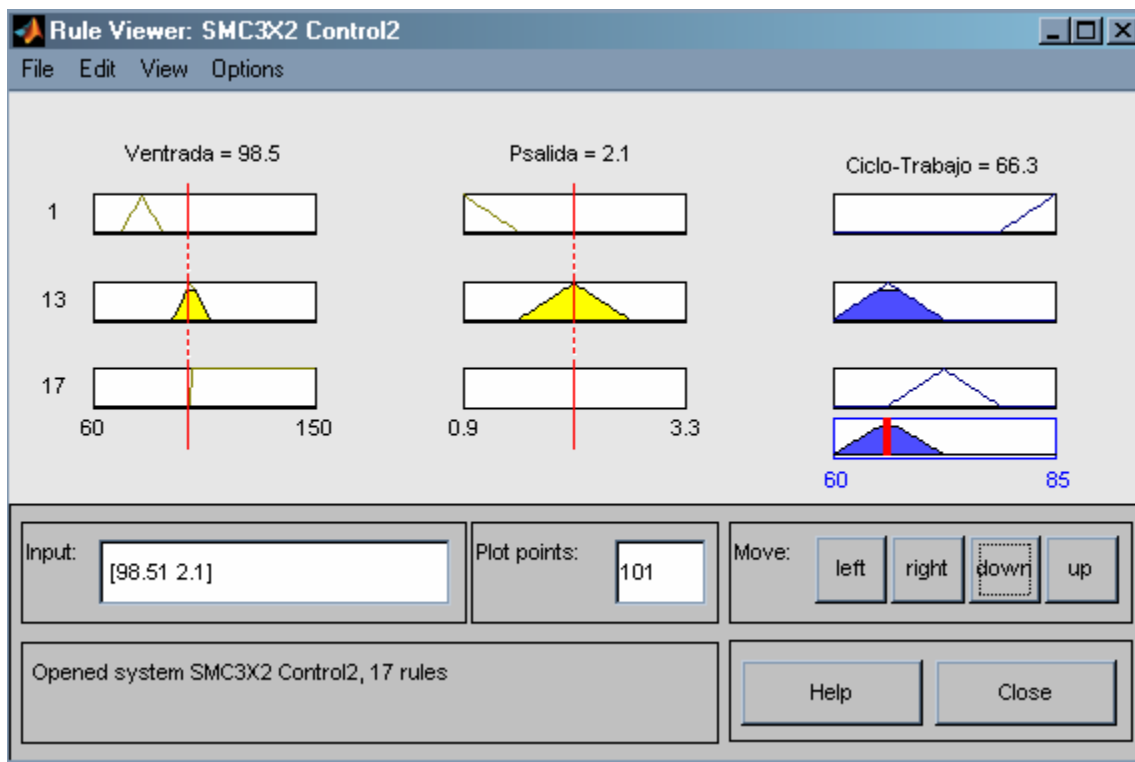


Figura 6.8. Ejemplo para V_{in} “muy alto”, P_o “nominal” y *Ciclo de trabajo* “bajo”.

6.4 Programación del DLL

Una vez que se ha visto que el control difuso cumple con las condiciones deseadas para una planta definida, es necesario crear un sistema que sustituya el control difuso del toolbox de Matlab, por uno que sea capaz de ser incluido en el software PSIM.

Dentro de las múltiples herramientas que cuenta PSIM, existe un elemento el cual puede ser programado en lenguaje C++, dicho elemento se designa como “bloque externo DLL”, el cual, permite programar cualquier tipo de algoritmo matemático, e incluirlo en cualquier diagrama esquemático de un circuito.

La programación debe cumplir algunas condiciones para poder ser compilado y ejecutado por PSIM, dicha serie de reglas se listan en el Apéndice I, por lo que en este apartado sólo se comentará que el archivo DLL se programo con el software Visual C++ y el código se anexo en el Apéndice II.

Para probar el adecuado funcionamiento del archivo DLL se creó un esquemático en PSIM con valores ideales a la entrada y los resultados fueron comparados con la variable de salida (ciclo de trabajo) del visualizador de reglas del toolbox de fuzzy.

6.5 Resultados de simulación del SMC de 3X2 en lazo cerrado

Una vez que se tienen todas las etapas por separado, es necesario unificarlas dentro del software PSIM. En la Figura 6.9 se muestra el circuito esquemático que se desarrolló en PSIM para simular el comportamiento del convertidor multinivel apilable de 3X2 y el control difuso en lazo cerrado.

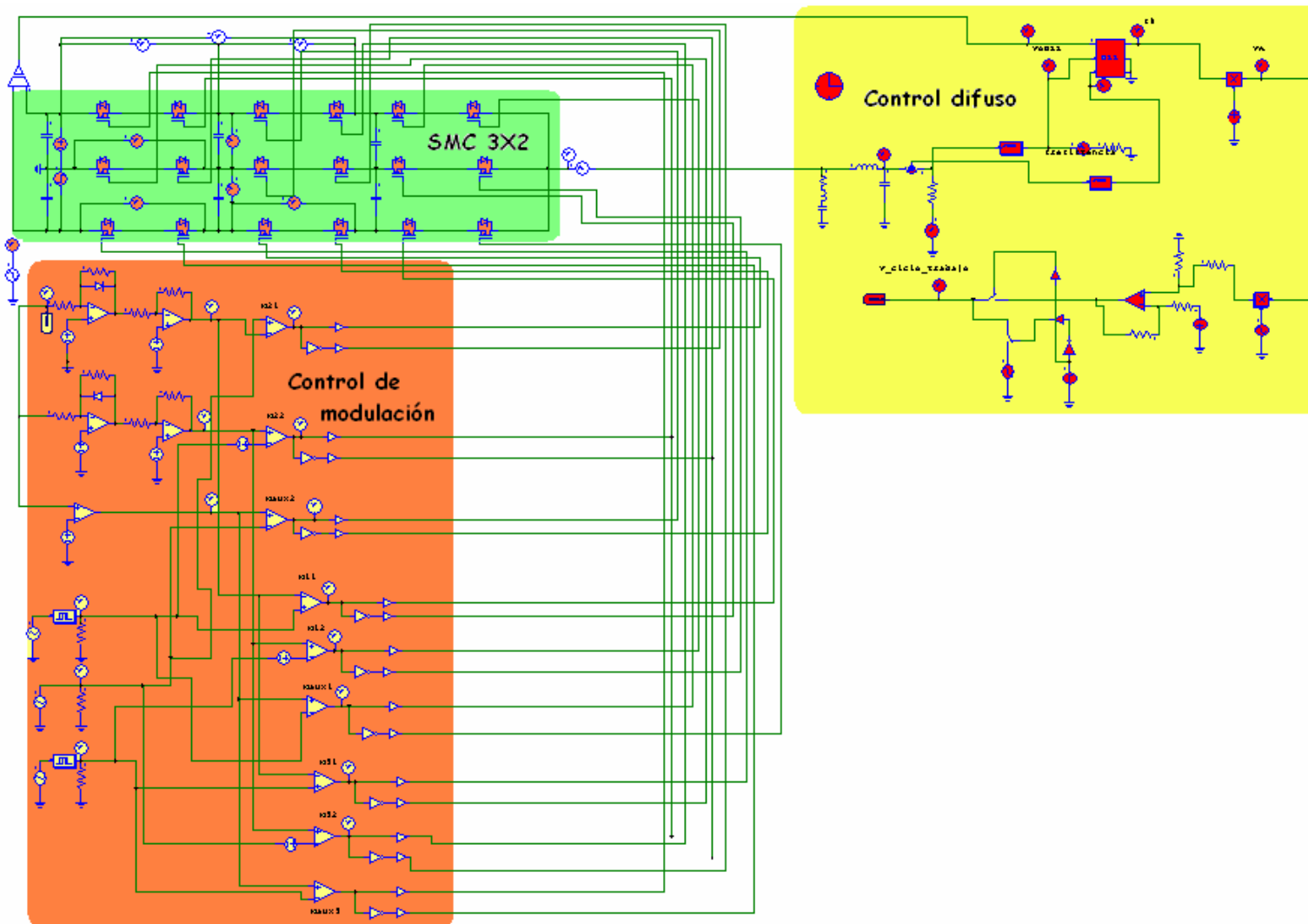


Figura 6.9. Circuito de simulación del SMC de 3X2 en lazo cerrado.

A diferencia del control en lazo abierto, ahora los parámetros para el control en lazo cerrado cambian, puesto que el inversor sólo trabajará en ciertos rangos en los cuales se comporta de manera lineal.

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada (V_s)	80 a 100 V_{CD}
Frecuencia de conmutación (F_s)	20 KHz
Voltaje de salida (V_o)	28.28 a 35.35 V_{CA}
Frecuencia del voltaje de salida	60 Hz
Resistencia de carga (R_o)	266 Ω
Potencia de salida (P_o)	2W

Tabla 6.3 Parámetros del SMC de 3X2 para lazo cerrado.

El diseño se calculó para mantener una potencia de salida nominal a 2 Watts.

Para la Figura 6.10 inicialmente se estableció un $V_{entrada} = 85v$, y conforme avanzaba el tiempo el voltaje de entrada se incrementó a 100v. Ese cambio abrupto ayudó a comprobar si el circuito esquemático lograba responder a cambios abruptos a la entrada de voltaje. Como consecuencia el voltaje y corriente de salida respondieron, inicialmente entregaron un $V_{salida} = 14.9v$ y una $I_{salida} = 55mA$. En la Figura 6.10 se observa que el voltaje de salida y la corriente crecen y decrecen de manera lineal, tal como ya se había comentado en el apartado 4.8.2, mostrando como el sistema busca estabilizarse.

También es importante hacerse notar que la respuesta a cada cambio en las formas de onda mostradas, se generan con un periodo de $1/60$, esto se debe a que a la salida del circuito SMC de 3X2 se colocaron bloques “rms”, debido a que desde un principio se pensó en alimentar el bloque DLL con una señal directa, y como consecuencia los bloques “rms” toman un periodo completo de la señal para analizarlo y entregar una salida.

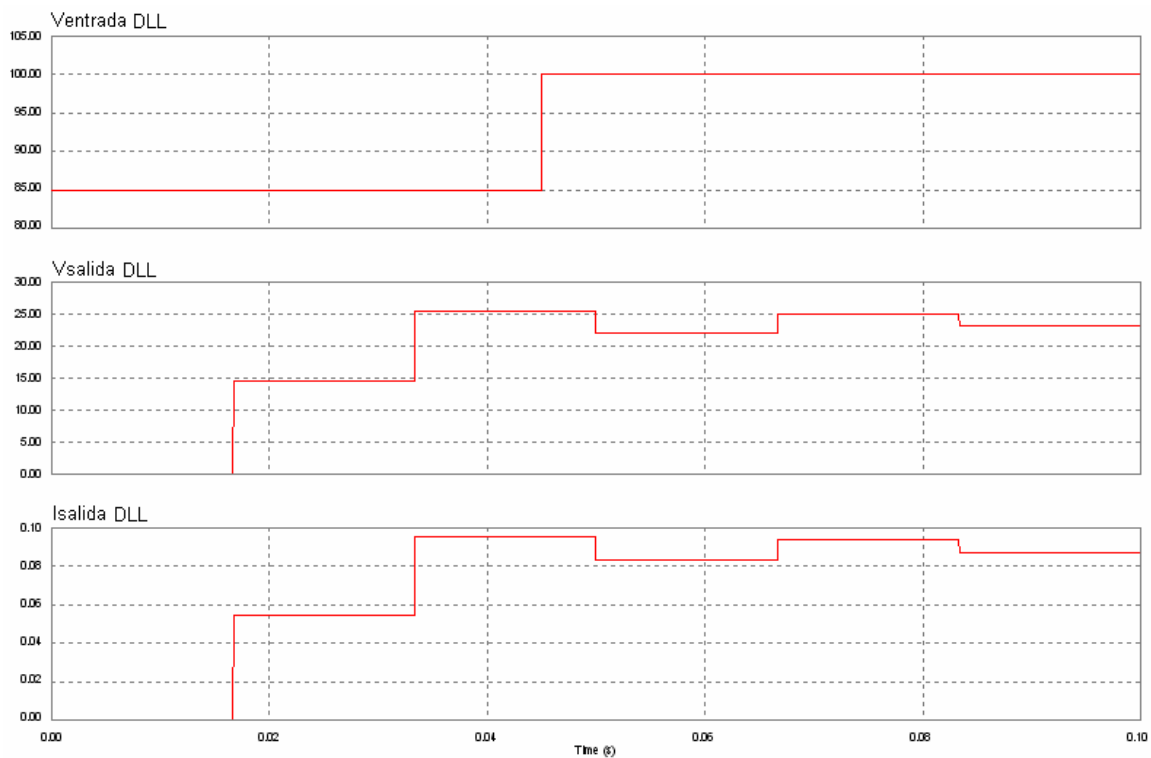


Figura 6.10. Voltaje de entrada, voltaje de salida y corriente de salida, variables de entrada al bloque DLL.

Ahora, para el voltaje y corriente de salida filtrado (Figura 6.11) existe un patrón de comportamiento similar, y se observa que ambas señales varían de manera similar a los cambios prescritos por el ciclo de trabajo que estará cambiando en función de las entradas al control difuso. Lo mismo sucede para el voltaje de salida del SMC de 3X2 (Figura

6.11) en el que se nota una pérdida de niveles, esto debido a que menor ciclo de trabajo trae como respuesta la reducción en los niveles del voltaje de salida.

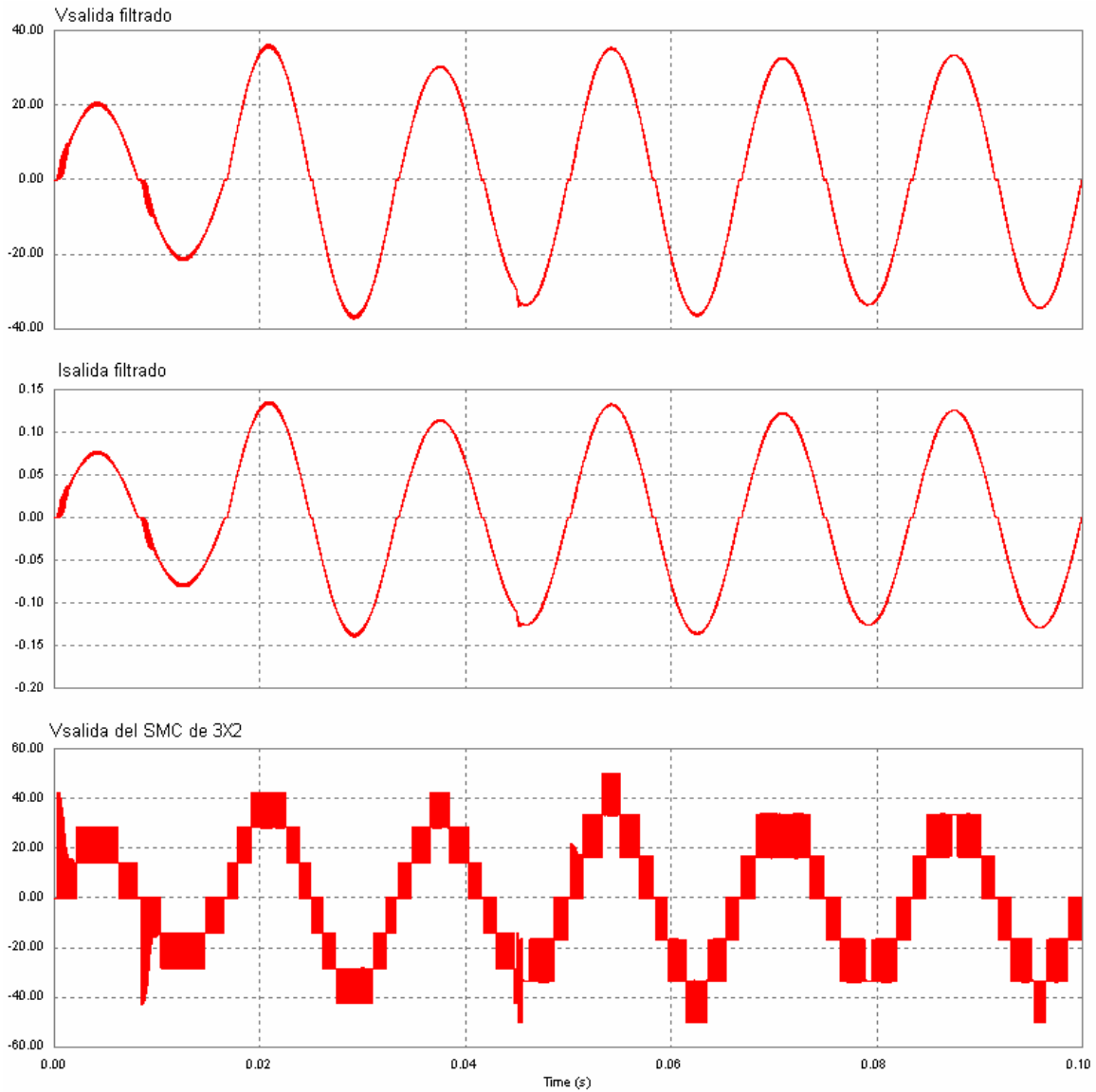


Figura 6.11. Voltaje y corriente de salida filtrados, y voltaje de salida del SMC de 3X2.

En base a las señales mostradas, se esperara que la respuesta al comportamiento de las variables de entrada del bloque difuso tenga como respuesta una señal con un ciclo de

trabajo muy similar a lo que se observa en la Figura 6.11, tal como se observa en la Figura 6.12.

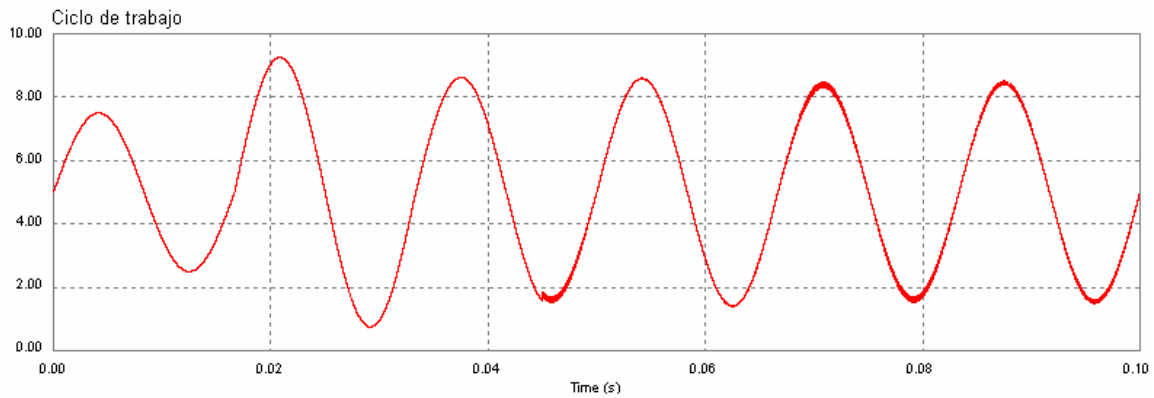


Figura 6.12. Señal de ciclo de trabajo.

Como se mostró en los resultados anteriores se estableció un voltaje de entrada dentro del rango de voltaje definido en los parámetros iniciales, ahora se muestra el comportamiento para un voltaje fuera del rango del voltaje inicial.

Con un $V_{entrada} = 70v$ y a la salida un $V_{salida} = 12.5v$ y una $I_{salida} = 45mA$ se tiene una respuesta como la mostrada en la Figura 6.13.

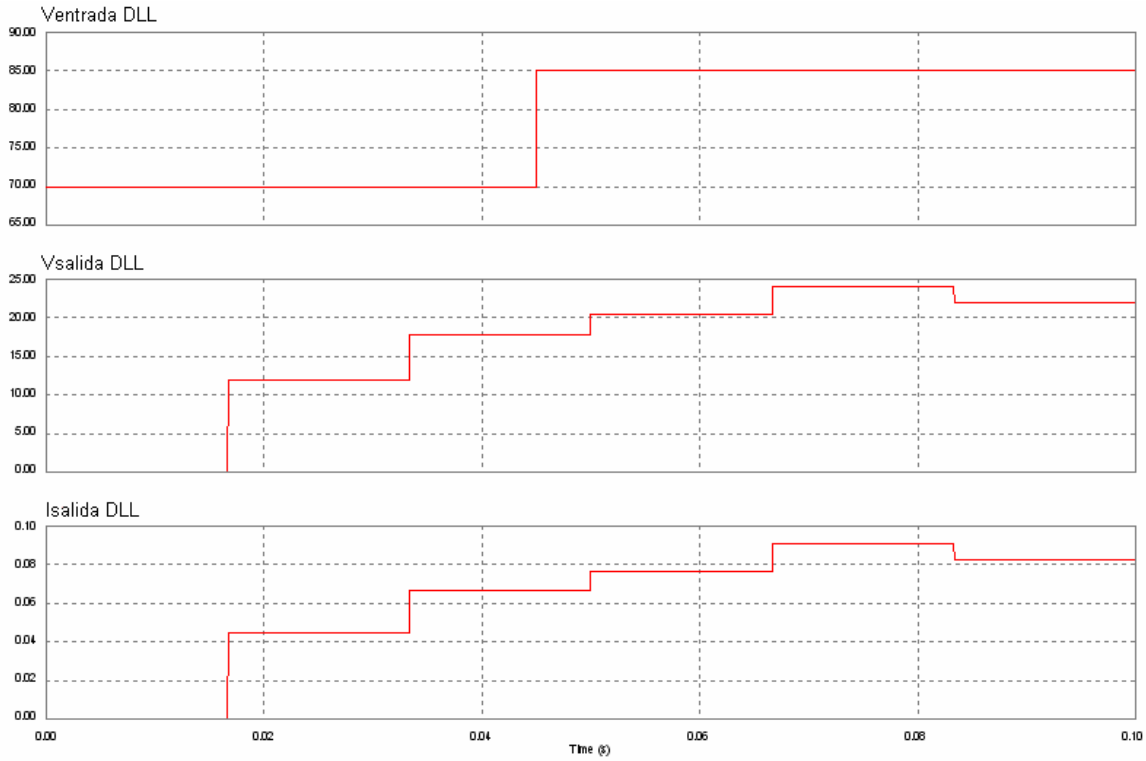


Figura 6.13. Voltaje de entrada, voltaje de salida y corriente de salida, variables de entrada al bloque DLL.

Al igual que la Figura 6.11 se observa un patrón de comportamiento lineal el cual es un poco más evidente, dado a que el voltaje de entrada es menor al rango definido, por lo que se observa que el control difuso esta actuando de manera favorable y estabilizando la señal de salida al valor nominal, ver Figura 6.14.

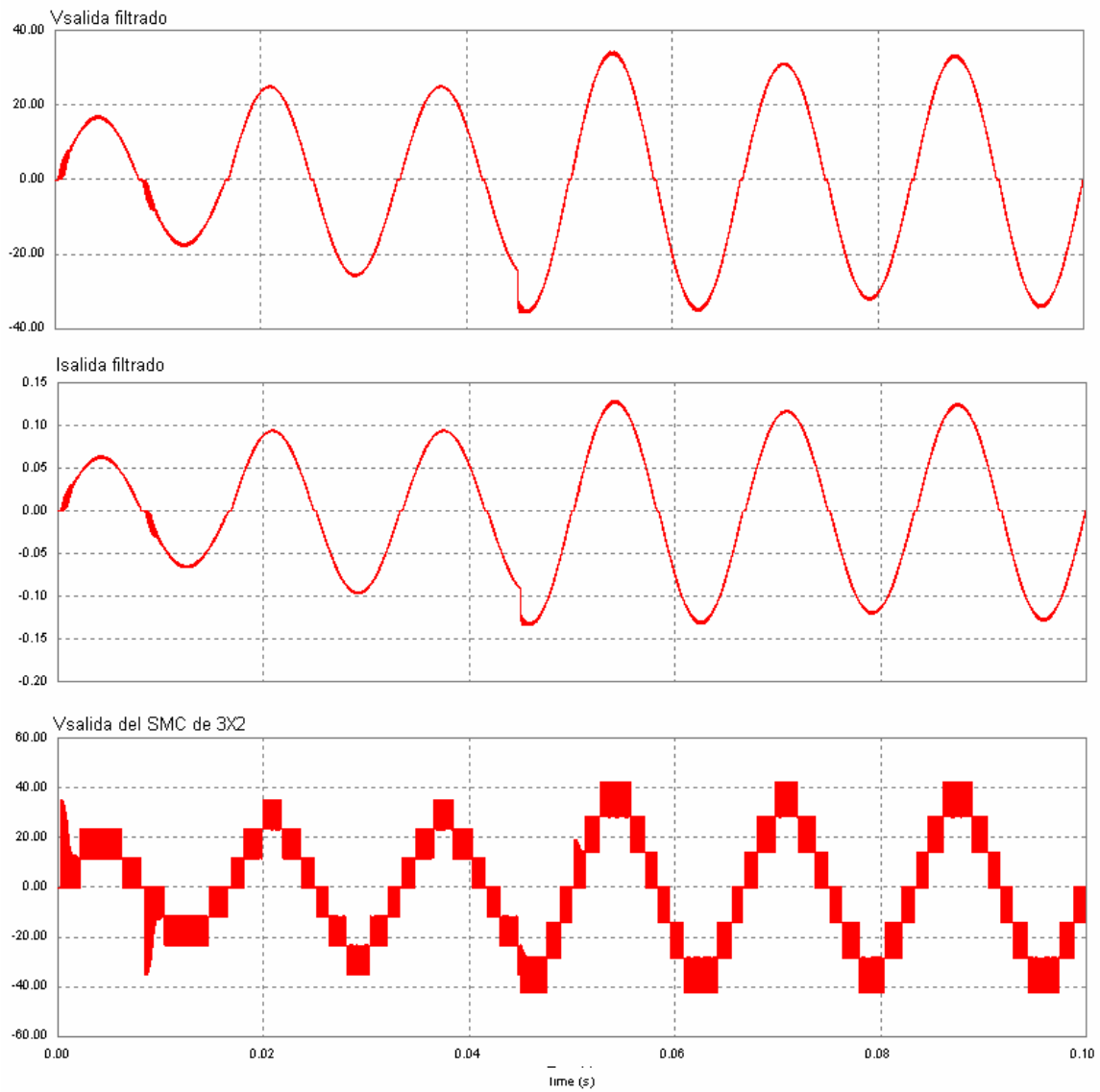


Figura 6.14. Voltaje y corriente de salida filtrados, y voltaje de salida del SMC de 3X2.

En el ciclo de trabajo (Figura 6.15) se observa el comportamiento del control difuso.

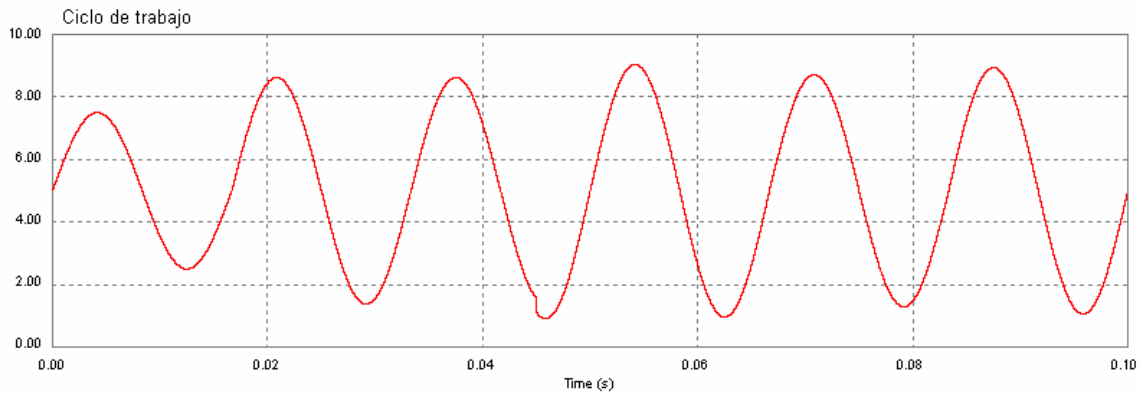


Figura 6.15. Señal de ciclo de trabajo.

Por último, se propone un voltaje de entrada de 110v, pero ahora con una reducción de voltaje de 15 volts. En la Figura 6.16 se muestra el voltaje de entrada, el voltaje de salida y la potencia de salida, en donde se observa como el voltaje de entrada entra con un valor constante de 110v y decrece al paso de dos periodos a 95 volts, haciendo notar que tanto el voltaje como la corriente de salida tienden a estabilizarse.

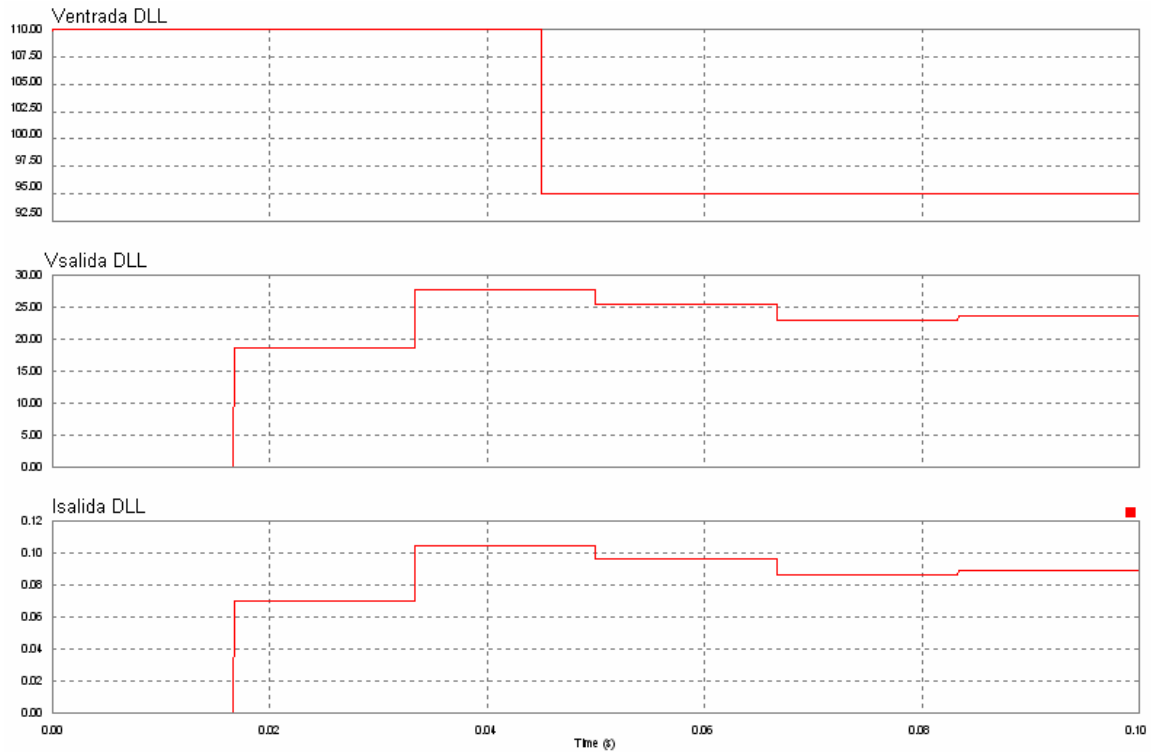


Figura 6.16. Voltaje de entrada, voltaje de salida y corriente de salida, variables de entrada al bloque DLL.

En la Figura 6.17 se muestra el voltaje y corriente de salida filtrado, así como el voltaje de salida previo a la etapa de filtrado, directamente del SMC de 3X2. El voltaje de salida tiene un valor rms de 23.7volts, y la corriente de salida es igual a 0.89mA, lo que trae como resultado una potencia de salida de 2.12 watts, lo cual indica que el sistema de control difuso funciona de manera adecuada y como tal se justifica su funcionamiento.

En consecuencia a esto, se puede corroborar que el ciclo de trabajo (Figura 6.18) manifiesta el comportamiento similar al del voltaje y corriente de salida.

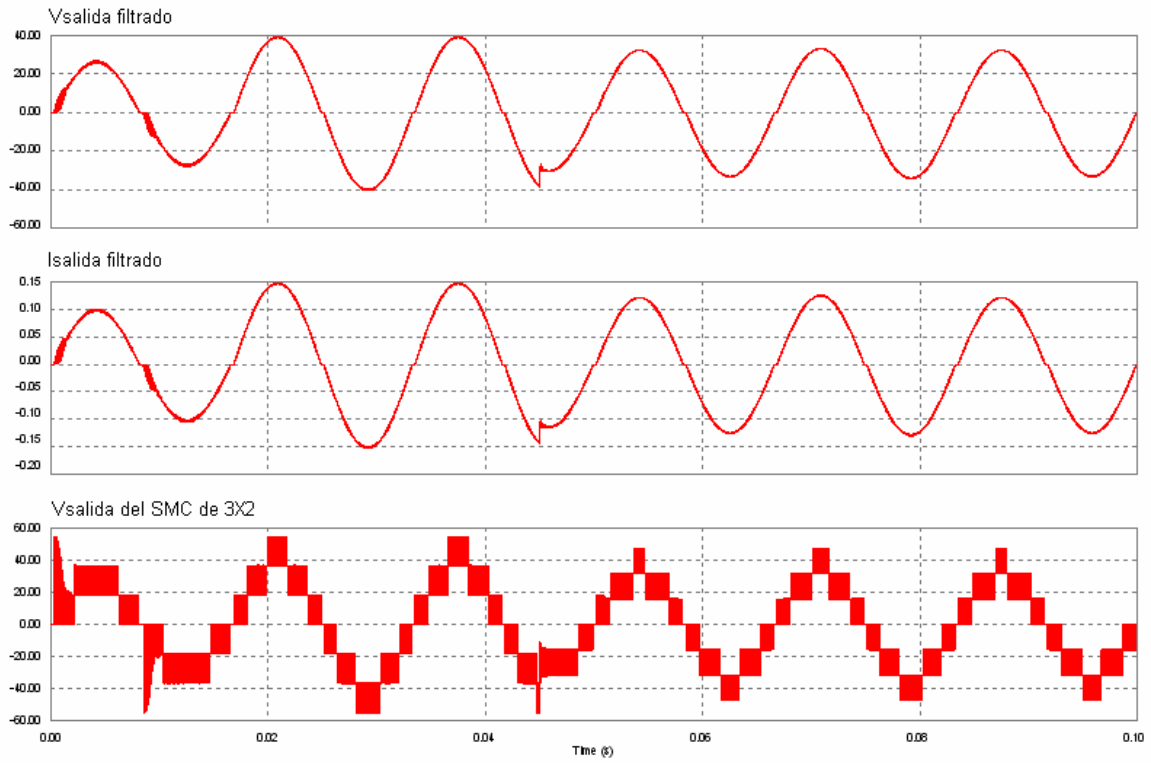


Figura. 6.17 Voltaje y corriente de salida filtrados, y voltaje de salida del SMC de 3X2.

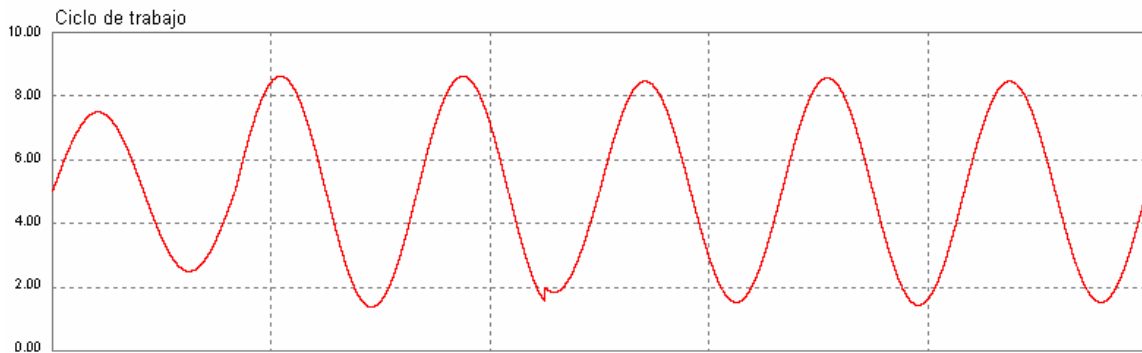


Figura 6.18. Señal de ciclo de trabajo.