



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL
ELECTRONICA INDUSTRIAL

COMPARATIVA DE SIMULADORES ELECTRICOS APLICADOS A CIRCUITOS DE ELECTRONICA DE POTENCIA

Autor:
Tutores:

Raúl Sáez Piris
Cristina Fernández Herrero
Pablo Zumel Vaquero

Índice general

Índice de figuras, tablas y manuales de ayuda.....	5
Figuras.....	5
Tablas.....	7
Manuales de ayuda.....	7
Capítulo 1: Introducción.....	8
1.- Motivación.....	8
2.- Objetivos.....	8
Capítulo 2: Simuladores. Información general.	10
2.1.- MATLAB'.....	10
2.1.1.- Características de SIMULINK.....	13
a) Crear y trabajar con modelos con SIMULINK	14
b) Selección y personalización de bloques	14
c) Incorporación de algoritmos de MATLAB.....	15
d) Creación y edición del modelo con SIMULINK	15
e) Organizar su modelo.....	16
f) Ejecutar una simulación.....	16
g) Análisis de resultados	17
2.2 – SIMPLORER'	18
2.2.1.- Diseño del sistema.....	19
2.2.2.- Técnicas de modelado	19
2.2.3.- Análisis estadístico y optimización	20
2.3.- ORCAD'.....	21
2.3.1.- Características ORCAD.....	21
a) Editor de esquemáticos.....	21
b) Sistema de información de componentes.....	22
c) Selector de componentes	22
2.3.2.- Características PSPICE	23
a) Sensibilidad	23
b) Optimizador	23

2.4.- PSIM	24
Capítulo 3: Biblioteca de circuitos.....	28
3.1.- Conversión CC-CC: Convertidores.....	30
3.1.1.- Reductor.....	30
3.1.2.- Flyback.....	33
3.1.3.- Forward.....	37
a) Forward clásico.	37
b) Forward con enclavamiento activo.	40
3.2.- Conversión CA-CC: Rectificadores.	44
3.2.1.- Monofásicos.....	44
a) Media Onda	44
b) Onda Completa	48
3.2.2.- Trifásicos.....	51
a) Media Onda.	51
b) Onda completa.....	54
3.3.- Conversión CC-CA: Inversores	59
3.3.1.- No modulados	59
a) Medio puente.....	59
b) Puente completo	62
3.3.2.- Modulación PWM.....	65
a) Monofásico	65
I) Medio puente.....	65
II) Puente completo	69
1) Bipolar.....	70
2) Unipolar.....	73
b) Trifásico	75
Capítulo 4: Comparación de resultados	79
Capítulo 5: Conclusiones.....	86
Anexos: Manuales de ayuda.....	88
Manual 1.- ORCAD	88
Manual 2.- MATLAB	105
Manual 3.- PSIM	125
Manual 4.- SIMPLORER	133

Índice de figuras, tablas y manuales de ayuda

• Figuras

Figura 1.- Circuito reductor en ORCAD.....	31
Figura 2.- Circuito reductor en MATLAB.....	32
Figura 3.- Circuito reductor en PSIM.....	32
Figura 4.- Circuito reductor en SIMPLORER.....	32
Figura 5.- Circuito flyback en PSIM	33
Figura 6.- Circuito flyback en SIMPLORER	34
Figura 7.- Configuración de parámetros del transformador en MATLAB	34
Figura 8.- Circuito flyback en MATLAB.....	35
Figura 9.- Circuito del transformador del flyback en ORCAD	36
Figura 10.- Circuito flyback en ORCAD.....	36
Figura 11.- Circuito forward clásico en PSIM.....	37
Figura 12.- Circuito del transformador del forward clásico en ORCAD.....	38
Figura 13.- Circuito forward clásico en ORCAD.....	39
Figura 14.- Circuito forward con clásico en SIMPLORER	39
Figura 15.- Circuito forward clásico en MATLAB	40
Figura 16.- Circuito forward con enclavamiento activo en PSIM.....	41
Figura 17.- Circuito del transformador del forward con enclavamiento en ORCAD.....	41
Figura 18.- Circuito forward con enclavamiento activo en ORCAD	42
Figura 19.- Circuito forward active clamp en SIMPLORER	42
Figura 20.- Circuito forward con enclavamiento activo en MATLAB	43
Figura 21.- Circuito de disparo del tiristor en SIMPLORER	44
Figura 22.- Circuito rectificador monofásico media onda en SIMPLORER	45
Figura 23.- Circuito de disparo del tiristor en PSIM	45
Figura 24.- Circuito rectificador monofásico media onda en PSIM.....	46
Figura 25.- Circuito rectificador monofásico media onda en MATLAB	46
Figura 26.- Modelo de tiristor en ORCAD.....	47
Figura 27.- Circuito rectificador monofásico media onda en ORCAD	48
Figura 28.- Circuito rectificador monofásico de onda completa en MATLAB.....	49
Figura 29.- Circuito rectificador monofásico de onda completa en PSIM.....	49
Figura 30.- Circuito rectificador monofásico de onda completa en ORCAD.....	50
Figura 31.- Circuito rectificador monofásico de onda completa en SIMPLORER.....	50
Figura 32.- Circuito rectificador trifásico de media onda en ORCAD	51
Figura 33.- Circuito rectificador trifásico de media onda en PSIM	52
Figura 34.- Circuito rectificador trifásico de media onda en SIMPLORER	53
Figura 35.- Circuito rectificador trifásico de media onda en MATLAB.....	54
Figura 36.- Circuito rectificador trifásico de onda completa en ORCAD	55
Figura 37.- Circuito rectificador trifásico de onda completa en SIMPLORER	55
Figura 38.- Circuito rectificador trifásico de onda completa en MATLAB	56

<i>Figura 39.- Configuración generador de pulsos en MATLAB</i>	<i>56</i>
<i>Figura 40.- Configuración puente tiristores en MATLAB</i>	<i>57</i>
<i>Figura 41.- Circuito rectificador triásico de onda completa en PSIM.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 42.- Circuito inversor no modulado monofásico de medio puente en PSIM.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 43.- Configuración fuentes de pulsos en PSIM.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 44.- Circuito inversor no modulado monofásico de medio puente en SIMPLORER.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 45.- Circuito inversor no modulado monofásico de medio puente en MATLAB.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 46.- Circuito inversor no modulado monofásico de medio puente en ORCAD.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 47.- Circuito inversor no modulado monofásico de puente completo en PSIM.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 48.- Circuito inversor no modulado monofásico de puente completo en MATLAB.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 49.- Circuito inversor no modulado monofásico de puente completo en SIMPLORER.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 50.- Circuito inversor no modulado monofásico de puente completo en ORCAD.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 51.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de medio puente en ORCAD.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 52.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de medio puente en SIMPLORER.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 53.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de medio puente en PSIM</i>	<i>68</i>
<i>Figura 54.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de medio puente en MATLAB.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 55.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo bipolar en ORCAD.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 56.- Configuración Generador PWM</i>	<i>71</i>
<i>Figura 57.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo bipolar en MATLAB.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 58.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo bipolar en SIMPLORER.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 59.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo bipolar en PSIM</i>	<i>72</i>
<i>Figura 60.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo unipolar en MATLAB.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 61.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo unipolar en ORCAD.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 62.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo unipolar en PSIM.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 63.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo unipolar en SIMPLORER.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 64.- Circuito inversor modulado PWM trifásico de puente completo en ORCAD.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 65.- Circuito inversor modulado PWM trifásico de puente completo en MATLAB.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 66.- Circuito inversor modulado PWM trifásico de puente completo en SIMPLORER.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 67.- Circuito inversor modulado PWM trifásico de puente completo en PSIM.....</i>	<i>78</i>

- *Tablas*

<i>Tabla 1.- Resumen convertidores de Electrónica de Potencia</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2 .- Parámetros de tiempo</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 3.- Parámetros de espacio</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 4 .- Edición de gráficos y tiempo de preparación</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 5 .- Tiempo de preparación en %.....</i>	<i>83</i>

- *Manuales de ayuda*

<i>Manual 1.- ORCAD.....</i>	<i>88</i>
<i>Manual 2.- MATLAB.....</i>	<i>105</i>
<i>Manual 3.- PSIM</i>	<i>125</i>
<i>Manual 4.- SIMPLORER</i>	<i>133</i>

Capítulo 1: Introducción

1.- Motivación

La importancia de la simulación de circuitos electrónicos es hoy en día parte fundamental para el estudio de circuitos, y forma parte del proceso de diseño de cualquier sistema electrónico.

En el campo de la Electrónica de Potencia, la simulación es también imprescindible y está integrada en los programas académicos de la mayor parte de las asignaturas sobre la Electrónica de Potencia.

Debido a la gran variedad de simuladores disponibles en el mercado, y al valor didáctico de su utilización, se ha considerado interesante realizar una comparación de los simuladores y generar un material de apoyo con simulaciones de circuitos de potencia básicos.

2.- Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es comparar cuatro de los simuladores más habituales utilizados en la Electrónica de Potencia. Para ello, se han seguido los siguientes pasos:

- Creación de una biblioteca de circuitos de los convertidores más utilizados dentro de la Electrónica de Potencia.
- Comparación de los distintos simuladores utilizados.
- Creación de material de apoyo, basándose en casos concretos, al usuario no iniciado en forma de presentaciones graficas.

En el desarrollo de este proyecto se han utilizado cuatro simuladores de Electrónica de Potencia, en los cuales se han desarrollado circuitos correspondientes a tres tipos de conversión, explicándolas con una serie de circuitos característicos de cada una de ellas.

Los cuatro simuladores son “MATLAB 2008a” con su herramienta “SIMULINK”, “ORCAD 10.5”, “SIMPLORER 7.0” y “PSIM 6.0”, realizando un estudio entre ellos con respecto a los modelos estudiados, teniendo en cuenta la dificultad de manejo de los simuladores, el tiempo empleado en crear y simular cada modelo.

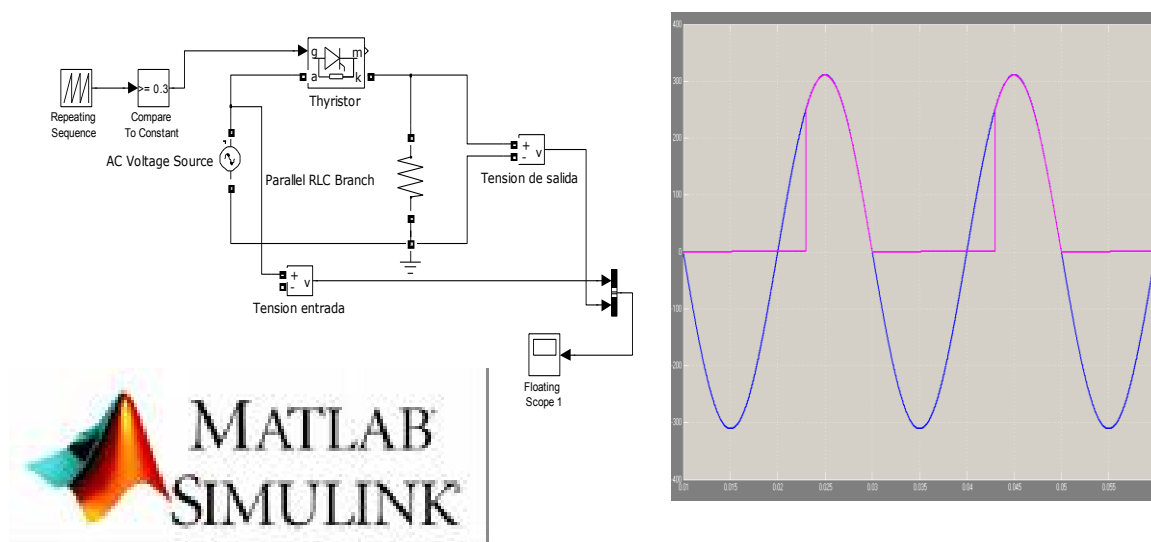
El proyecto se ha estructurado, de forma que el usuario conozca las características técnicas de cada simulador, para que, después de dicha introducción a cada uno, pueda conocer las ventajas e inconvenientes de cada circuito para cada tipo de conversión en cada uno de los simuladores estudiados.

Las tres conversiones utilizadas en este manual son:

- Conversión CA-CC (rectificadores): se utiliza para, a través de una señal de corriente alterna, principalmente senoidal, se obtenga a la salida una señal rectificada.
- Conversión CC-CC (convertidores): a partir de una señal de continua, el filtro de salida eliminará el rizado, tanto de corriente a través de la bobina, como el de tensión, por el condensador, obteniendo una señal a la salida prácticamente constante.
- Conversión CC-CA (inversores): según una señal de entrada constante, podremos generar una señal de corriente alterna a la salida.

Capítulo 2: Simuladores. Información general.

2.1.- MATLAB^{1,2}



MATLAB es un lenguaje de programación técnica de alto nivel y un entorno interactivo para el desarrollo de algoritmos, visualización y análisis de datos, y cálculo numérico. Con MATLAB, se pueden resolver problemas de cálculo técnico más rápidamente que con otros lenguajes de programación tradicionales, tales como C, C++ o FORTRAN.

Se puede usar MATLAB en una amplia gama de aplicaciones que incluyen procesamiento de señales e imágenes, comunicaciones, diseño de sistemas de control, sistemas de prueba y medición, modelado y análisis financiero, y biología computacional. Los conjuntos de herramientas complementarios (colecciones de funciones de MATLAB para propósitos especiales) amplían el entorno de MATLAB, permitiendo resolver problemas especiales en estas áreas de aplicación.

¹ Información extraída de <http://www.mathworks.com/products/MATLAB/>

² Dentro de este documento se encuentra el manual de utilización de *SIMULINK*, el cual explica detalladamente el uso y funcionamiento de este simulador (véase pág. 93).

Además, MATLAB contiene una serie de funciones para documentar y compartir su trabajo. Se puede integrar el código de MATLAB con otros lenguajes y aplicaciones, y distribuir los algoritmos y aplicaciones de desarrollo usando MATLAB.

Sus características principales son:

- Lenguaje de alto nivel para cálculo técnico.
- Entorno de desarrollo para la gestión de código, archivos y datos.
- Herramientas interactivas para la exploración, diseño y resolución de problemas.
- Funciones matemáticas para álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, optimización e integración numérica.
- Funciones gráficas bidimensionales y tridimensionales para la visualización de datos.
- Herramientas para crear interfaces gráficas de usuario personalizadas.
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones y lenguajes externos, tales como C/C++, FORTRAN, Java, COM y Microsoft Excel.

Con el lenguaje de MATLAB, se puede programar y desarrollar algoritmos más rápidamente que con los lenguajes tradicionales ya que no hay que realizar tareas administrativas de bajo nivel, tales como declarar variables, especificar tipos de datos y asignar memoria. En muchos casos, MATLAB elimina la necesidad de bucles "for". En consecuencia, una línea de código de MATLAB generalmente reemplaza a varias líneas de código C/C++.

MATLAB soporta todo el proceso de análisis de datos, desde la adquisición de datos de dispositivos externos y bases de datos, pasando por el pre-procesado, visualización y análisis numérico, hasta la producción de resultados.

MATLAB proporciona herramientas interactivas y funciones de línea de comandos para operaciones de análisis de datos, entre las que se incluyen:

- Interpolación
- Extracción de secciones de datos, escalado y promedio
- Correlación y análisis de Fourier
- Estadística básica y ajuste de curvas
- Análisis matricial

MATLAB es una plataforma eficiente para acceder a datos de archivos, otras aplicaciones, bases de datos y dispositivos externos. Puede leer datos guardados en los formatos más conocidos, tales como Microsoft Excel, archivos de texto ASCII o binarios, archivos de imagen, sonido y vídeo, etc.

Puede llamar a otras aplicaciones y lenguajes, tales como C, C++, objetos COM, DLL's, Java, FORTRAN y Microsoft Excel, y acceder a sitios FTP y servicios Web; utilizando el *"Database Toolbox"*, incluso puede acceder a bases de datos ODBC/JDBC.

Puede obtener datos de dispositivos de hardware, tales como el puerto serie de un ordenador o una tarjeta de sonido. Utilizando el *"Data Acquisition Toolbox"*, puede dirigir los datos medidos a MATLAB para su análisis y visualización en tiempo real.

Todas las funciones gráficas necesarias para visualizar datos de ingeniería y científicos están disponibles en MATLAB. Incluye funciones de representación de diagramas bidimensionales y tridimensionales, visualización de volumen tridimensional, herramientas para crear diagramas en forma interactiva y la posibilidad de exportar los resultados a los formatos gráficos más conocidos. Puede personalizar sus diagramas añadiendo varios ejes, cambiando los colores de las líneas y marcadores, añadiendo anotaciones, leyendas y trazando formas.

Puede visualizar vectores de datos con funciones de representación de diagramas bidimensionales para crear:

- Diagramas de líneas, de área, de barras y de sectores.
- Diagramas de dirección y de velocidad.
- Histogramas.
- Polígonos y superficies.
- Diagramas de dispersión/burbujas.
- Animaciones.

Una de las herramientas incluida en MATLAB es *SIMULINK*. *SIMULINK* es un entorno para la simulación y diseño de dominios, basado en un modelo para los sistemas dinámicos. Proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto personalizable de bibliotecas de bloque que permiten diseñar, simular, implementan y probar una variedad de sistemas, incluyendo las comunicaciones, controles, procesamiento de señales, procesamiento de vídeo y procesamiento de imágenes.

SIMULINK está integrado con MATLAB, proporcionando acceso inmediato a una amplia gama de herramientas que le permiten desarrollar algoritmos, analizar y visualizar simulaciones, secuencias de comandos de procesamiento, personalizar el entorno de modelado y definir la señal, parámetros y pruebas.

2.1.1.- Características de *SIMULINK*

- Posee una amplia biblioteca de bloques predefinidos.
- Editor gráfico interactivo para ensamblar y administrar los bloques de una forma intuitiva.
- Capacidad de administrar diseños complejos al segmentar modelos en jerarquías.
- Explorador de modelos para crear, configurar y buscar en todas las señales, parámetros, propiedades, y el código generado asociados con su modelo.

- Programación de aplicaciones que permiten conectar con otros programas de simulación.
- Modos de simulación (Normal, Acelerador y Acelerador Rápido) para la ejecución de simulaciones.
- Depurador gráfico y generador de perfiles para examinar los resultados de simulación y diagnosticar, a continuación, el rendimiento y un posible comportamiento inesperado en el diseño.
- Acceso completo a MATLAB para analizar y visualizar los resultados, personalización del entorno de modelado, la definición de señal, parámetros y datos de prueba.
- Modelo de análisis y herramientas de diagnóstico para garantizar la coherencia del modelo e identificar errores de modelado.

a) Crear y trabajar con modelos con SIMULINK

Se puede crear, modelar y mantener un diagrama de bloques detallado de su sistema utilizando un conjunto integral de bloques predefinidos. SIMULINK proporciona herramientas para el modelado jerárquico, administración de datos y personalización de subsistemas, lo que facilita la creación de representaciones concisas y precisas, independientemente de la complejidad del sistema.

b) Selección y personalización de bloques

SIMULINK incluye una extensa biblioteca de funciones utilizadas en un sistema de modelado. Estos incluyen:

- bloques de tiempo continuo y discreto, tales como la integración y unidad retraso.
- bloques algorítmicos, tales como la suma, productos y tabla de búsqueda.
- bloques estructurales, tales como MUX, switch y bus selector, entre otros.

Se pueden personalizar estos bloques incorporados o crear nuevos directamente en *SIMULINK* y colocarlos en sus propias bibliotecas. Existen bibliotecas adicionales con funcionalidad específica para la industria aeroespacial, comunicaciones, radiofrecuencia, procesamiento de señales de vídeo y procesamiento de imágenes y otras aplicaciones.

Para modelar sistemas físicos en *SIMULINK*, puede utilizar las bibliotecas Simscape, SimDriveline, SimHydraulics, SimMechanics y SimPowerSystems, las cuales proporcionan capacidades para el modelado de sistemas físicos, tales como las que tienen componentes mecánicos, hidráulicos y eléctricos. La biblioteca SimPowerSystems es una biblioteca que utiliza elementos de tipo circuito, con conexiones en lugar de entradas y salidas predefinidas. Incluye componentes característicos de Electrónica de Potencia, como son dispositivos semiconductores, bobinas, condensadores, instrumentación de medida...

c) Incorporación de algoritmos de MATLAB

Al incorporar código MATLAB, puede llamar a funciones MATLAB para el análisis de datos y visualización. Además, *SIMULINK* le permite utilizar código para diseñar algoritmos que, a continuación, pueden ser implementados a través de la generación de código con el resto de su modelo. También puede incorporar código C, Fortran, etc.,

d) Creación y edición del modelo con SIMULINK

Para crear modelos solo se debe arrastrar y soltar bloques desde el Explorador de biblioteca al editor gráfico y conectarlos con líneas que establecen relaciones matemáticas entre los bloques. Puede organizar el modelo mediante el uso de funciones de edición gráfica, como copiar, pegar, deshacer, alinear, distribuir y cambiar el tamaño. La interfaz de usuario *SIMULINK* le permite tener un completo control sobre lo que puede ver y utilizar en pantalla. Puede agregar sus comandos y submenús

a los menús editor y contexto. También puede desactivar y ocultar menús, elementos de menú y controles del cuadro de diálogo.

e) Organizar su modelo

SIMULINK permite organizar de una forma fácil e intuitiva la administración de los niveles de jerarquía mediante el uso de subsistemas y modelos de referencia. Los subsistemas encapsulan un grupo de bloques y señales en un solo bloque. También se puede segmentar su modelo en componentes de diseño para modelar, simular y verificar cada componente de forma independiente. Los componentes pueden guardarse como modelos separados, utilizando el modelo de referencia, o como subsistemas en una biblioteca.

SIMULINK permite definir y controlar los atributos de señales y los parámetros asociados con el modelo. Los parámetros son coeficientes que ayudan a definir la dinámica y el comportamiento del sistema. Los atributos de señal y el parámetro pueden ser tratados directamente en el diagrama. Puede definir los siguientes atributos de señal y parámetro:

- tipo de datos: individuales, dobles, con signo o sin signo de 8, 16 o 32 bits, booleano...
- dimensiones: escalares, vector o matriz.
- complejidad: real o complejo.
- mínimo y máximo rango, valor inicial.

f) Ejecutar una simulación

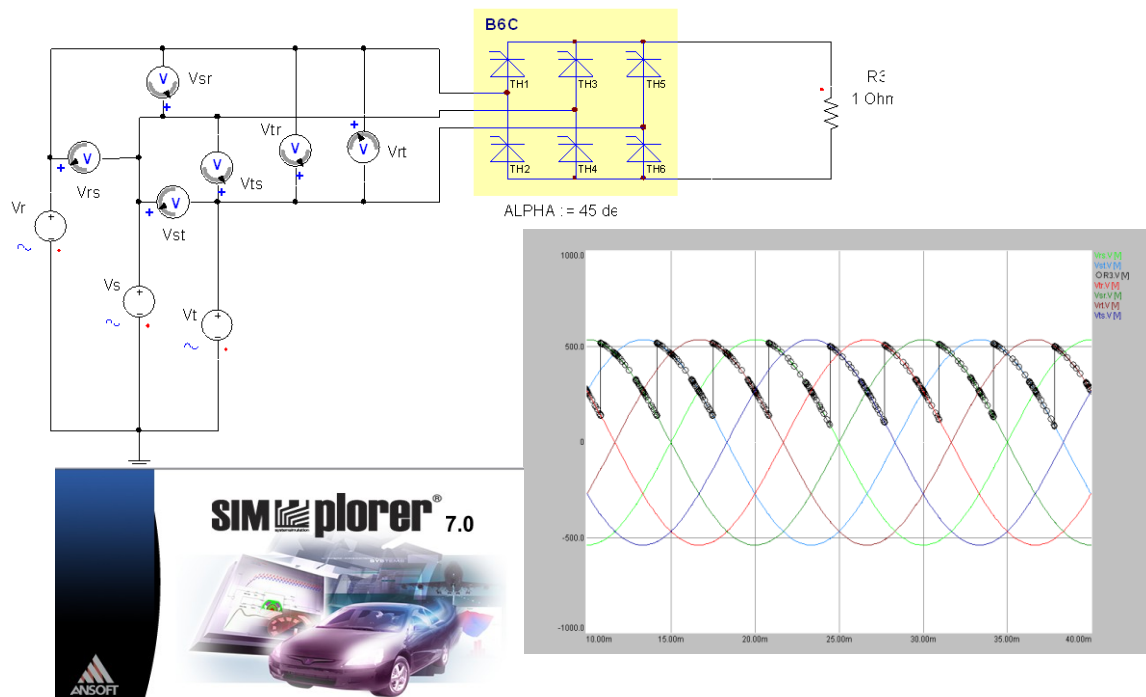
Una vez que se han definido las opciones de simulación para el modelo, puede ejecutar la simulación interactiva, utilizando la GUI SIMULINK. Se pueden utilizar los modos de simulación siguientes:

- Normal (predeterminado), que simula su modelo.
- Acelerador.
- Acelerador rápido, que puede simular modelos más rápido que el modo de acelerador pero con menos interactividad mediante la creación de un archivo ejecutable.

g) Análisis de resultados

SIMULINK incluye varias herramientas para analizar el sistema, visualización de resultados y pruebas, validación y documentación sus modelos. La visualización de los resultados puede visualizar el sistema mediante la visualización de señales con la muestra y ámbitos que se refiere el *SIMULINK*.

2.2 – SIMPLORER^{3,4}



SIMPLORER es un programa de software de simulación multi-dominio que permite a los ingenieros modelar, simular, analizar y optimizar los sistemas complejos incluyendo electromecánica, electromagnetismo, sistemas de alimentación y otros diseños.

Con las características de modelado y la tecnología de comunicación del SIMPLORER, los ingenieros son capaces de construir prototipos virtuales de todos los aspectos de un sistema que incluye la electrónica, sensores y actuadores, motores, generadores, convertidores de energía, controles y software incorporado.

Esto permite a los ingenieros investigar la funcionalidad del sistema y el rendimiento, y verificar el diseño general. El resultado es una reducción drástica, tanto en tiempo de desarrollo y optimización de fiabilidad, como en rendimiento del sistema.

³ Información extraída de <http://www.ansoft.com/products/em/SIMPLORER/>

⁴ Dentro de este documento se encuentra el manual de utilización de *SIMPLORER*, el cual explica detalladamente el uso y funcionamiento de este simulador (véase pág. 121).

2.2.1.- Diseño del sistema:

SIMPLOERER ofrece varias técnicas de modelado, incluidos los circuitos, diagramas de bloques, máquinas de estado, nivel de la ecuación y lenguajes de modelado como VHDL-AMS, SML (lenguaje estándar de SIMPLOERER) y C/C++.

Estos pueden ser usados por los ingenieros para modelos analógicos, digitales y diseños multi-dominio de señales mixtas.

2.2.2.- Técnicas de modelado

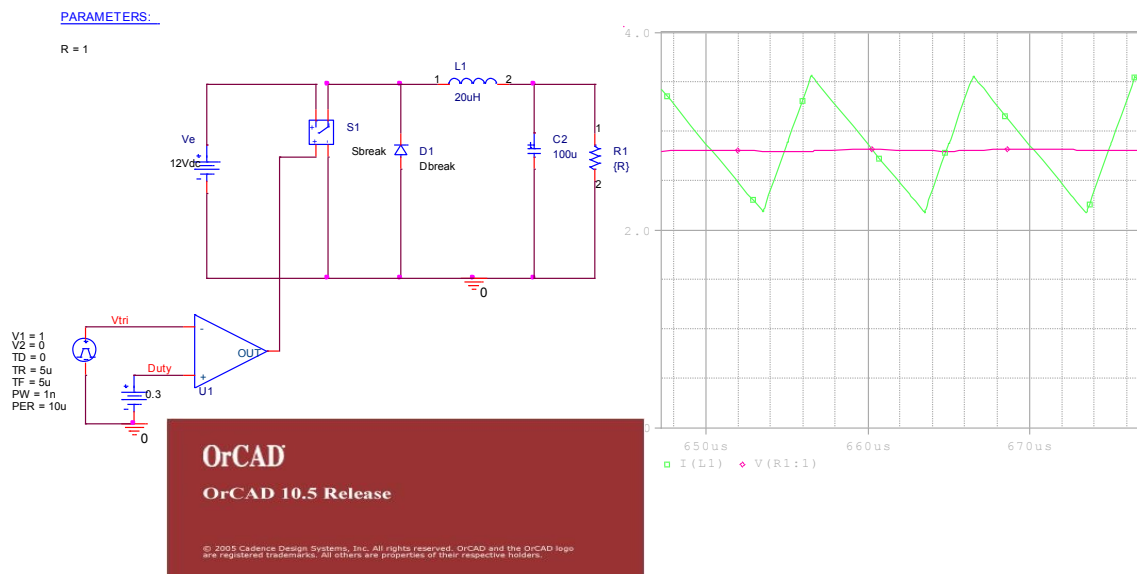
- VHDL-AMS: El “*IEEE 1076.1*” es un lenguaje estándar de modelado que proporciona una amplia capacidad para modelos analógicos, de señal mixta y diseños multi-dominio.
- Circuitos: se consigue una rápida simulación de circuito, además de estable. Incluye semiconductores multinivel de modelado y un intercambio de datos eficaces entre los modelos.
- Diagramas de bloque: modelos de flujo en función de la señal para sistemas híbridos lineales, no lineales, continuos y tiempo discreto.
- Máquinas de estado: controlados por el enfoque para el control complejo de modelado, es decir, espacio de control de vectores, PWM's, eventos...
- Ecuaciones de bloques: incluyen la ecuación en función del modelado en el sistema.
- Importación de modelos de PSPICE: aprovecha las ventajas de los modelos existentes.

2.2.3.- Análisis estadístico y optimización

Las características principales son:

- Análisis paramétrico
- Análisis estadístico (Montecarlo)
- Sensibilidad
- Optimización
 - ❖ Programación secuencial no lineal.
 - ❖ Programación secuencial mixto no lineal
 - ❖ Patrón de búsqueda
 - ❖ Algoritmos genéticos `
- Post procesamiento
 - ❖ Representación 2D y 3D
 - ❖ Representación 2D polar y 3D polar
 - ❖ Representación digitales
 - ❖ Diagramas de Bode y Nyquist
 - ❖ Tablas de datos
 - ❖ Histograma

2.3.- ORCAD^{5,6}



2.3.1.- Características ORCAD

a) Editor de esquemáticos

El editor de esquemático de ORCAD (CAPTURE) se basa en la edición del esquemático de una forma rápida y fácil. Combina una interfaz intuitiva con las características y funcionalidades necesarias para acelerar las tareas de diseño y facilitar la creación de circuito. Para los diseños más grandes o más complejos, CAPTURE es compatible con diseños de varias hojas y jerárquicos. También facilita los diseños jerárquicos y garantiza que todas las conexiones se mantienen con precisión en todo el diseño.

⁵ Información extraída de

http://www.cadence.com/products/ORCAD/ORCAD_capture/pages/default.aspx

⁶ Dentro de este documento se encuentra el manual de utilización de ORCAD, el cual explica detalladamente el uso y funcionamiento de este simulador (véase pág. 76).

b) Sistema de información de componentes

CAPTURE es una parte central de la solución de diseño de ORCAD. Sincroniza automáticamente y valida los datos de origen desde el exterior con la base de datos del diseño de esquemático. *CAPTURE* funciona con cualquier base de datos que cumpla con las normas de ODBC de Microsoft para acceder directamente a los datos en un sistema MRP, ERP o PLM, o en una base de datos intermedio dedicada a la ingeniería de datos de componente.

c) Selector de componentes

Con un fácil acceso a bases de datos de los componentes y su correspondiente información, los diseñadores pueden reducir la cantidad de piezas de investigación. Se permite a los usuarios identificar, utilizar y diseñar con componentes preferidos. Los componentes se pueden consultar según sus características eléctricas, físicas o corporativas, y a continuación, se recuperan automáticamente para su uso en el esquema. Agregar componentes directamente desde las bases de datos de la compañía minimiza los errores en las listas de materiales (BOM) y listas de componentes.

Otra aplicación integrada en el ORCAD es PSPICE A/D, que ofrece soluciones de simulación para simulaciones analógicas y de señal mixta, y además se utiliza como visualizador de los resultados de los circuitos diseñados.

El análisis avanzado de PSPICE realiza los análisis de diseño más allá de la simulación funcional. Los análisis avanzados reúnen a varias tecnologías que pueden ayudar a mejorar el rendimiento de diseño, rentabilidad y fiabilidad. Estas tecnologías incluyen sensibilidad y análisis de Monte Carlo, entre otros.

2.3.2.- Características PSPICE:

La opción de análisis avanzado de PSPICE se utiliza junto con PSPICE A/D para mejorar el rendimiento de diseño y fiabilidad. Con las posibilidades de análisis avanzado de PSPICE A/D, los diseñadores automáticamente pueden maximizar el rendimiento de circuitos, como pueden ser el análisis de temperatura, simulación electromecánica, análisis de Monte Carlo y algoritmos de optimización de ejecución automática para mejorar la calidad de los diseños y maximizar el rendimiento de circuito. PSPICE A/D también permite a los usuarios diseñar y generar modelos de simulación para transformadores e inductores de DC.

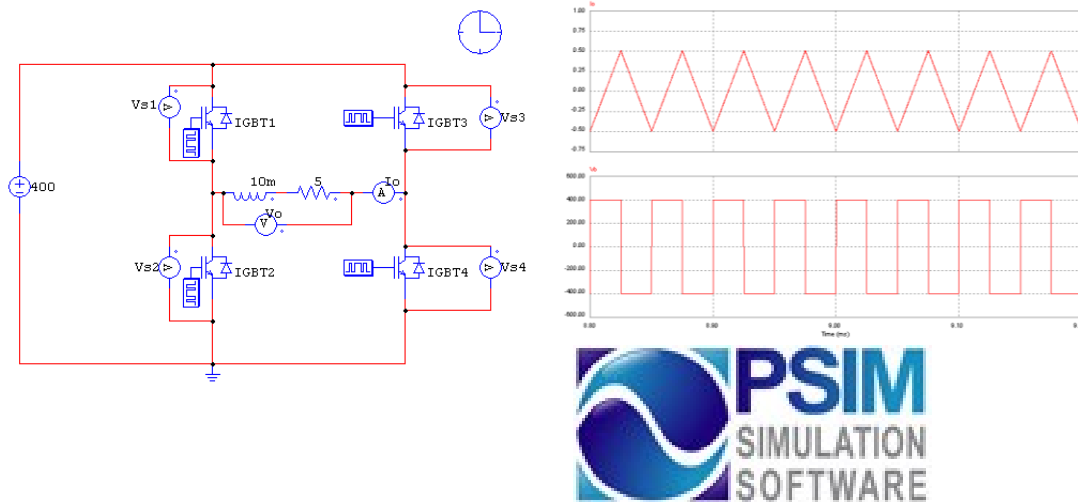
a) Sensibilidad

Los análisis de sensibilidad identifican qué parámetros del componente son críticos para los objetivos de rendimiento del circuito. Dicho análisis examina cuanto afecta cada componente al comportamiento del circuito por sí mismo, y en comparación con los demás componentes, por diferentes tolerancias, para crear el peor caso de valores (mínimo y máximo).

b) Optimizador

Analiza circuitos analógicos y sistemas, ajusta sus diseños más rápido que un banco de pruebas. Ayuda a encontrar los mejores valores de cada componente para satisfacer sus objetivos de rendimiento y las posibles restricciones existentes.

2.4.- PSIM^{7,8}



PSIM es un software de simulación diseñado para la Electrónica de Potencia, control de motores y sistema dinámico de simulación. Gracias a PSIM con su potente entorno de simulación, permite trabajar de una forma más eficaz y productiva, reducir el desarrollo de costo y el tiempo de comercialización. Con su interfaz, su velocidad de simulación, su capacidad de simular cualquier tipo de convertidores de energía y circuitos de control, PSIM es ideal para la simulación, diseño de bucles de control y estudios de sistema de motores. Las posibilidades de realización del PSIM son tan amplias y numerosas que cubre una amplia variedad de aplicaciones en ingeniería eléctrica, tales como:

- Componentes de equipos de conversión.
- Energía solar y eólica.
- Iluminación.
- Industria del automóvil.
- Industria aeronáutica.
- Defensa.
- Nuclear.

⁷ Información extraída de <http://www.powersimtech.com/products.html>

⁸ Dentro de este documento se encuentra el manual de utilización de *PSIM*, el cual explica detalladamente el uso y funcionamiento de este simulador (véase pág. 113).

- Telecomunicaciones.
- Simulación de circuitos de potencia: AC-DC, DC - DC, DC - CA, AC-AC.

PSIM consta de tres programas principales:

- circuito esquemáticos (PSIM Schematics)
- Simulador PSIM
- Visualización de la forma de onda (Simview)

PSIM puede utilizarse para el análisis y diseño de sistemas de control y convertidor de alimentación para una amplia variedad de aplicaciones como:

- Rectificadores AC/DC
- Filtros activos
- Cargadores de batería
- Corrección del factor de potencia, etc.

PSIM tiene una completa biblioteca que contiene numerosos elementos de ingeniería eléctrica, de los componentes de energía y de los lazos de control. Como pueden ser:

- Circuitos de potencia: aplicaciones RLC, conmutadores, transformadores
- Circuitos de control: filtros, fuentes de bloques de función, elementos de lógica, elementos de uso común, como son el bloque de PI, multiplexor, amplificador operacional...
- Fuentes: tensión, corriente, tiempo
- Otros elementos: conmutadores, sensores, sondas, elementos no lineales...

Además, posee de circuitos de ejemplo, como:

- Inversores
- Modelos PWM
- Rectificadores y Ciclo-convertidores
- Filtros activos, bucles de control, etc.

Existen módulos adicionales que permiten el estudio de distintos sistemas, como pueden ser:

- Motores: PSIM proporciona un entorno de simulación potente para diversos estudios de sistema de motores, como son las máquinas de uso común y modelos de carga mecánica, y diversos sistemas de control que se pueden implementar fácilmente mediante la biblioteca de control de PSIM., sistemas termales, control digital, etc.
- Control digital: Se puede utilizar para simular el rendimiento de los bucles de control digital, filtros digitales y evaluar diversos efectos en el control digital, como errores de truncamiento, retraso de muestreo/suspensión y demora computacional.
- Térmico: proporciona una manera rápida de estimación de las pérdidas de conducción y conmutación de dispositivos de semiconductores como pueden ser diodos, IGBT y MOSFET. De esta manera, los usuarios pueden agregar fácilmente dispositivos de cualquier fabricante. Estos dispositivos, a continuación, pueden seleccionarse en esquemas PSIM, y se pueden calcular sus pérdidas/conmutación de conducción en la simulación.
- Simcoder: proporciona la capacidad para generar código C automáticamente desde el esquemático del PSIM. Con SimCoder, los usuarios pueden simular un sistema en PSIM en primer lugar, y a continuación, generar código C para un hardware específico. La generación automática de código proporciona una

perfecta integración entre simulación y la implementación de hardware y acelera enormemente el proceso de desarrollo y diseño.

- SimCoupler: Proporciona la interfaz entre PSIM y MATLAB/SIMULINK para la simulación conjunta o co-simulación, para que parte de un sistema puede ser implementado y simulado en PSIM y el resto en MATLAB/SIMULINK.
- MagCoupler: proporciona el vínculo dinámico para la co-simulación PSIM y JMAG, para que: el convertidor de potencia y parte de un sistema de control pueda ser implementada y simulada en PSIM, y los equipos eléctricos y otros dispositivos magnéticos pueden ser implementados y simulados en JMAG.

Capítulo 3: Biblioteca de circuitos.

En este capítulo, se expondrán los diferentes modelos de estudio realizados con los cuatro simuladores utilizados. En la tabla 1 se muestran de una forma pormenorizada los modelos de estudio.

Se han escogido dichos circuitos para realizar la comparación de los simuladores; más adelante, se presentará una tabla similar en la que se incluirán datos adicionales como pueden ser el espacio que ocupa en disco la instalación del mismo, una valoración de la edición de gráficos, en función de valores como pueden ser las operaciones con variables o la exportación de gráficos para su edición, selección de componentes, acceso a las bibliotecas o para el tiempo de preparación del modelo, entre otros.

CONVERTIDORES CC-CC	FLYBACK			
	FORWARD	3 DEVANADOS		
		ACTIVE CLAMP		
	REDUCTOR			
CONVERTIDORES CA-CC	MONOFASICO	MEDIA ONDA		
		ONDA COMPLETA		
	TRIFASICO	MEDIA ONDA		
		ONDA COMPLETA		
CONVERTIDORES CC-CA	NO MODULADOS	MEDIO PUENTE		
		PUENTE COMPLETO		
	MODULACION PWM	MEDIO PUENTE	MONOFASICO	
		PUENTE COMPLETO	MONOFASICO	UNIPOLAR
				BIPOLAR
			TRIFASICO	

Tabla 1.- Resumen convertidores de Electrónica de Potencia

El objetivo de este estudio es doble. Por un lado, la comparación de los cuatro simuladores al abordar el mismo circuito, para la cual se ha escogido cuatro topologías muy comunes en la Electrónica de Potencia. Por otro lado, la creación de bibliotecas básicas de circuitos típicos y componentes en los casos en los que ha sido necesario.

Los circuitos simulados se han agrupado en tres bloques, según el tipo de conversión de la energía: CC-CC, CA-CC y CC-CA.

3.1.- Conversión CC-CC: Convertidores.

Los convertidores CC-CC son circuitos electrónicos de potencia que convierten una tensión continua a otro nivel de tensión continua, proporcionando una salida regulada.

El diseño de todos los circuitos se han considerado en Modo de Conducción Continua (MCC), además de realizándolos con diferentes cargas (resistiva, inductiva...) para ver los diferentes resultados en distintos circuitos.

Existen múltiples topologías de convertidores CC-CC, pero para el estudio se han seleccionado tres en concreto que son muy representativas.

- Reductor: es un circuito simple, sin aislamiento galvánico y muy común en la Electrónica de Potencia. Su interruptor está aislado de masa, y las demás topologías sin aislamiento galvánico serán fácilmente simulables modificando los esquemáticos propuestos para este convertidor.
- Flyback: con aislamiento galvánico, se caracteriza porque su funcionamiento está basado en el almacenamiento de la energía en la inductancia magnetizante del transformador.
- Forward: con aislamiento galvánico, se caracteriza porque el transformador no almacena energía y necesita mecanismos de desmagnetización, como un tercer devanado, o un interruptor auxiliar con un condensador (enclavamiento activo).

3.1.1.- Reductor

El circuito reductor es un convertidor CC-CC que reduce el nivel de tensión continua de la entrada. En cuanto a sus modelos en los cuatro programas de estudio, es un circuito que no ha suscitado demasiada complejidad.

La mayor complejidad que haya podido existir ha sido en ORCAD (Figura 1), en el que para generar la señal de conmutación, se ha realizado mediante una comparación de los niveles de tensión de una señal triangular " V_{tri} " y una fuente de tensión continua " $Duty$ " que simula el ciclo de trabajo. También se ha simulado el comportamiento del interruptor, normalmente realizado con un MOSFET como interruptor.

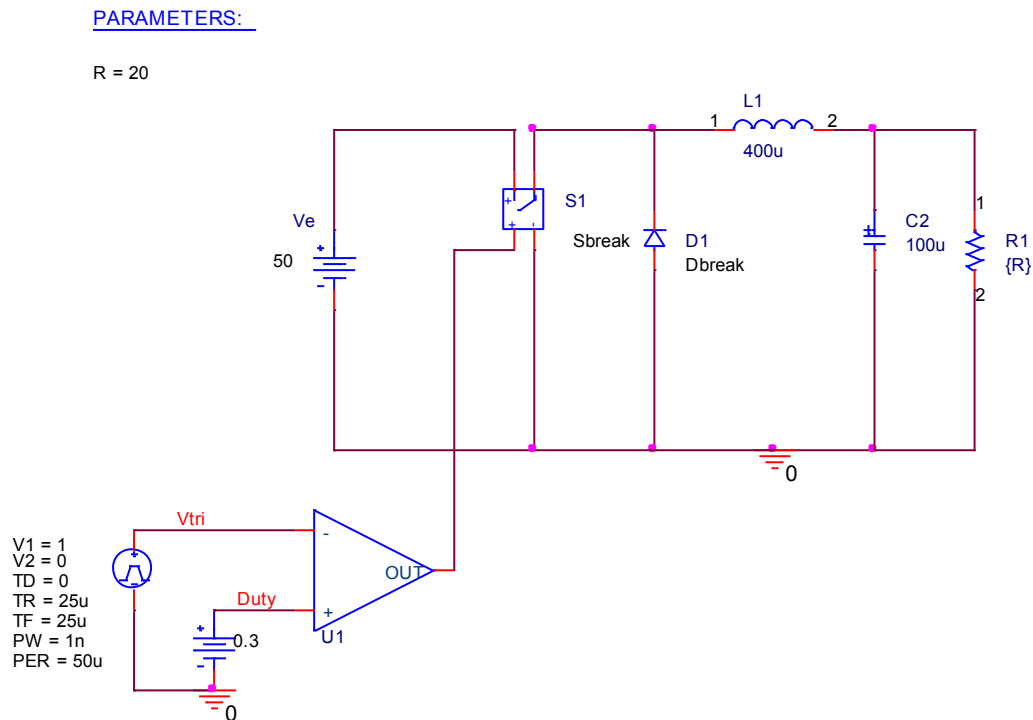


Figura 1.- Circuito reductor en ORCAD

En los demás simuladores (Figura 2, Figura 3 y Figura 4) no ha habido mayor problema, tanto en la creación como en la simulación del circuito, ya que los componentes utilizados son ideales. Solo se ha tenido en cuenta que para estimular al MOSFET se ha utilizado una fuente de pulsos, con la frecuencia de conmutación.

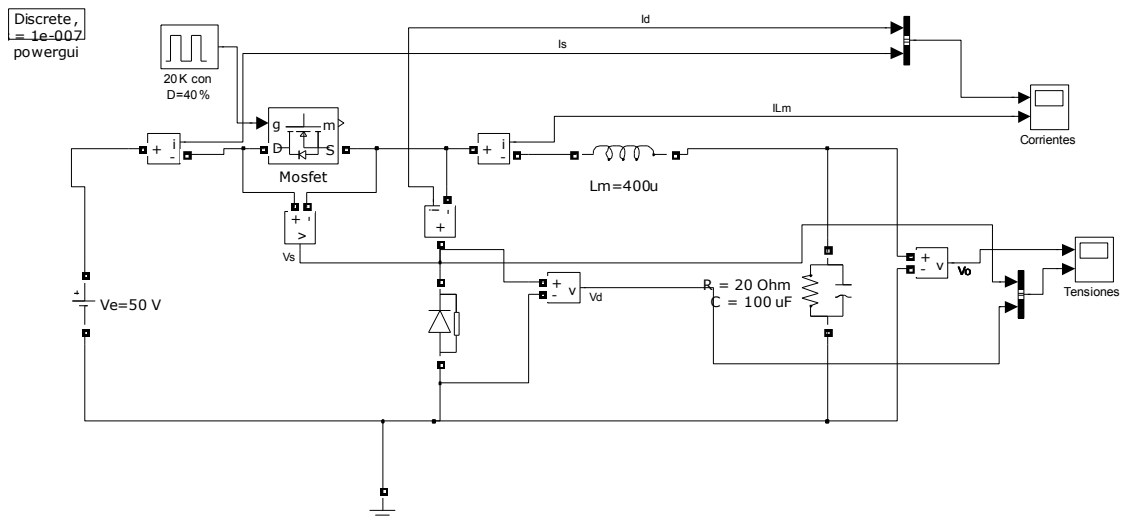


Figura 2.- Circuito reductor en MATLAB

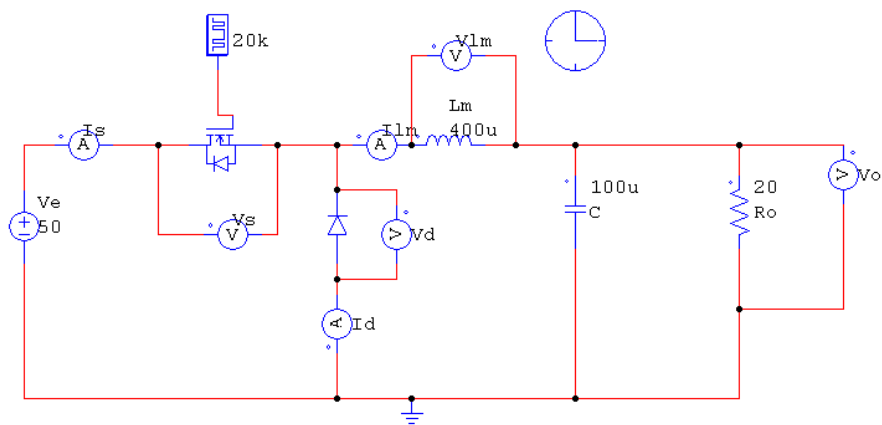


Figura 3.- Circuito reductor en PSIM

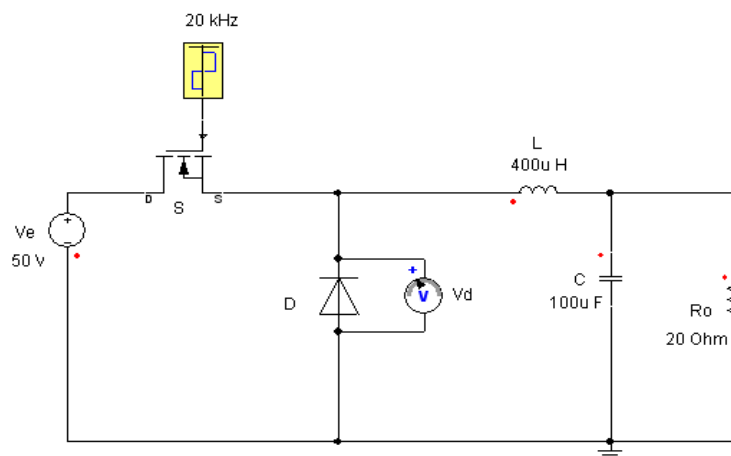


Figura 4.- Circuito reductor en SIMPLORER

3.1.2.- Flyback

El convertidor “*flyback*” es un convertidor que aísla galvánicamente, mediante un transformador, la entrada de la salida. Su funcionamiento es similar al del convertidor reductor-elevador. La energía se almacena en la bobina magnetizante del primario cuando el interruptor está cerrado y se entrega a la carga cuando éste está abierto.

Para la realización de este circuito, en todos los simuladores, la única dificultad que ha surgido ha sido la necesidad de incluir una bobina magnetizante para la carga del primario del transformador, y una fuente periódica para la excitación del MOSFET. Para ello, se debe configurar, tanto la frecuencia de excitación como el ciclo de trabajo. Para el disparo del interruptor, se podía haber realizado, utilizando el esquema de señal triangular comparada con la señal de continua empleado en el reductor.

Tanto en PSIM como en SIMPLORER (Figura 5 y Figura 6), no ha habido mayor problema para la realización de los circuitos de simulación.

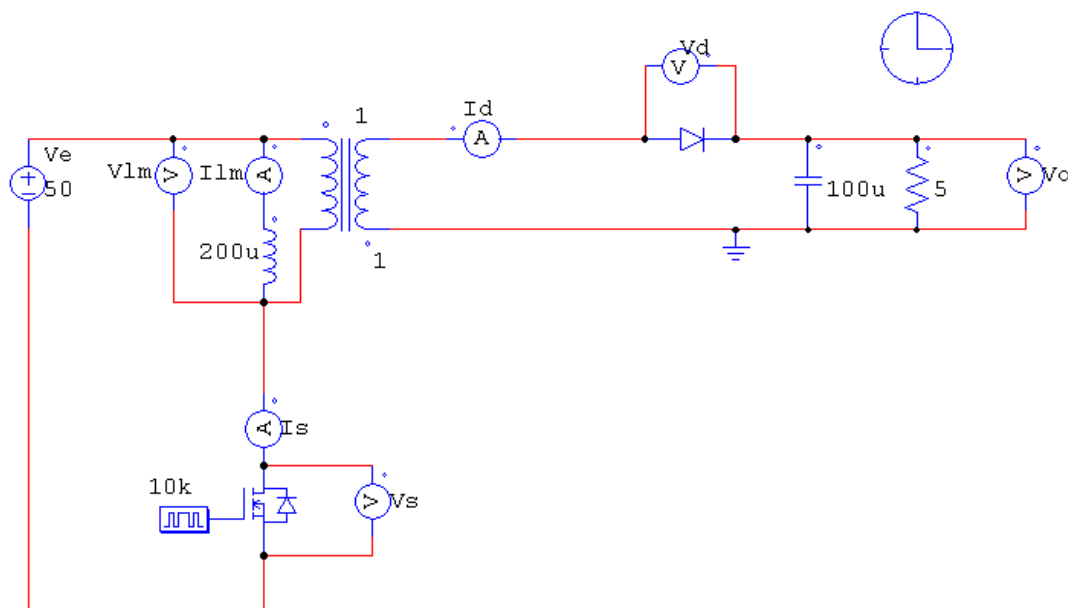


Figura 5.- Circuito flyback en PSIM

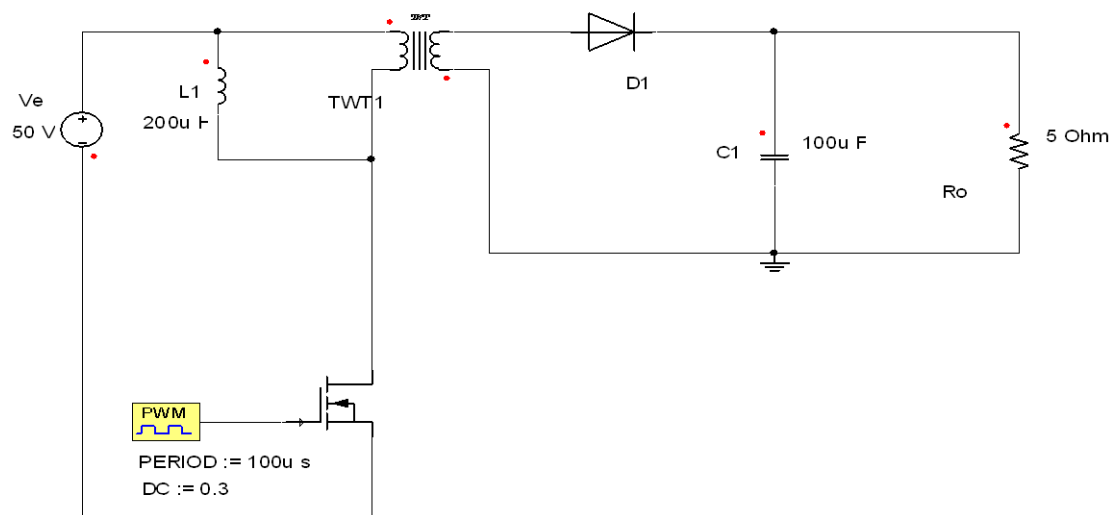


Figura 6.- Circuito flyback en SIMPLORER

En MATLAB (Figura 8), además de las mencionadas anteriormente, la mayor dificultad es determinar los valores del transformador, ya que hay que determinar los valores de tensión de primario y secundario, y los valores de resistencia e inductancia de los mismos, como se muestra en la Figura 7.

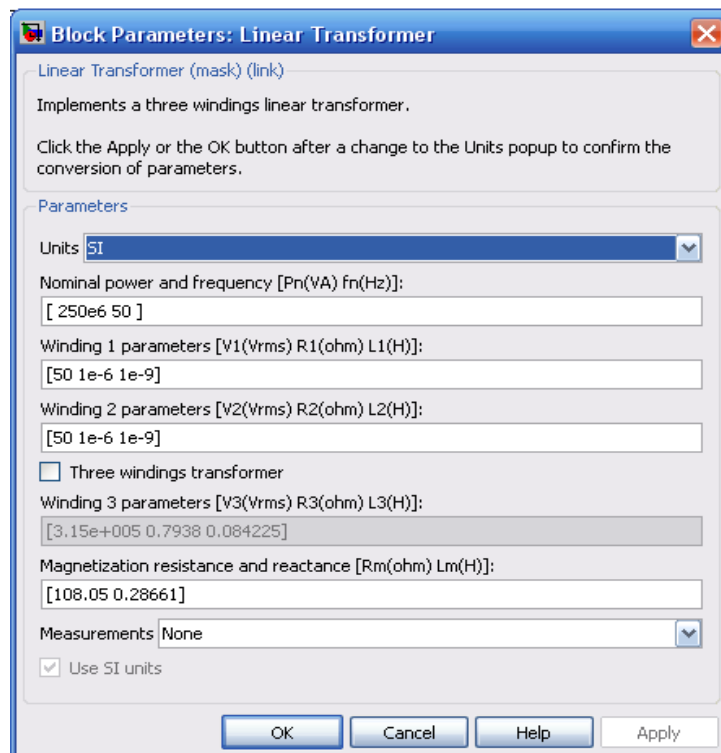


Figura 7.- Configuración de parámetros del transformador en MATLAB

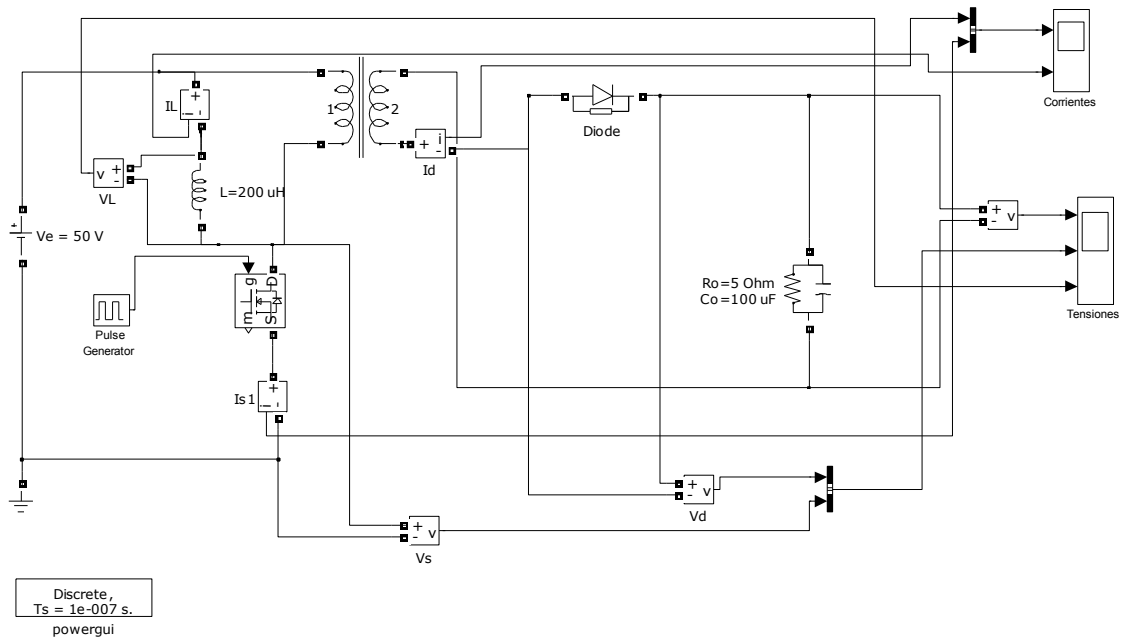


Figura 8.- Circuito flyback en MATLAB

En cuanto a ORCAD, ha sido necesaria la creación de un transformador que realice la relación de transformación pedida (Figura 9). Para ello se ha creado un modelo ideal de un transformador, el cual está compuesto de dos fuentes dependientes en cada uno de los devanados.

En el devanado principal, es una fuente dependiente de ganancia (al efecto, de la relación de vueltas de los devanados), por lo que la tensión de entrada de la fuente " $Prim_1$ " será la corriente por el secundario " Sec_2 " de la fuente dependiente, que en este caso es una fuente de corriente dependiente de tensión, y la de " $Prim_2$ ", la de " Sec_1 ".

También se ha incluido la función "*SUBPARAMETERS*", en la que se indicarán el numero de vueltas del primario y el secundario " N_1 " y " N_2 ". De este modo, el modelo del transformador ideal es fácilmente parametrizable.

3.1.3.- Forward

El convertidor “*forward*” tiene un comportamiento similar al del convertidor reductor, con la salvedad que incluye un grado de libertad adicional para el diseño, debido a la utilización de un transformador para conseguir un aislamiento galvánico entre la entrada y la salida.

Se han considerado 2 topologías, debido a la necesidad de modelar dos tipos diferentes de transformadores:

- forward clásico o con 3 devanados.
- forward con enclavamiento activo o active clamp.

a) Forward clásico.

En este modelo, es necesario introducir un transformador de 3 devanados (1 primario y 2 secundarios), de tal forma que uno de los secundarios permitirá la desmagnetización del núcleo mediante un diodo auxiliar. Como en el flyback, se debe colocar una bobina magnetizante que modele la magnetización del núcleo.

En PSIM (Figura 11), la creación y simulación del modelo ha sido la más sencilla de todas, ya que todos los componentes son ideales, y solo se han tenido que poner los valores necesarios en cada uno de ellos.

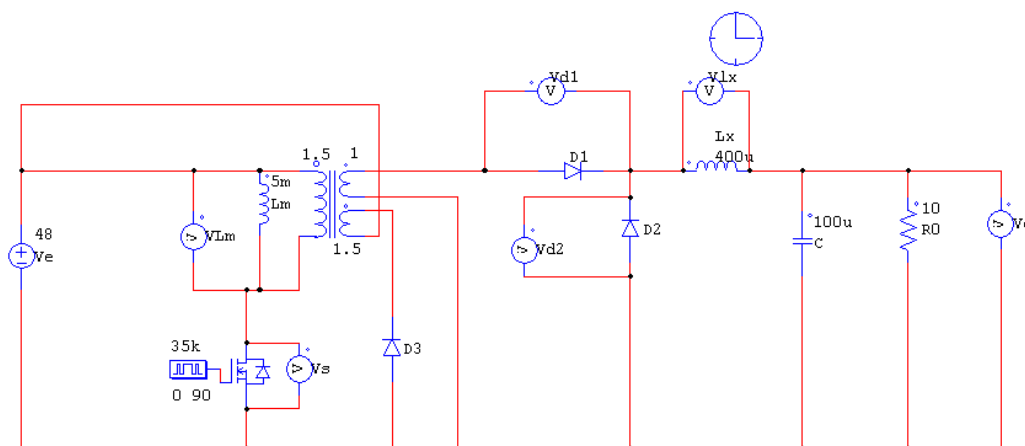


Figura 11.- Circuito forward clásico en PSIM

En ORCAD, se ha tenido que crear un modelo ideal de transformador con un primario y dos secundarios, de forma similar a la descrita en el modelo del transformador del flyback, con la salvedad de que al existir 2 secundarios, existen 2 relaciones de transformación distintas con 3 valores de nº de vueltas (N_1 , N_2 y N_3) (Figura 12).

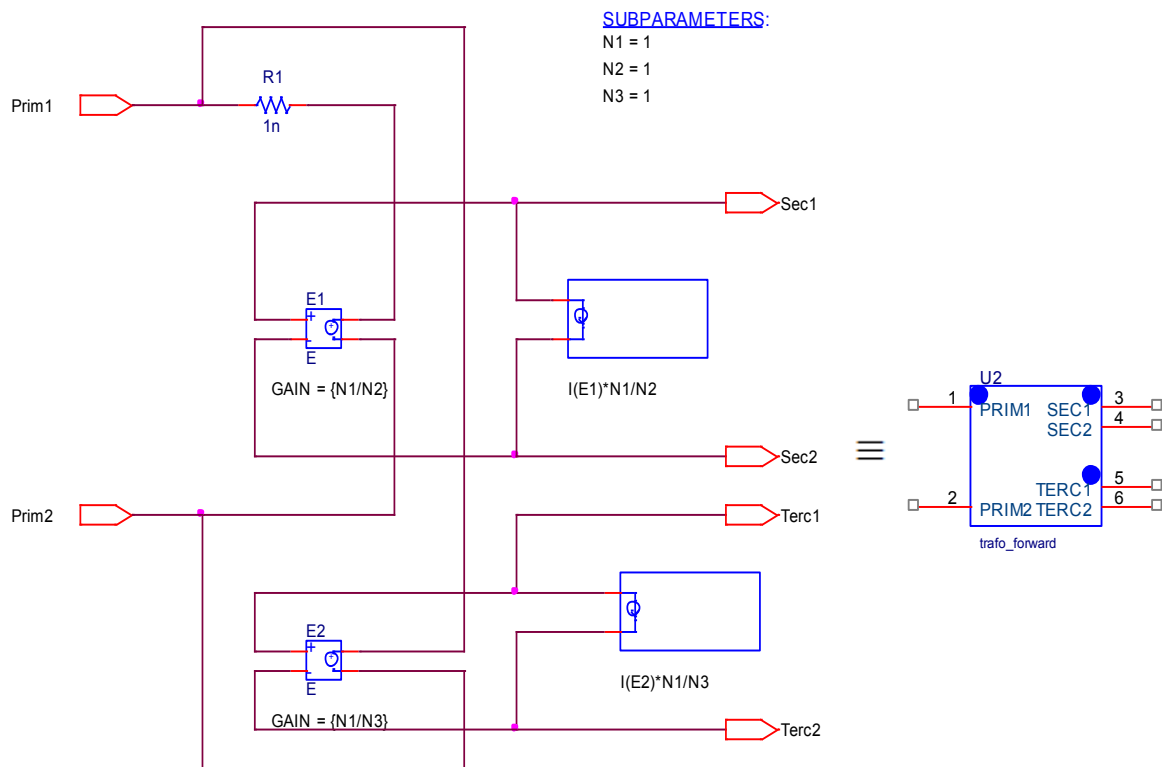


Figura 12.- Circuito del transformador del forward clásico en ORCAD

En este caso, también se ha utilizado la función “*SUBPARAMETERS*”, para poder simular de una forma paramétrica en función de los valores de “ N_1 ”, “ N_2 ” y “ N_3 ” si se desea.

La creación del circuito, con la salvedad del modelo del transformador, no supone mayor dificultad (Figura 13).

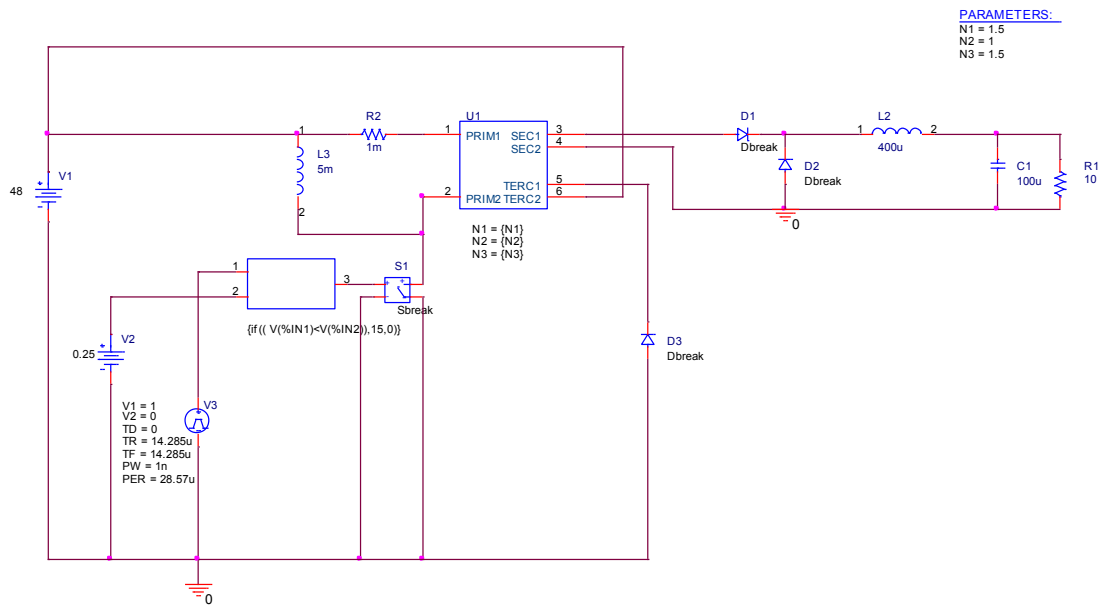


Figura 13.- Circuito forward clásico en ORCAD

En SIMPLORER (Figura 14), existe una biblioteca adicional, en el que aparece el convertidor “*forward*” como componente. En él, se configura tanto la frecuencia de conmutación, el valor de la bobina magnetizante y los valores de las vueltas de los devanados. Solo hay que tener en cuenta que en la señal de control “*ctr*” se introduce una fuente de tensión que simula el ciclo de trabajo y en el pin “*diode CH*”, se debe introducir una función exponencial. Los valores a utilizar son los que vienen por defecto. Por supuesto, también sería posible realizar el convertidor con componentes discretos como interruptores, bobinas, etc., al igual que se ha realizado en los demás simuladores.

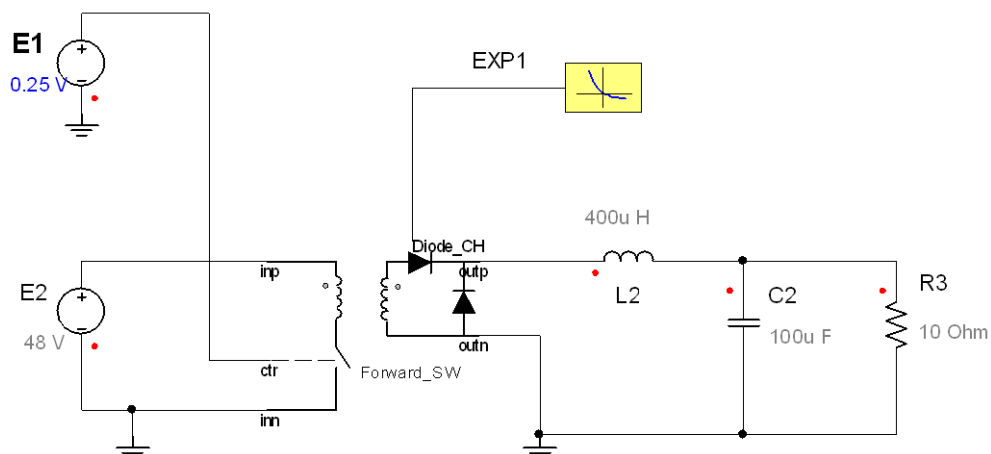


Figura 14.- Circuito forward clásico en SIMPLORER

En cuanto al modelo en MATLAB (Figura 15), la única y mayor complicación ha sido elegir el transformador y los valores de sus componentes. Hay configurar tanto la frecuencia nominal como las tensiones de los devanados. En cuanto a las resistencias e impedancias de los devanados también se tiene que configurar. Para ello se puede hacer en valores del “SI” (Sistema Internacional) o en “pu” (por unidad).

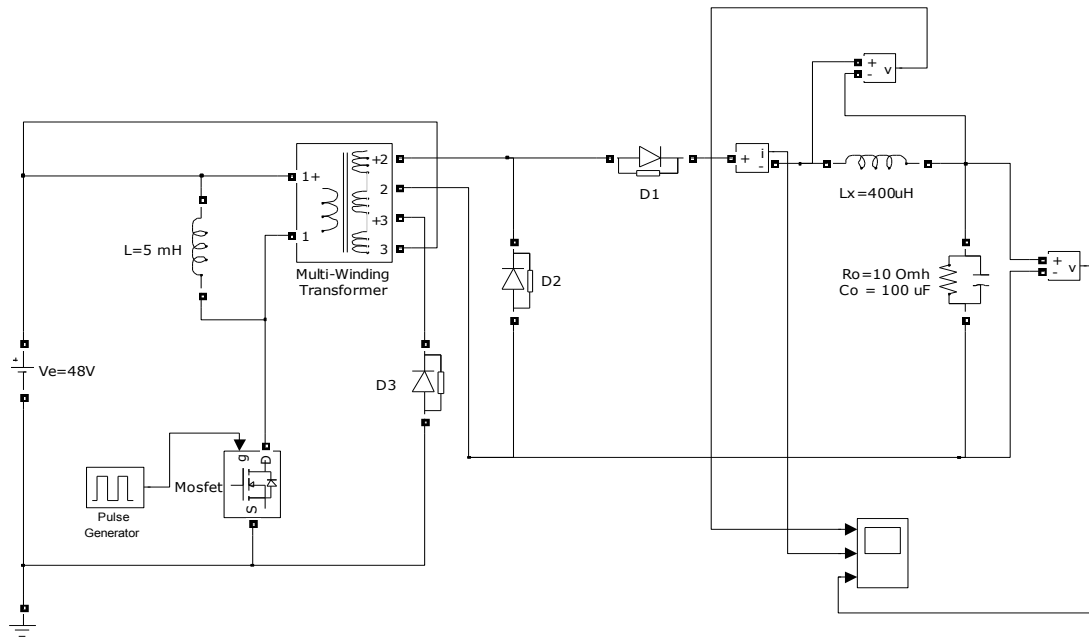


Figura 15.- Circuito forward clásico en MATLAB

b) Forward con enclavamiento activo.

Esta variante del forward actúa como el anterior, pero en vez de tener un tercer devanado y un diodo auxiliar para desmagnetizar el núcleo, posee solo dos devanados (primario y secundario). En este caso, la desmagnetización del transformador se consigue gracias a la incorporación de un interruptor y un condensador adicionales.

El condensador tiene que ser de una capacidad tal que su rizado de tensión no sea demasiado significativo. Cuando el interruptor principal está apagado, el

interruptor de la rama de enclavamiento se activa, dando lugar a la desmagnetización del transformador, ya que se le aplica la tensión inversa del condensador.

El estudio del circuito en PSIM es similar al de tres devanados, sin problemas para su creación y simulación (Figura 16).

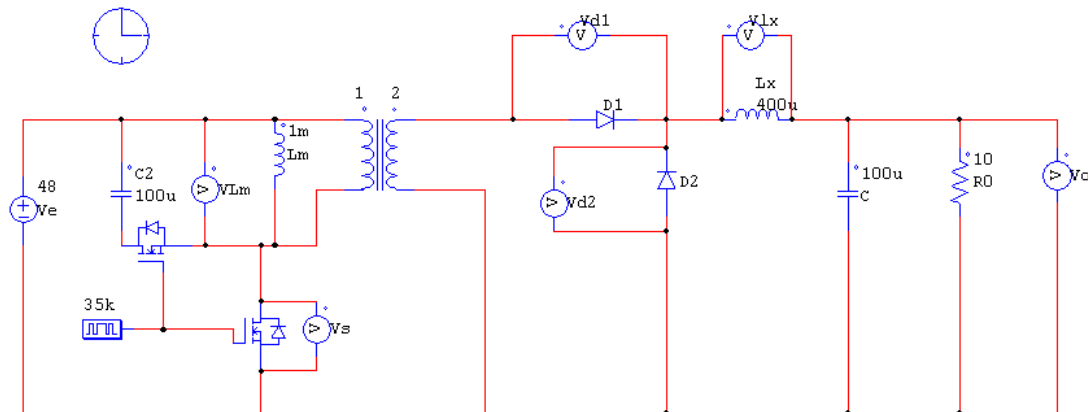


Figura 16.- Circuito forward con enclavamiento activo en PSIM

En ORCAD, al igual que en el flyback, se ha creado un modelo ideal de transformador (Figura 17), que se diferencia del flyback en la posición de los terminales correspondientes del flyback.

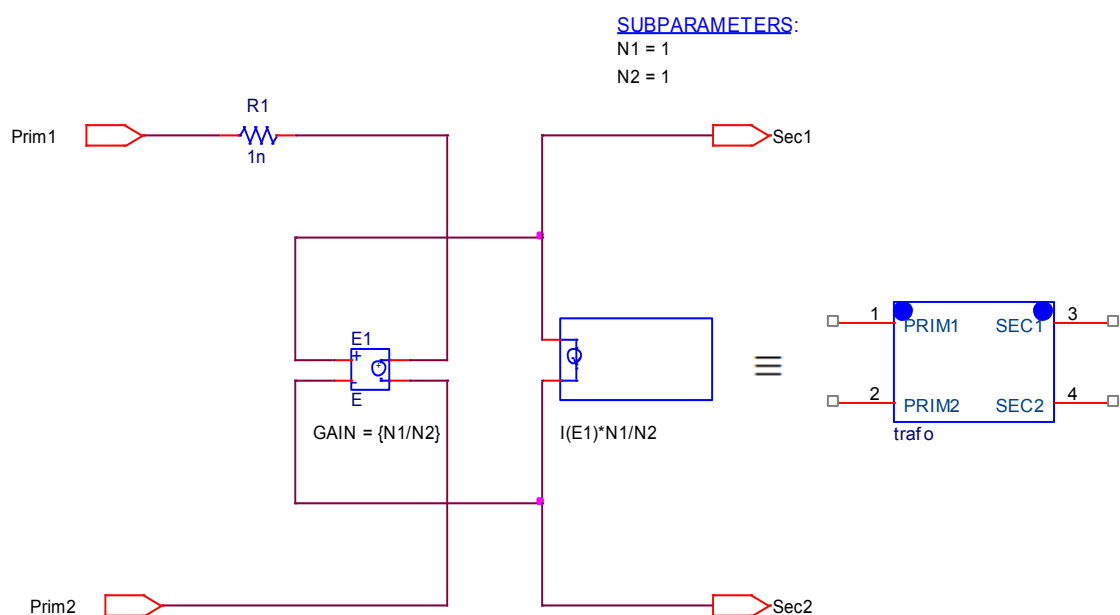


Figura 17.- Circuito del transformador del forward con enclavamiento en ORCAD

En cuanto a la creación del modelo (Figura 18), no supone mayor dificultad.

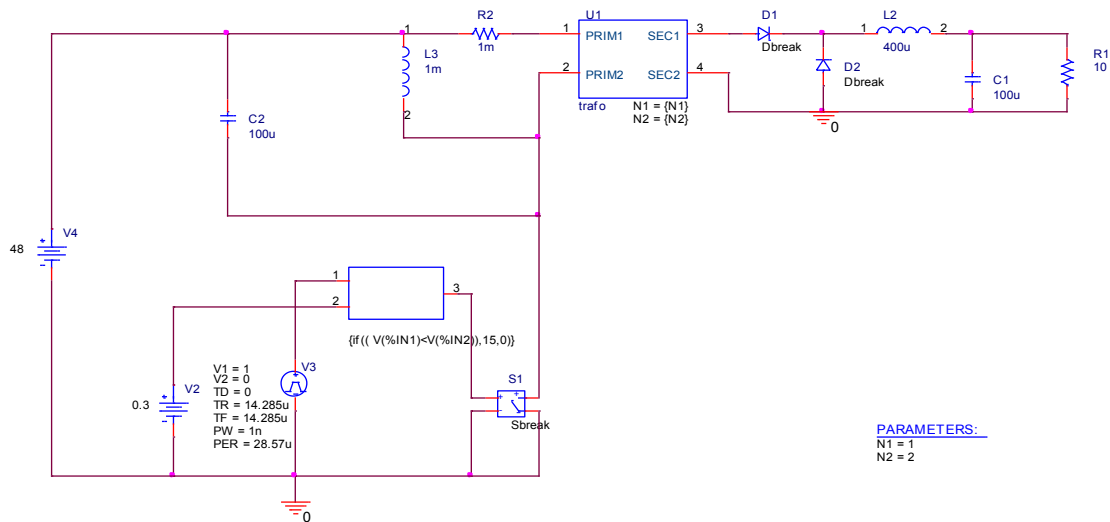


Figura 18.- Circuito forward con enclavamiento activo en ORCAD

En SIMPLORER, existe también un componente llamado “*Forward Active Clamp*” que simula esta topología del forward. Hay que dar valores tanto a la frecuencia de conmutación, la bobina magnetizante y al condensador “ C_o ” de desmagnetización del transformador (Figura 19).

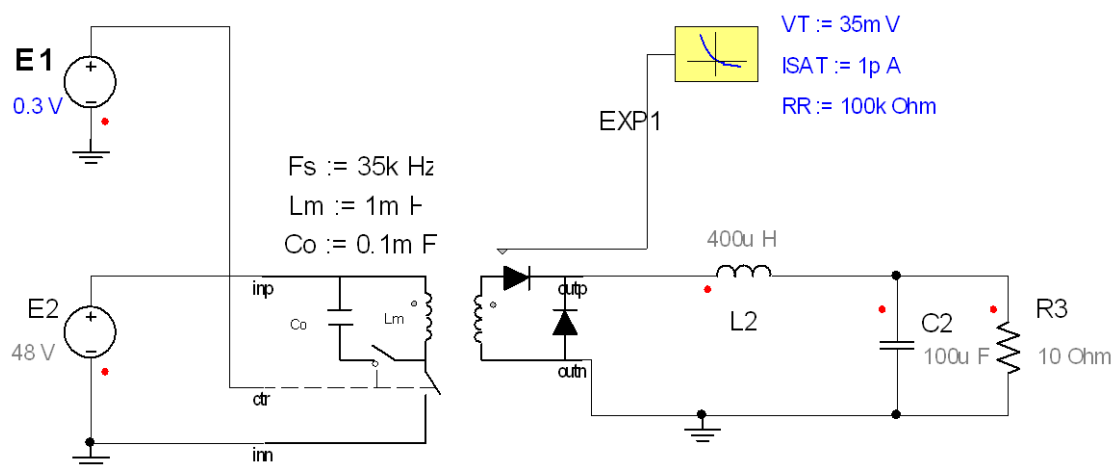


Figura 19.- Circuito forward active clamp en SIMPLORER

En cuanto al circuito en MATLAB (Figura 20), ha sido bastante más sencillo la creación del mismo ya que en este caso solo son 2 devanados, aunque ha habido que

configurar los valores del transformador (tensiones nominales del primario y secundario, nº vueltas devanados, etc.).

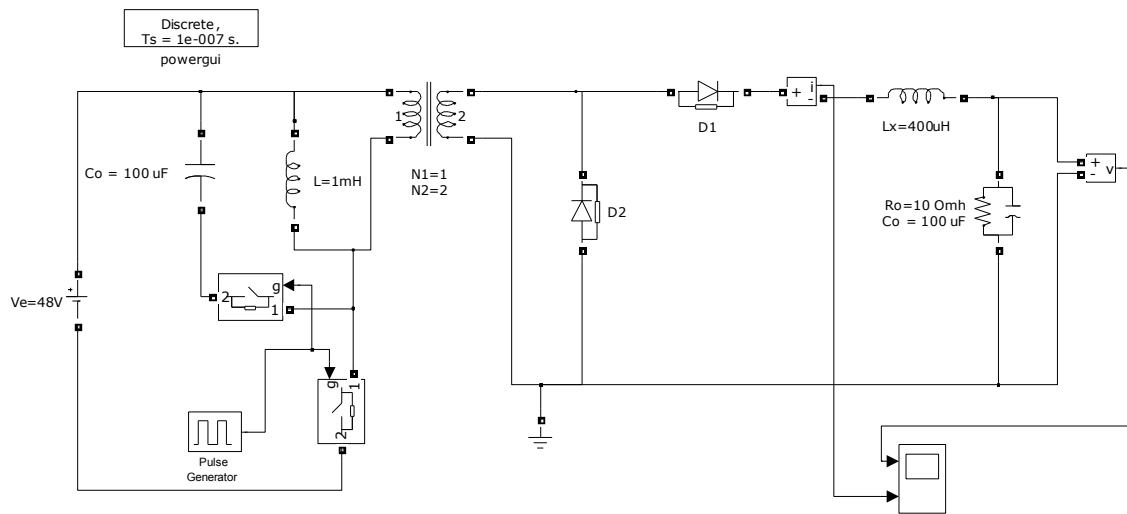


Figura 20.- Circuito forward con enclavamiento activo en MATLAB

3.2.- Conversión CA-CC: Rectificadores.

Un rectificador convierte una entrada de AC en DC. Su finalidad es generar una salida continua para proporcionar una onda de tensión o corriente que tenga una determinada componente continua.

3.2.1.- Monofásicos

a) *Media Onda*⁹

La simulación de este modelo en SIMPLORER (Figura 22) es la más sencilla ya que solo es necesario tener en cuenta que para el disparo del tiristor es necesaria una fuente de pulsos con un retraso que simulará el ángulo de disparo, el cual ha debido ser calculado previamente (Figura 21).

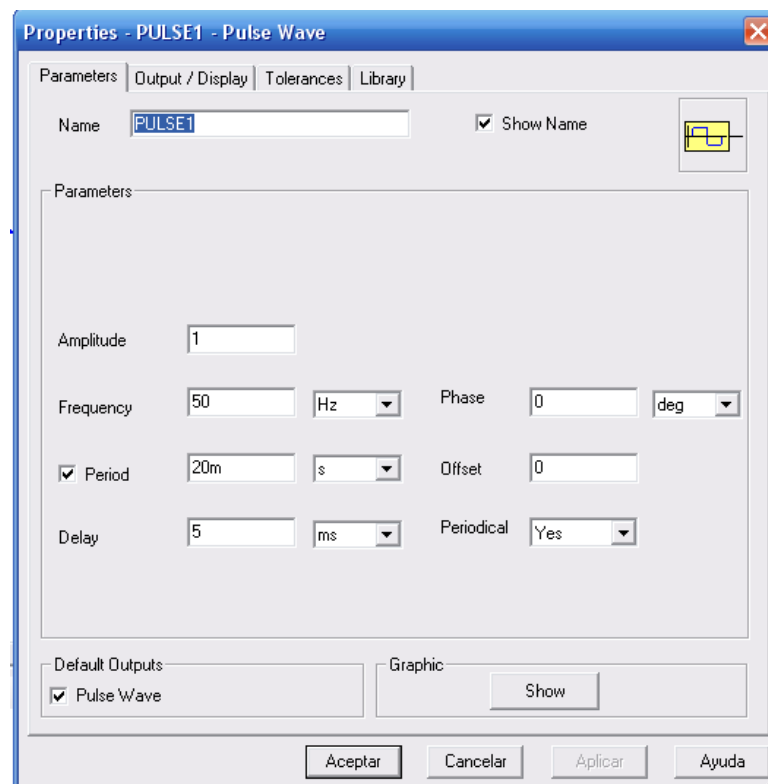


Figura 21.- Circuito de disparo del tiristor en SIMPLORER

⁹ Los valores para el estudio de este modelo son una entrada senoidal de 220V_{ef} y 50 Hz, un ángulo de disparo de 60° y una carga resistiva de 50 Ω.

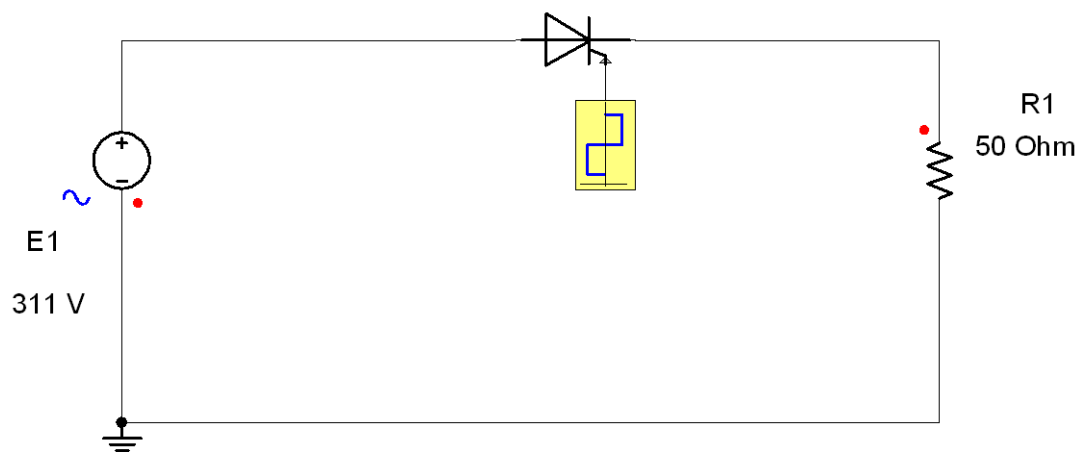


Figura 22.- Circuito rectificador monofásico media onda en SIMPLORER

En PSIM, el disparo del tiristor (Figura 23) es más complicado y se realiza mediante un circuito externo al propio rectificador, en el que se especifica el ángulo de disparo del tiristor.

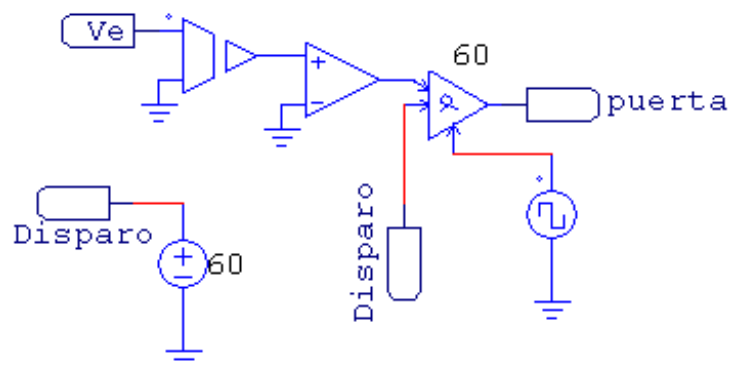


Figura 23.- Circuito de disparo del tiristor en PSIM

El circuito de simulación del rectificador de media onda no supone mayor dificultad (Figura 24).

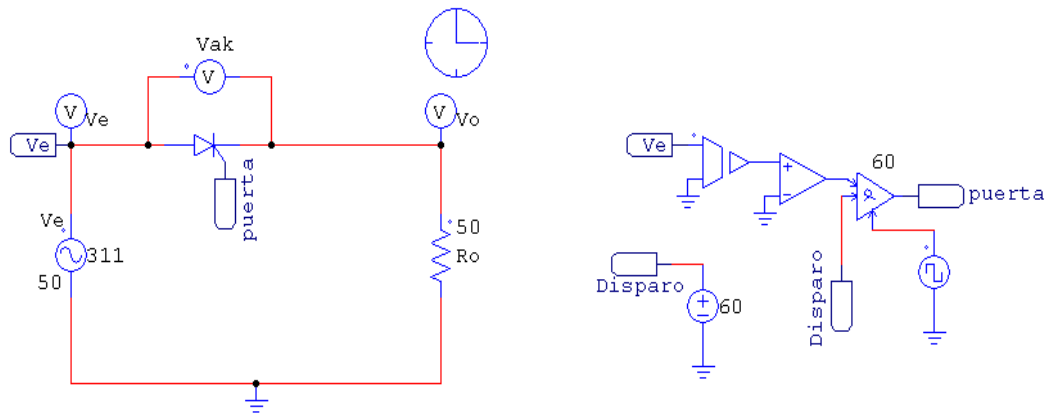


Figura 24.- Circuito rectificador monofásico media onda en PSIM

En cuanto al modelo en MATLAB (Figura 25), se debe realizar el ángulo de disparo del tiristor mediante una comparación de una señal “*diente de sierra*” con una constante, realizando una conversión entre valores enteros y angulares¹⁰.

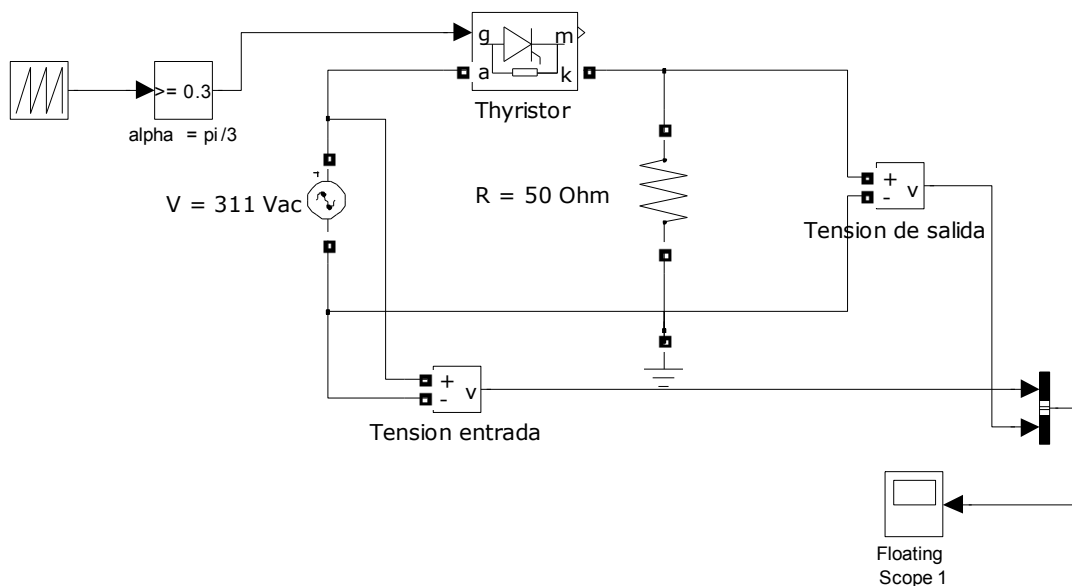


Figura 25.- Circuito rectificador monofásico media onda en MATLAB

¹⁰ El periodo de la señal “diente de sierra” se realiza entre 0 y $T/2$, siendo los valores de referencia entre “0” y “ π ”, por lo que la comparación se deberá realizar entre dichos valores.

Este modelo consiste en la comparación de la entrada del circuito " V_e " y salida " V_k " del diodo. Si la entrada es mayor que la salida, se introduce dicha señal para la carga de un condensador mediante una fuente de corriente constante. En el momento que el interruptor " S_2 " se cierra, el condensador " C_1 " se carga, dando lugar a una señal " V_c " que se compara con el ángulo de disparo del tiristor, obteniendo una señal que se comparará mediante una puerta lógica " AND " que solo será verdadera cuando la señal de entrada senoidal sea mayor que la tensión de cátodo. La salida de dicha puerta activará el interruptor principal " S_1 "

En este caso, se garantiza que el valor de " α "¹¹ es el valor del ángulo de conducción a partir del momento en el que el tiristor puede dispararse.

Después de realizar este estudio, se crea el componente "*tiristor*", el cual introduciremos en el circuito final (Figura 27).

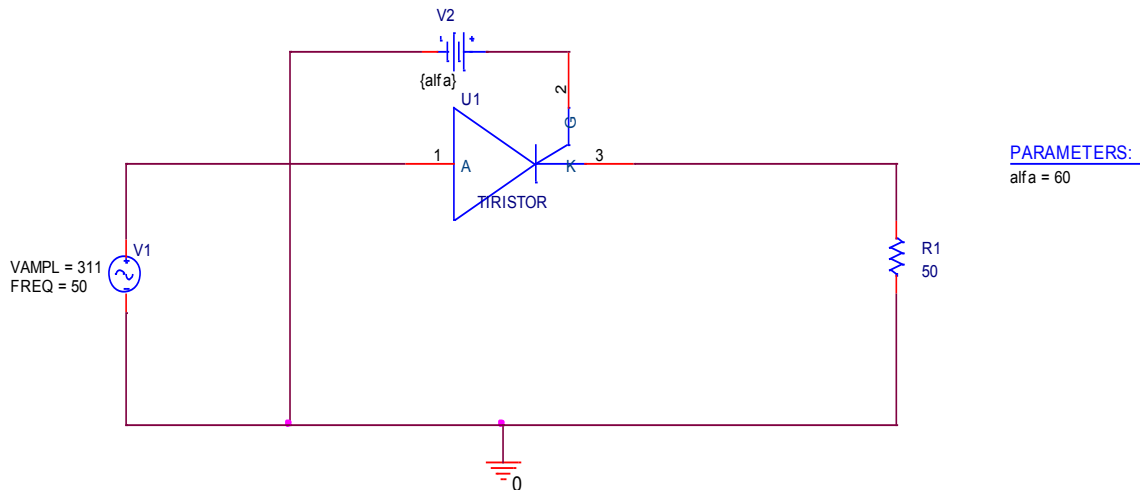


Figura 27.- Circuito rectificador monofásico media onda en ORCAD

b) Onda Completa¹²

En el rectificador monofásico de onda completa no ha habido mayor complicación en ninguno de los cuatro simuladores, ya que se ha aplicado lo estudiado en el anterior modelo pero en un puente de tiristores.

En cuanto a MATLAB (Figura 28), se sigue utilizando la comparación entre el "*diente de sierra*" y una constante, con la salvedad que dicha señal es la entrada para los cuatro tiristores, ya que trabajan en parejas (" T_1 " con " T_4 ", y " T_2 " con " T_3 ").

¹¹ El valor "alfa" es un parámetro, de forma que se puede simular de forma paramétrica para ver los distintos resultados con distintos valores de "alfa".

¹² Los valores para el estudio de este modelo son una entrada senoidal de 220V_{ef} y 50 Hz, un ángulo de disparo de 30° y una carga resistiva de 50 Ω.

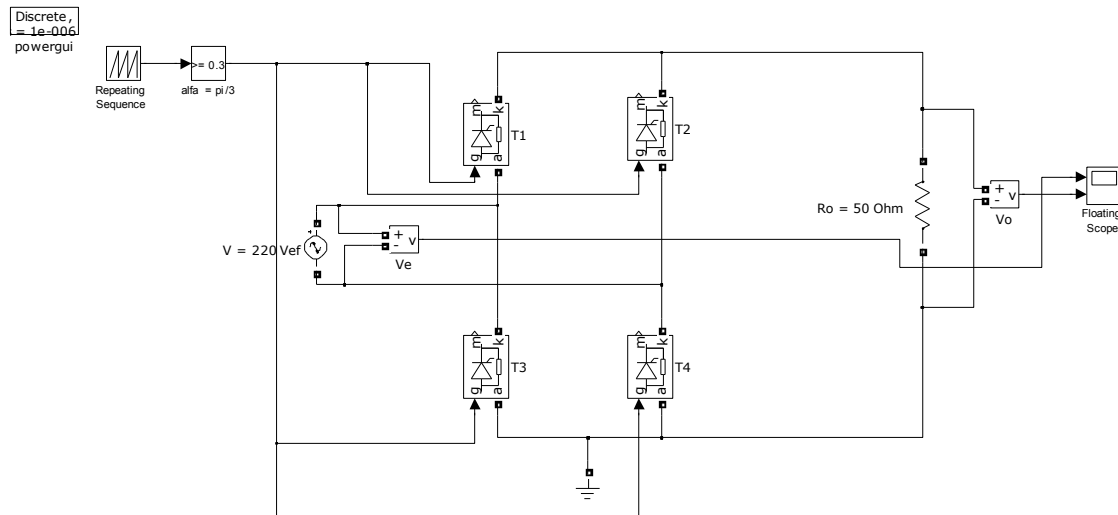


Figura 28.- Circuito rectificador monofásico de onda completa en MATLAB

En PSIM, existe un bloque ideal que simula el puente de tiristores, en el que solo hay que incluir la señal de disparo, al cual se crea de la misma forma que en rectificador de media onda (Figura 29).

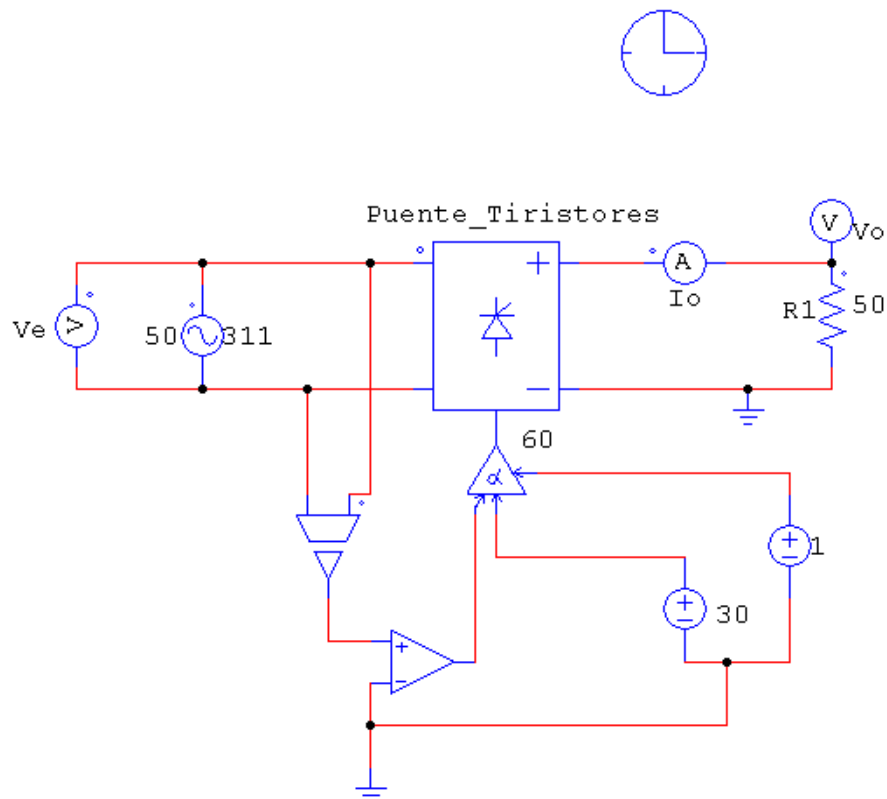


Figura 29.- Circuito rectificador monofásico de onda completa en PSIM

En el circuito en ORCAD (Figura 30), se utiliza el componente que se creó para simular el comportamiento del tiristor, considerando la señal de disparo una fuente de tensión continua de valor el ángulo de disparo.

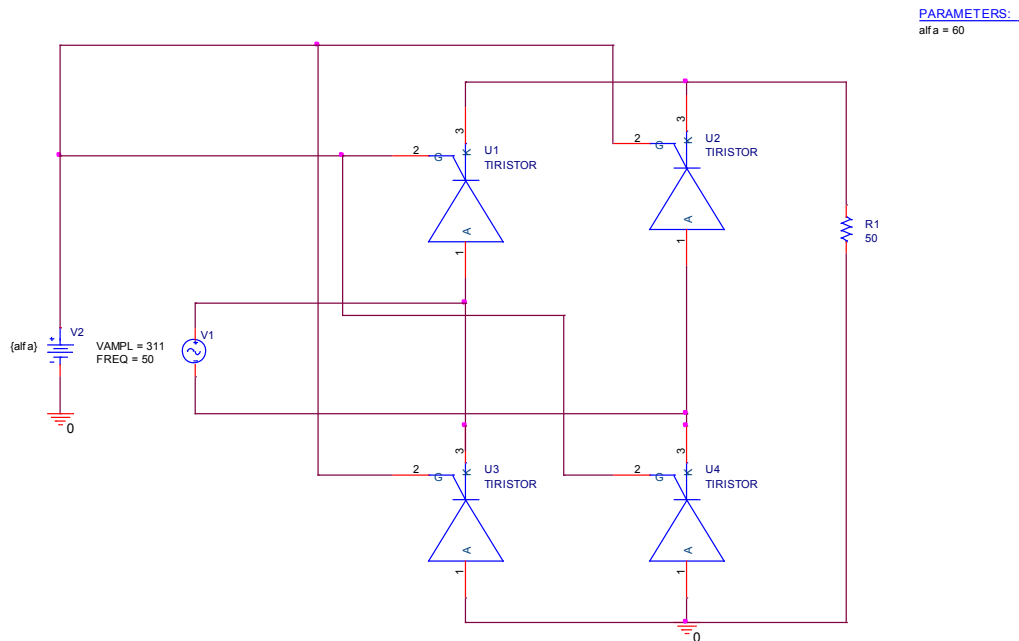


Figura 30.- Circuito rectificador monofásico de onda completa en ORCAD

En SIMPLORER (Figura 31), a diferencia del de media onda, se utilizan dos fuentes de pulsos, con un desfase entre ellas de " $\frac{T}{2} + \text{alfa}$ ", teniendo en cuenta que se debe calcular el ángulo de disparo en función del periodo (si la $f=50$ Hz, entonces $T=20$ ms (1 periodo completo (360°)), por lo que para $\text{alfa}=30^\circ$ son 1.667 ms).

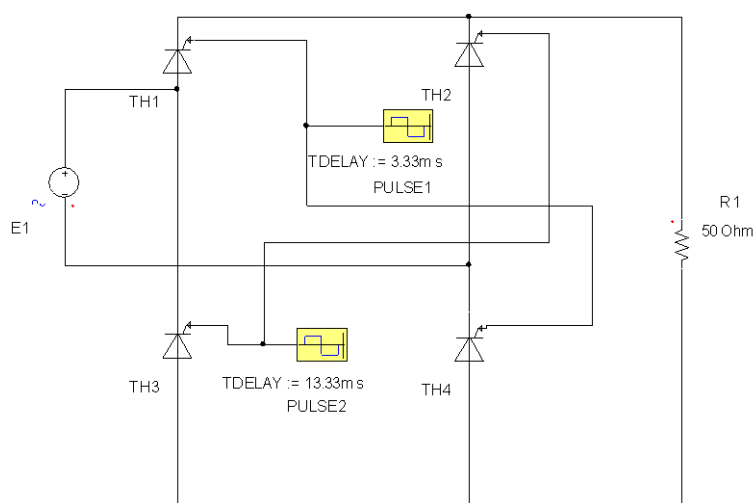


Figura 31.- Circuito rectificador monofásico de onda completa en SIMPLORER

3.2.2.- Trifásicos¹³

a) Media Onda.

Los modelos trifásicos de los rectificadores son aquellos rectificadores en los que se utilizan las tres fases, que están desfasadas entre ellas 120°. Es por eso que en todos los modelos han surgido bastantes problemas a la hora de que los disparos de los tiristores fueran los adecuados en los momentos precisos.

El modelo en ORCAD ha sido el más sencillo de lograr ya que se puede utilizar la misma señal de disparo para los tres tiristores (Figura 32).

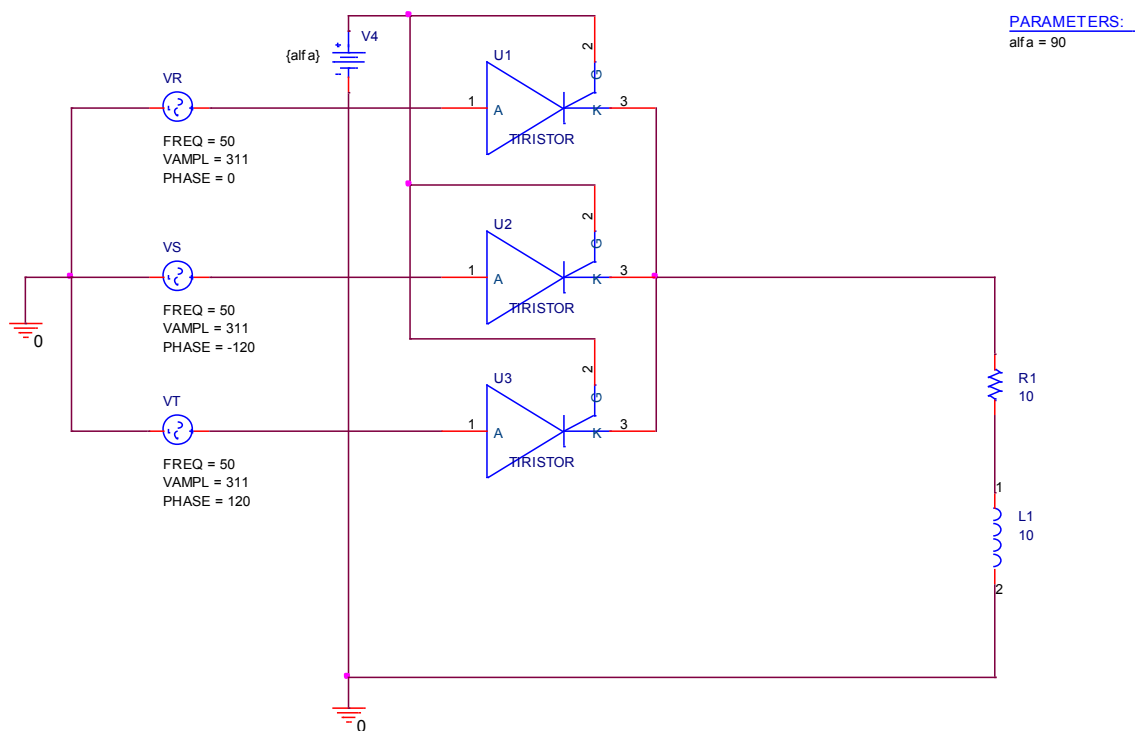


Figura 32.- Circuito rectificador trifásico de media onda en ORCAD

En PSIM, ha sido necesario realizar tres circuitos de disparo, comparando cada señal trifásica de fase con “tierra”, para que así dispare cada tiristor en el momento adecuado (Figura 33).

¹³ En este estudio, la carga se compone de una resistencia y de una inductancia de un valor muy grande, lo que nos permite trabajar con un rizado de corriente muy pequeño.

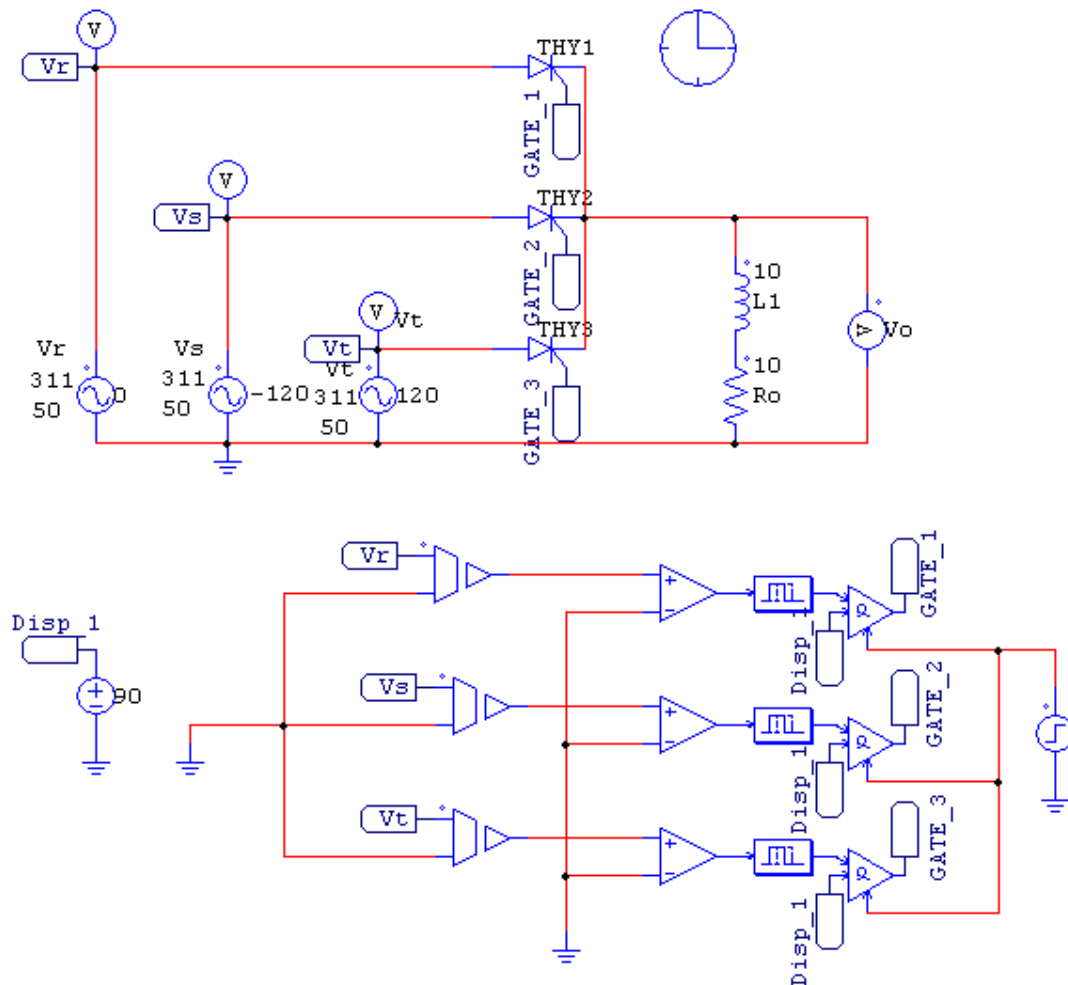


Figura 33.- Circuito rectificador trifásico de media onda en PSIM

En cuanto a SIMPLORER, la mayor dificultad ha sido que hay que crear un “*delay*” (retraso) entre todas las señales que generan el ángulo de disparo de los tiristores, ya que la señal de fase va retrasada 30° con respecto al origen de tiempos (Figura 34).

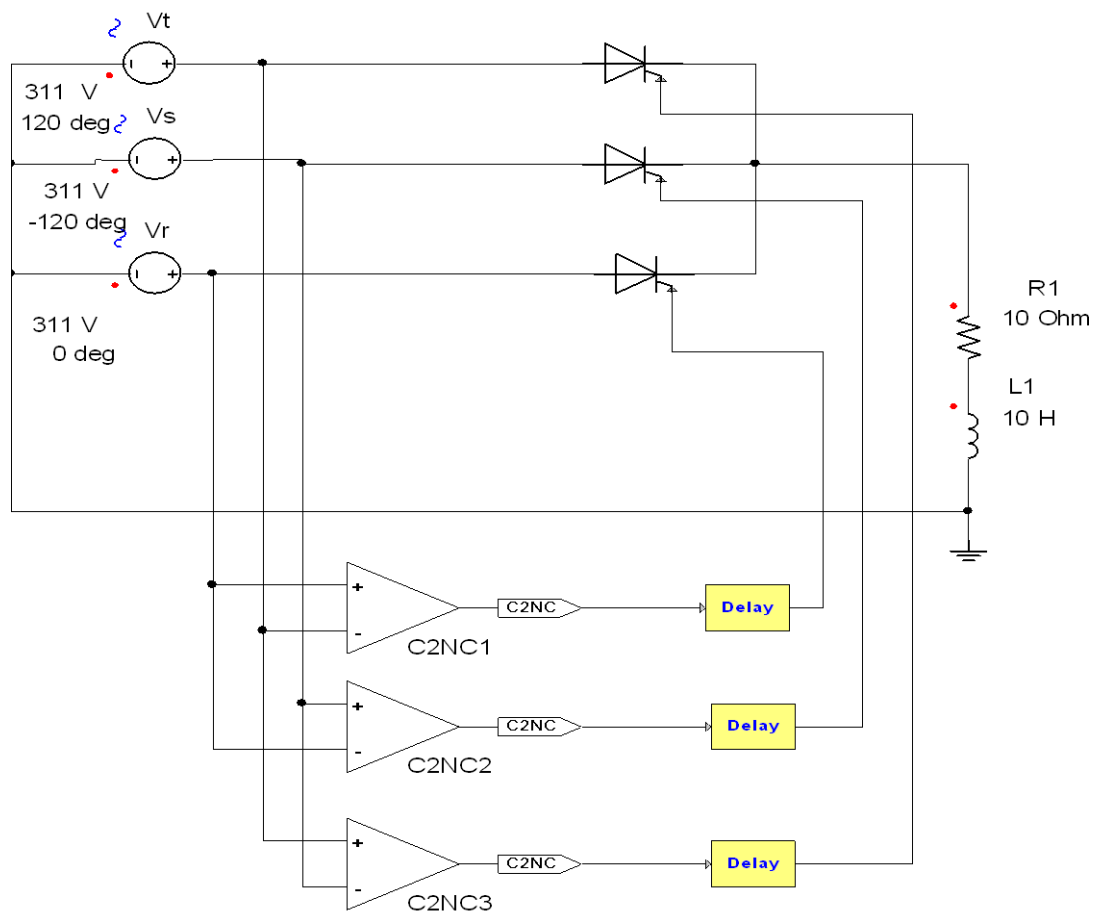


Figura 34.- Circuito rectificador trifásico de media onda en SIMPLORER

En MATLAB (Figura 35), ha sido más complicado el conseguir correctamente el disparo de los tiristores. Para ello, la señal “*diente de sierra*” tiene como periodo la de las fuentes trifásicas (20 ms).

Se han incluido unos bloques “*Transport Delay*” que generan un retraso de 30° en “*Transport delay 1*” para sincronizarla con el origen de tiempos, y de 120° para generar correctamente las siguientes fases.

Luego se incluye un bloque comparador que simula el ángulo de disparo, y por último, se ha colocado un “*Edge Detector*”, el cual sirve para que cuando la señal pase por “0”, se reinicie el contador, de tal forma que simula todos los ciclos de cada una de las fases.

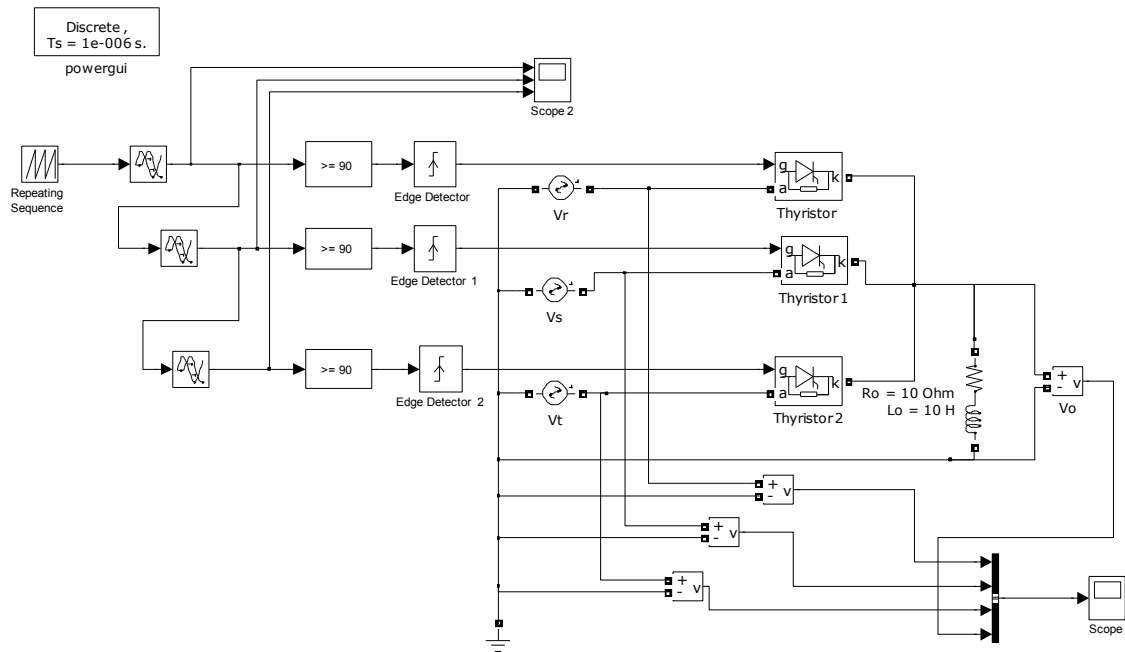


Figura 35.- Circuito rectificador trifásico de media onda en MATLAB

b) Onda completa

En el rectificador trifásico de onda completa no han surgido tantos problemas a la hora de simular y de conseguir correctamente el ángulo de disparo como en el modelo anterior, a excepción de PSIM, que si ha sido un estudio más laborioso, como se verá más adelante.

En cuanto a ORCAD (Figura 36), la creación y simulación del circuito ha sido bastante sencilla y sin mayores problemas, ya que como en modelos anteriores, con una misma fuente que simule el ángulo de disparo se han conseguido todos éstos para los seis tiristores.

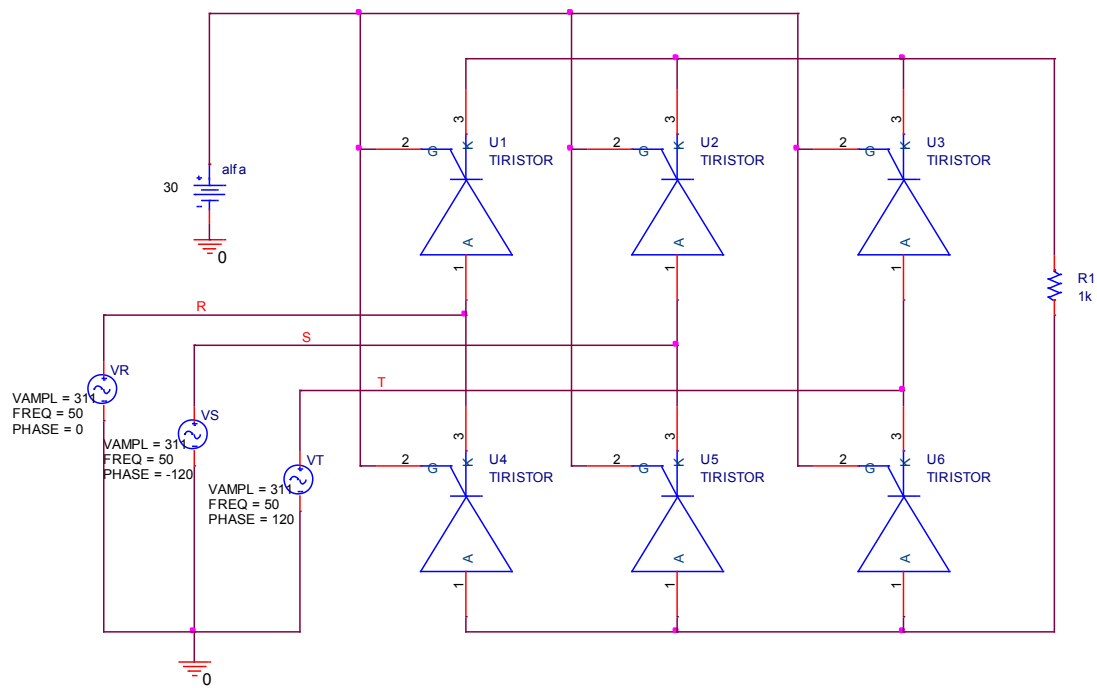


Figura 36.- Circuito rectificador trifásico de onda completa en ORCAD

En SIMPLORER y MATLAB (Figura 37 y Figura 38), existen bloques que simulan un puente de tiristores trifásico. La única salvedad ha sido en MATLAB, donde a partir de la ayuda que se proporciona, se ha configurado los parámetros necesarios para utilizar los bloques, tanto del bloque de control “*Synchronized 6-Pulse Generator*”, el cual genera los pulsos de control (Figura 39), como del puente de tiristores (Figura 40).

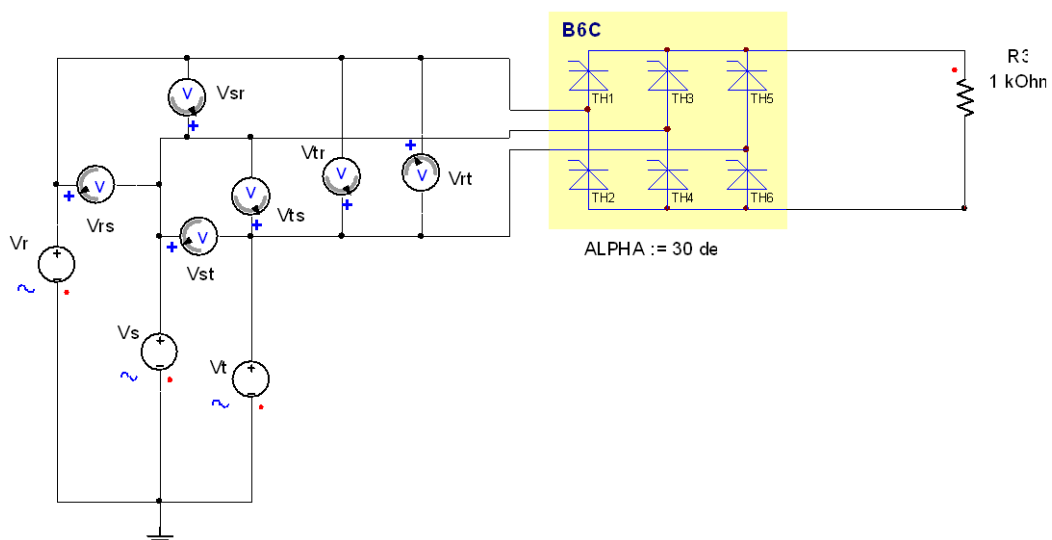


Figura 37.- Circuito rectificador trifásico de onda completa en SIMPLORER

Discrete,
= 1e-006
powergui

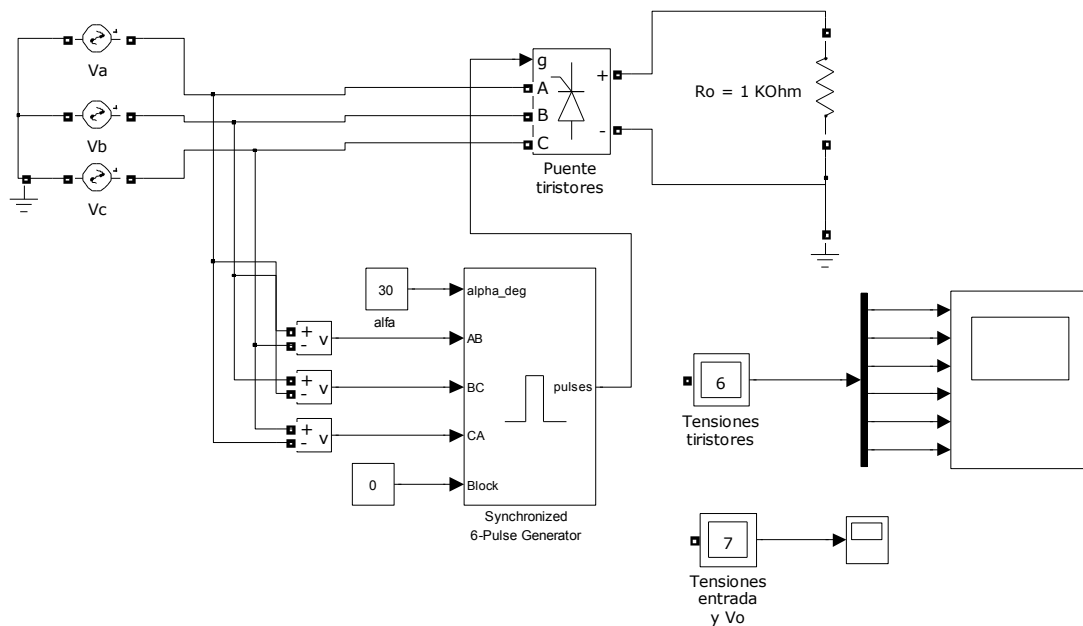


Figura 38.- Circuito rectificador trifásico de onda completa en MATLAB

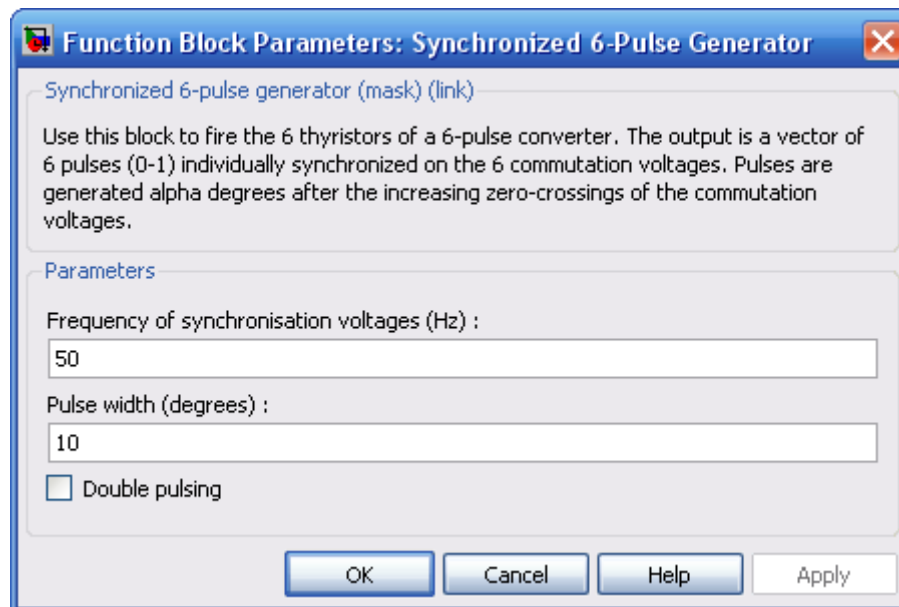


Figura 39.- Configuración generador de pulsos en MATLAB

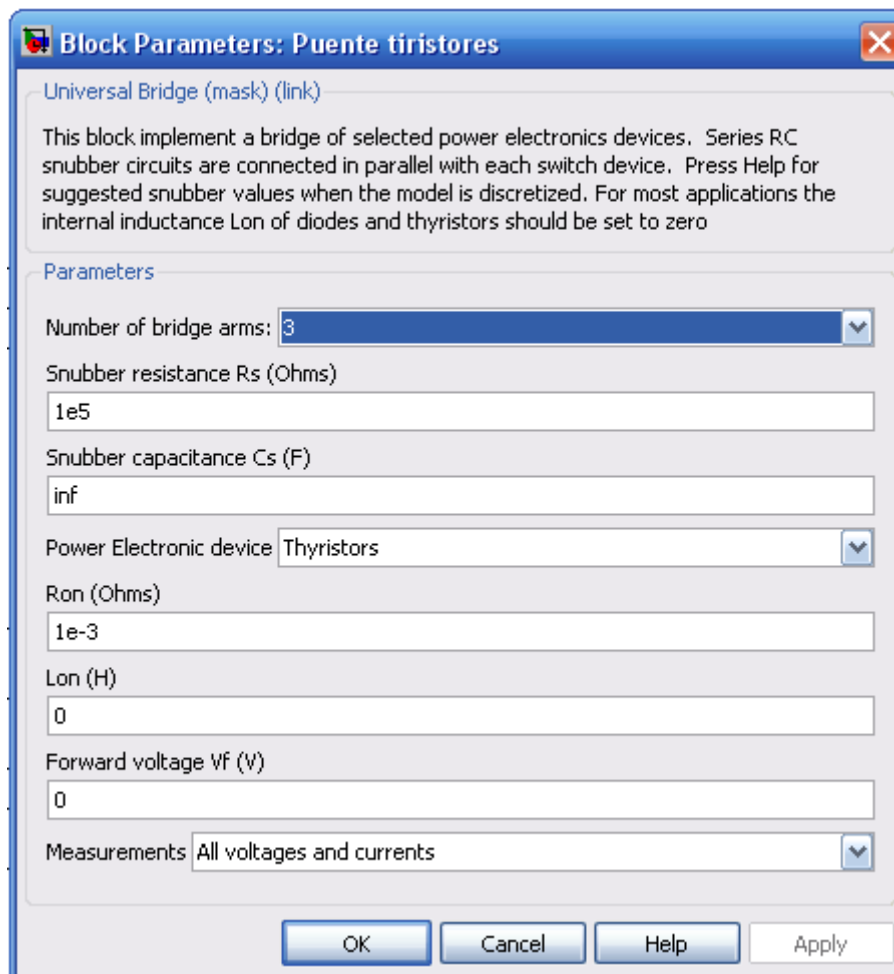


Figura 40.- Configuración puente tiristores en MATLAB

En cuanto a PSIM, el mayor problema surgido ha sido conseguir el disparo de los tiristores. Para generar la señal de sincronización de cada tiristor, se ha utilizado la tensión de línea correspondiente a su tensión ánodo-cátodo, justo antes de que empiece a conducir. Cuando dicha tensión pasa por “0”, el tiristor está polarizado en directa, y puede empezar a conducir, correspondiendo con “ $\alpha = 0$ ”.

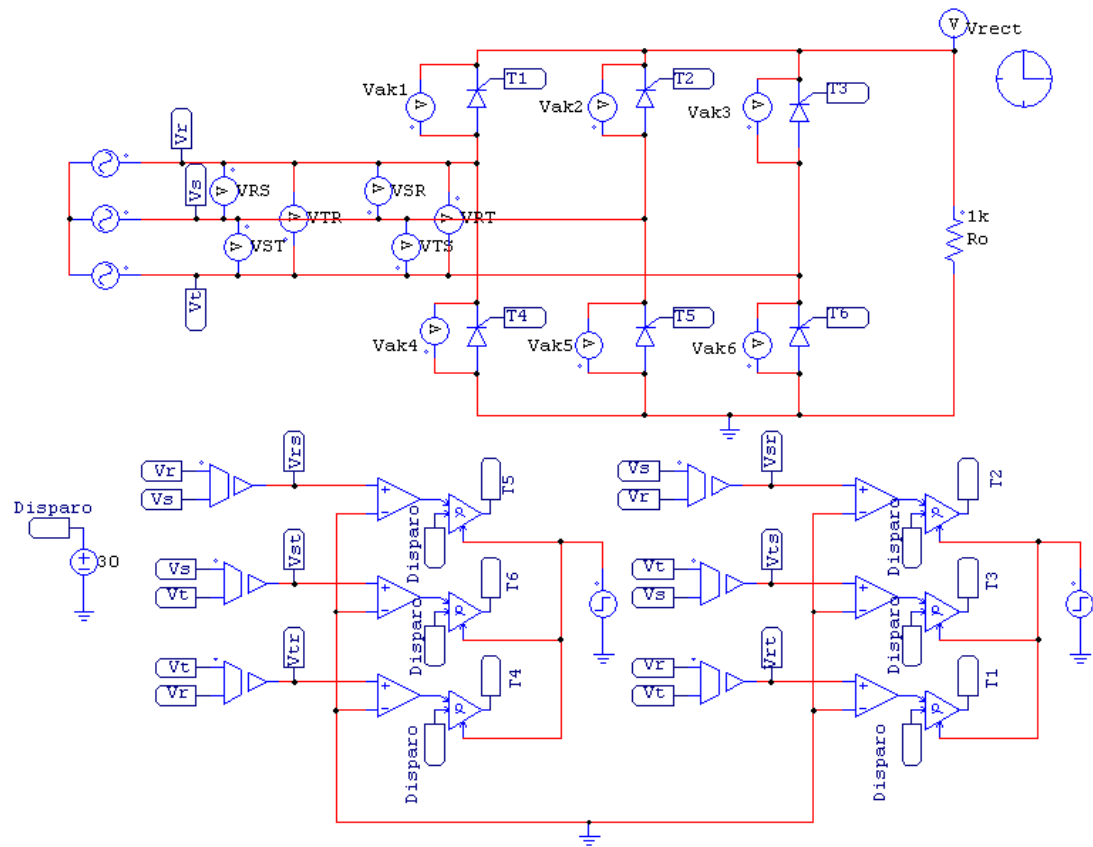


Figura 41.- Circuito rectificador trifásico de onda completa en PSIM

3.3.- Conversión CC-CA: Inversores

Un inversor es un circuito que convierte la corriente continua en alterna, es decir, transfieren potencia desde una fuente de continua a una carga de alterna.

3.3.1.- No modulados

a) Medio puente

El circuito físico es una fuente de tensión con un condensador en paralelo con cada IGBT, de tal forma que en cada condensador hay una caída de tensión de valor la mitad de la fuente de tensión. Para el estudio, se considera directamente dos fuentes de tensión de valor la caída en cada condensador. La carga es resistiva de valor “ $1\text{ K}\Omega$ ” y las fuentes de tensión continua de valor “ 200 V ”. El estudio de este modelo en todos los simuladores ha sido bastante sencillo en todos los casos.

En cuanto a PSIM (Figura 42), ha sido el más sencillo de simular ya que la creación del modelo es directo, teniendo en cuenta que el IGBT se alimenta con una fuente de pulsos con ciclo de trabajo del “ 50% ”.

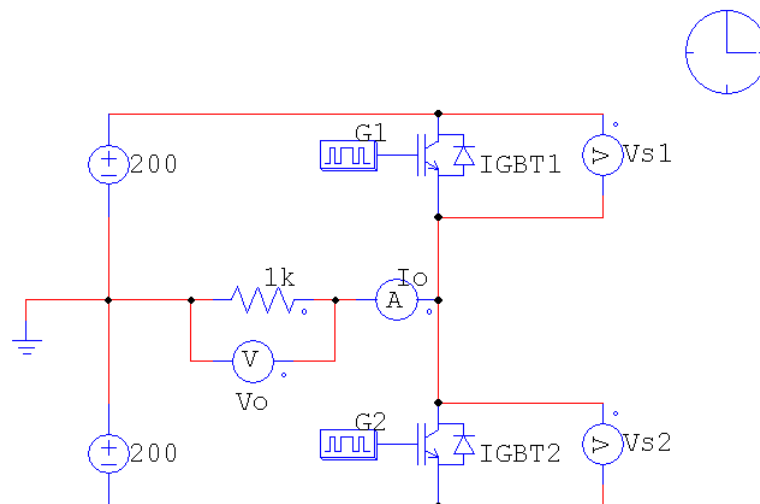


Figura 42.- Circuito inversor no modulado monofásico de medio puente en PSIM

La frecuencia escogida de conmutación es de “20 KHz.”, por lo que el periodo de conmutación es de “50 μs ”¹⁴; para configurar las fuentes de pulsos, se deben configurar en grados, es decir, los “360 grados” es el periodo completo, por lo que por una simple regla de tres, se realiza el cálculo de los periodos “ T_{ON} ” y “ T_{OFF} ”. Como se puede observar, el “ T_{ON} ” de la fuente que alimenta el “ $IGBT_1$ ” va desde “0” hasta “25 μs ”, y el de la fuente del “ $IGBT_2$ ”, desde “25 μs ” a “50 μs ” (Figura 43).

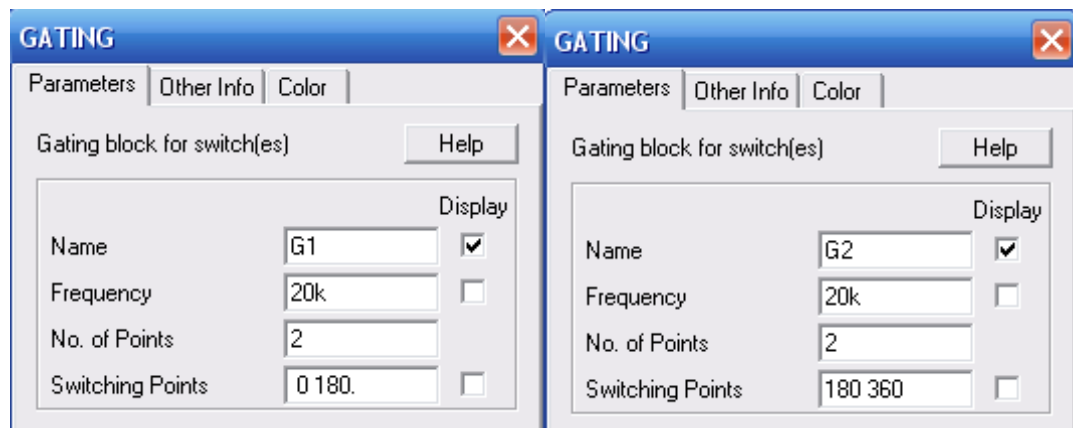


Figura 43.- Configuración fuentes de pulsos en PSIM

En SIMPLORER y MATLAB (Figura 44 y Figura 45), al igual que en PSIM, la única complicación es configurar correctamente las fuentes de pulsos que alimentan los IGBT's. Hay que introducir un “delay” de valor “ $T/2$ ” en la fuente que alimenta el “ $IGBT_2$ ” de la mitad del periodo, para que sea una fuente de pulsos cuadrados y no disparen los IGBT's a la vez.

¹⁴ La frecuencia de la tensión de salida, normalmente, es de 50 Hz, siendo su periodo de 20 ms.

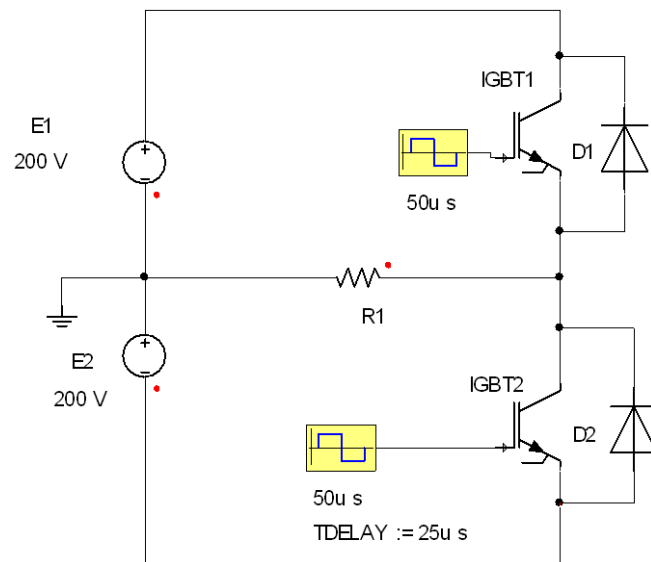


Figura 44.- Circuito inversor no modulado monofásico de medio puente en SIMPLORER

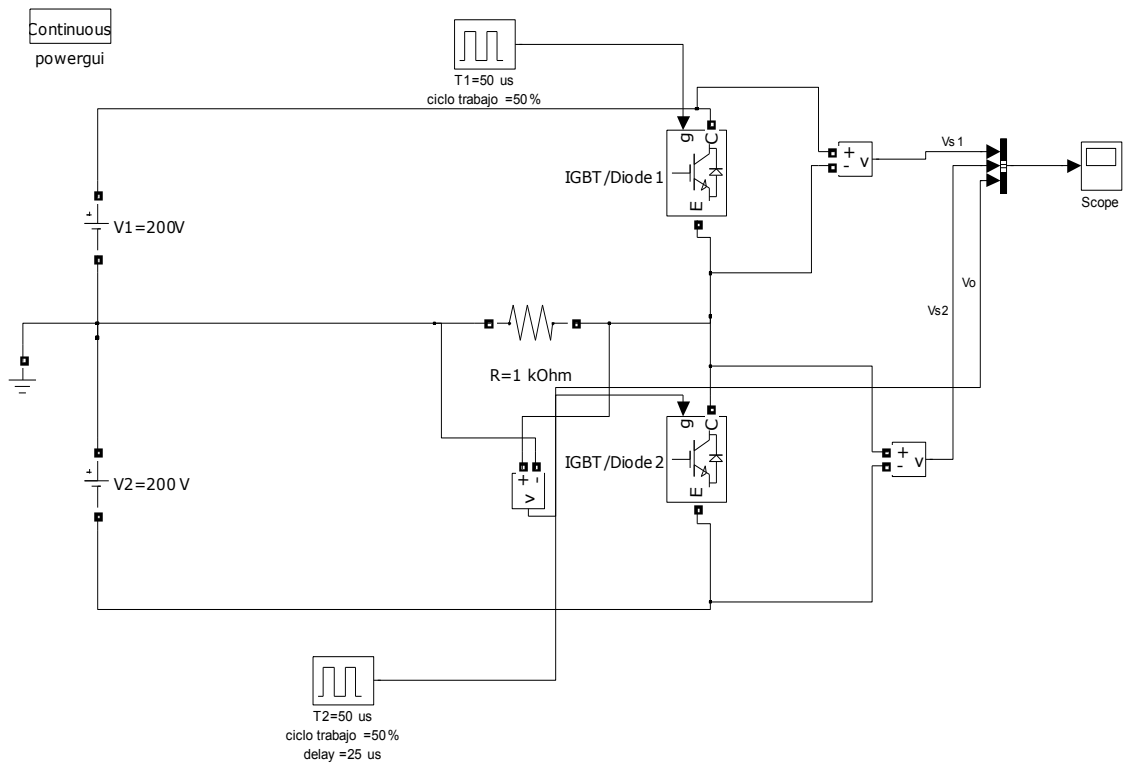


Figura 45.- Circuito inversor no modulado monofásico de medio puente en MATLAB

En ORCAD (Figura 46), lo que se hace es configurar las fuentes de pulsos que alimentan a los IGBT's entre puerta y emisor, con los valores " V_H " y " V_L " cambiados, es decir, cuando una está a nivel alto de " 200 V ", la otra tiene que estar en valor bajo " 0 ", para que no funcionen los dos dispositivos a la vez.

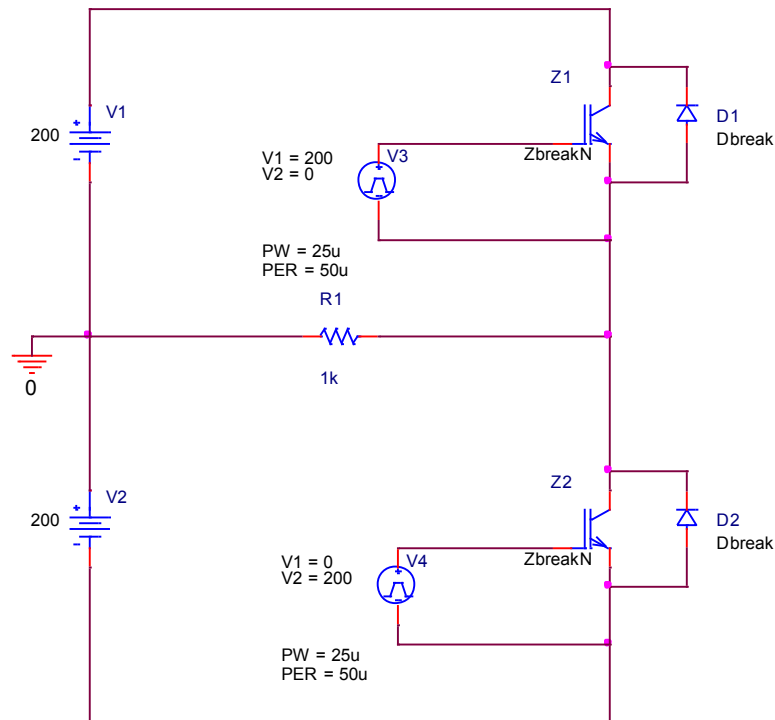


Figura 46.- Circuito inversor no modulado monofásico de medio puente en ORCAD

b) Puente completo¹⁵

En cuanto a este circuito, ha sido bastante sencillo ya que es trabajar en la misma línea que el medio puente, con la salvedad de que en este caso, es la fuente de continua quien alimenta a los IGBT's y no la tensión que cae en los condensadores, y que cada fuente de pulsos alimenta a dos IGBT's de distintas ramas (una a " $IGBT_1$ " y " $IGBT_4$ ", y otra a " $IGBT_2$ " y " $IGBT_3$ ").

¹⁵ En este caso, la carga es una carga resistiva de $1\text{ K}\Omega$ junto con una carga inductiva de 10 mH , con una frecuencia de conmutación de 20 KHz. , y una fuente de tensión de entrada de valor 400 V

En PSIM, MATLAB y SIMPLORER (Figura 47, Figura 48 y Figura 49), la señal de control de los IGBT's no tiene por qué referirse al emisor, sino que se refiere a "0 V". Esto simplifica mucho los circuitos, aunque en la práctica se aleje del esquema real de IGBT con driver. En ORCAD (Figura 50), sin embargo, la señal de disparo se refiere al emisor de cada IGBT, utilizando un bloque "EVALUE" para realizar este fin, ya que las fuentes están referidas a "0 V".

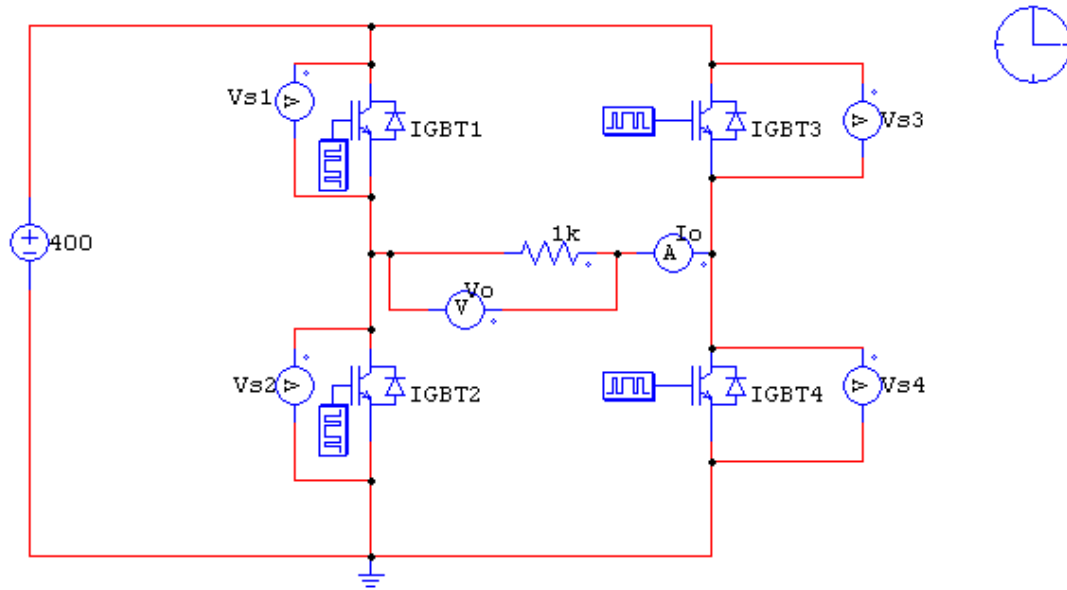


Figura 47.- Circuito inversor no modulado monofásico de puente completo en PSIM

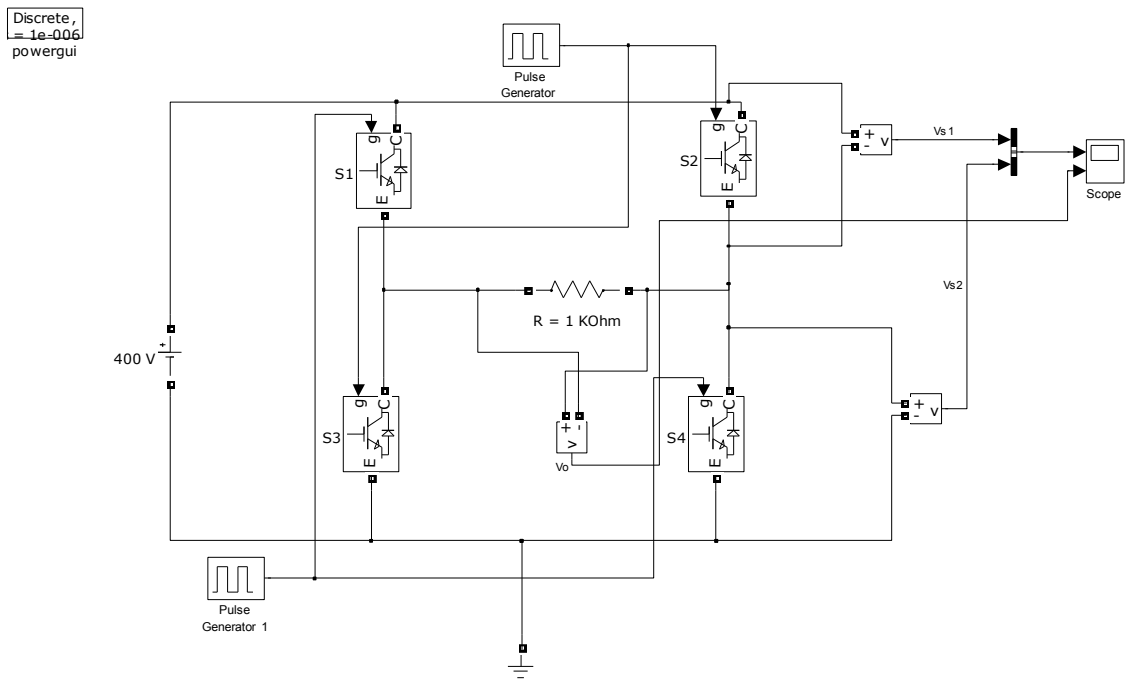


Figura 48.- Circuito inversor no modulado monofásico de puente completo en MATLAB

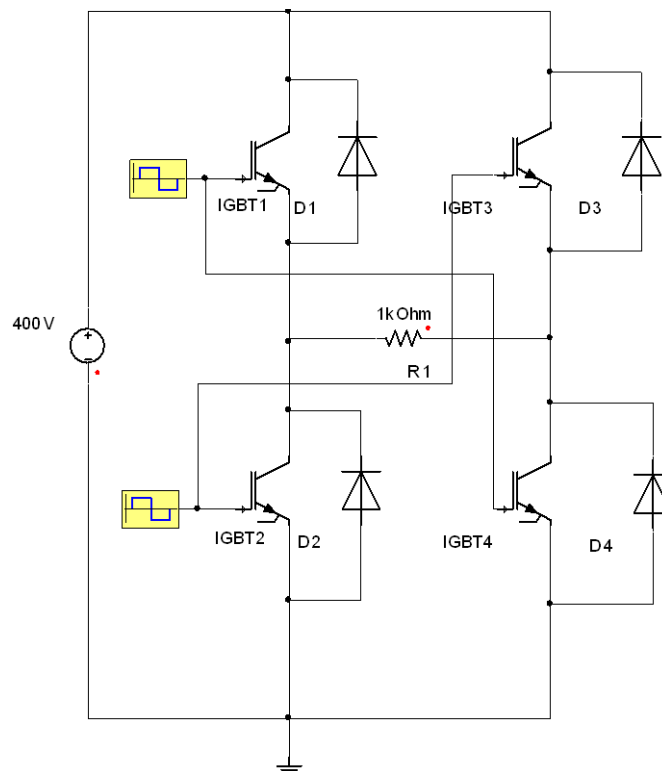


Figura 49.- Circuito inversor no modulado monofásico de puente completo en SIMPLORER

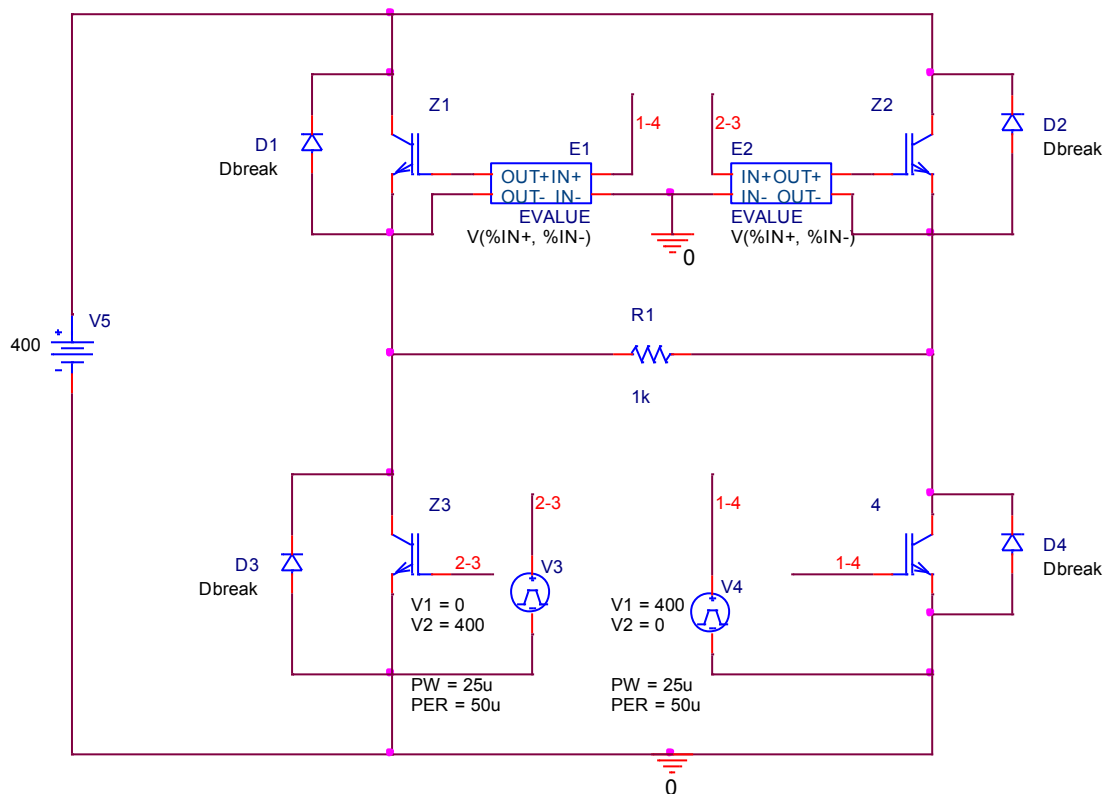


Figura 50.- Circuito inversor no modulado monofásico de puente completo en ORCAD

3.3.2.- Modulación PWM

En la modulación PWM, existe una señal senoidal moduladora y una señal portadora triangular con una frecuencia fijada por el índice de modulación en frecuencia " m_f ", de tal forma que cuando la moduladora supera el índice de modulación de amplitud " m_a ", dispara el IGBT.

$$m_a = \frac{\text{Amplitud moduladora}}{\text{Amplitud portadora}}$$

$$m_f = \frac{\text{Frecuencia portadora}}{\text{Frecuencia moduladora}}$$

a) Monofásico

l) Medio puente

Para este estudio, se ha escogido como zona de actuación la zona lineal, la cual tiene como valores de amplitud de la senoidal menor de “1 V” (normalmente se configura con “0.8 V”) y una frecuencia de la señal triangular mayor que la de la moduladora (en este caso es de “21” veces la frecuencia de la frecuencia moduladora), por lo que hay que configurar las fuentes senoidal y triangular con dichos valores.

Este circuito es medio puente, pero con una modulación PWM, por lo que la creación y simulación del circuito principal sigue las mismas directrices que el circuito no modulado, en cuanto a las fuentes de tensión que modelan las tensiones en los condensadores. Obsérvese que, tanto en ORCAD como en MATLAB, los condensadores se modelan como fuentes de tensión continuas de valor la mitad de la tensión de entrada.

El estudio de este circuito ha supuesto la dificultad añadida de realizar la comparación entre la señal moduladora y la portadora. Para ello se debe realizar mediante comparadores en ORCAD, SIMPLORER y PSIM (Figura 51, Figura 52 y Figura 53) (teniendo en cuenta los bloques “EVALUE” para el dispositivo de la rama superior), de tal forma que hay que tener en cuenta que los dos IGBT’s no pueden disparar a la vez, por lo que la salida de un comparador debe ser contraria a la otra.

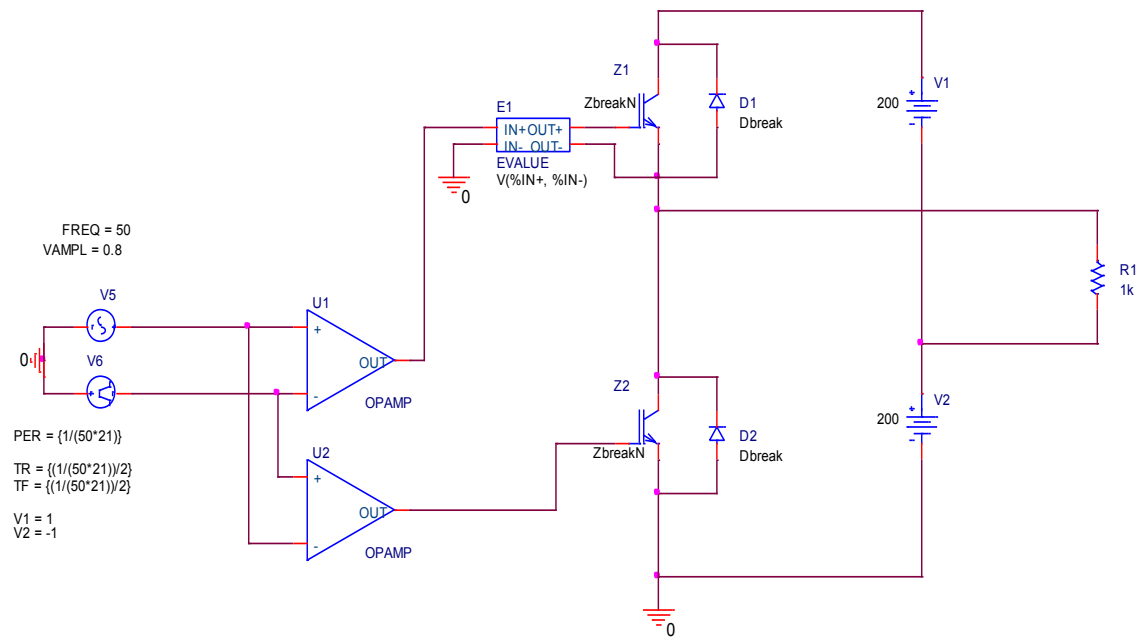


Figura 51.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de medio puente en ORCAD

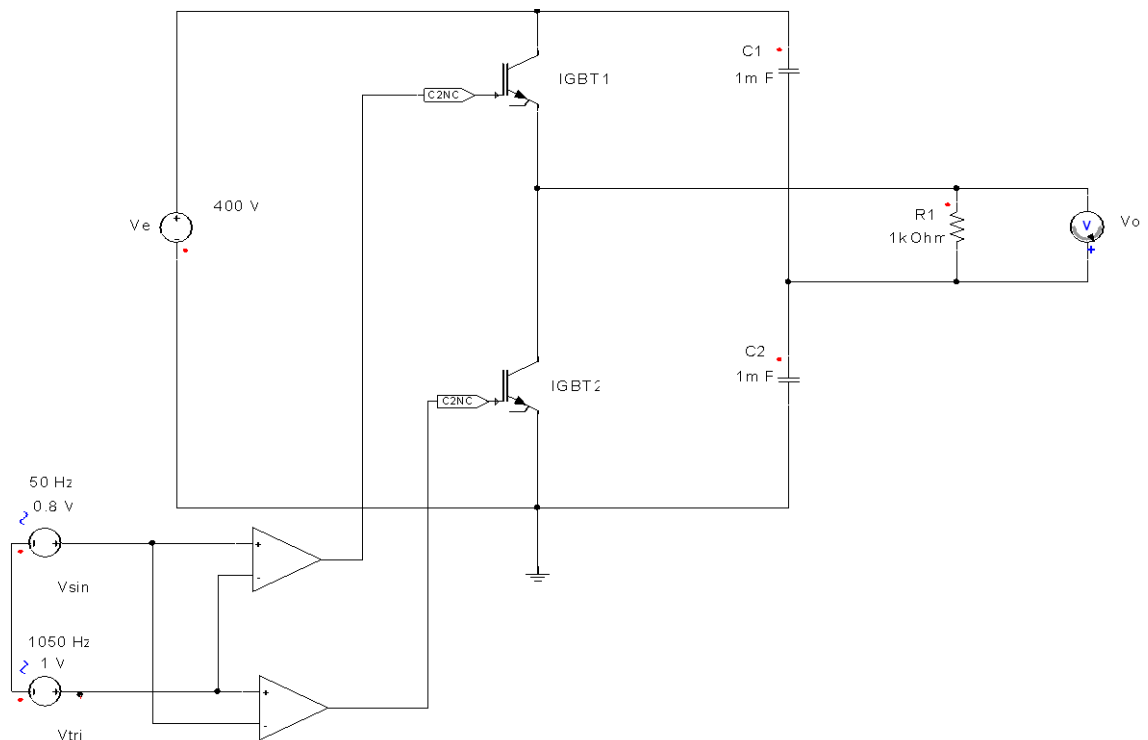


Figura 52.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de medio puente en SIMPLORER

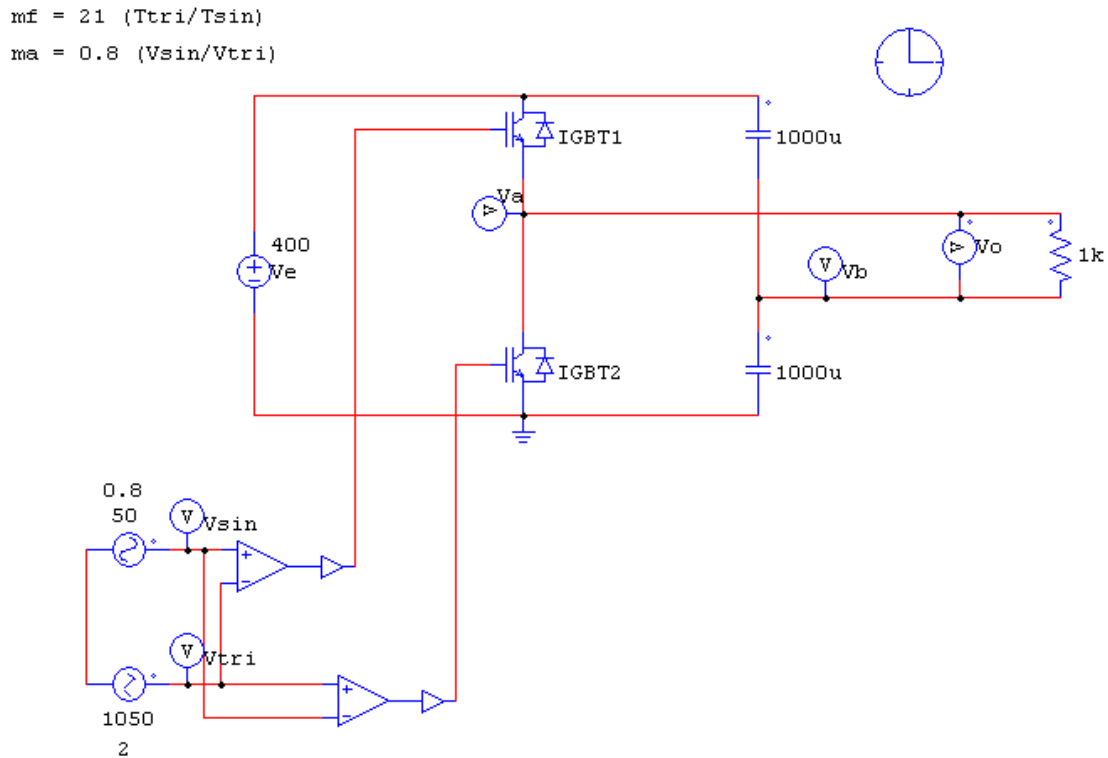


Figura 53.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de medio puente en PSIM

En MATLAB (Figura 54), se debe hacer la comparación de las dos señales con los bloques “*Sine Wave*” y un “*Discrete PWM generator*”. El bloque “*Sine Wave*” simula una señal senoidal con la frecuencia y amplitud correspondiente ($m_a=0.8 \text{ V}$ y $f=50 \text{ Hz}$), y el “*Discrete PWM generator*” genera una secuencia de pulsos con el índice de modulación en frecuencia necesario ($m_f=21$).

Los bloques “*Goto*” y “*From*” son bloques de entrada y salida de señales que se utilizan básicamente para simplificar el circuito.

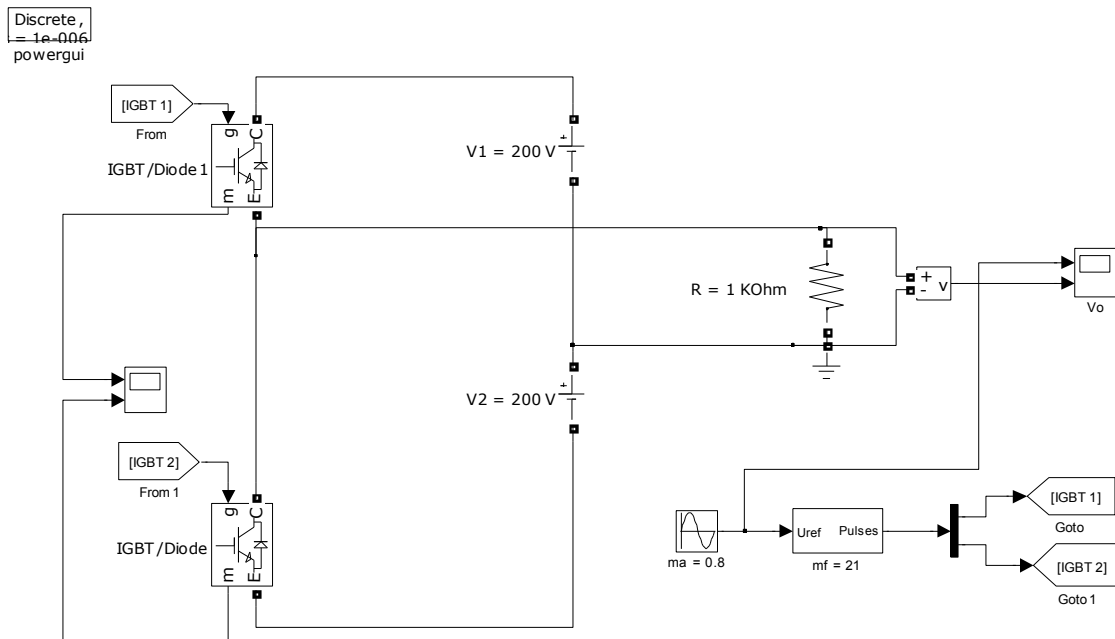


Figura 54.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de medio puente en MATLAB

II) Puente completo

Para el modelo de puente completo con modulación PWM existen dos tipos: unipolar y bipolar. La bipolar utiliza una señal portadora triangular y una moduladora senoidal, como en el medio puente, con la salvedad que utiliza dos IGBT's en puente completo en vez de dos.

En la modulación PWM de puente completo bipolar, la comparación de señales se realiza entre la moduladora de amplitud " m_a " y frecuencia " f " y la portadora de amplitud " $1 V$ " y frecuencia " m_f " veces la frecuencia moduladora.

En la modulación PWM de puente completo unipolar, la comparación de señales se realiza entre dos señales moduladoras de amplitud " m_a " y frecuencia " f ", desfasadas " 180 grados " entre ellas, y la portadora de amplitud " $1 V$ " y frecuencia " m_f " veces la frecuencia moduladora.

1) Bipolar

La única dificultad destacable en los cuatro modelos es que hay que tener en cuenta que los IGBT's disparan dos a dos, en ramas distintas, para que no haya problemas de disparo.

En ORCAD (Figura 55), hay que tener en cuenta los bloques “*EVALUE*” para que se haga de forma correcta.

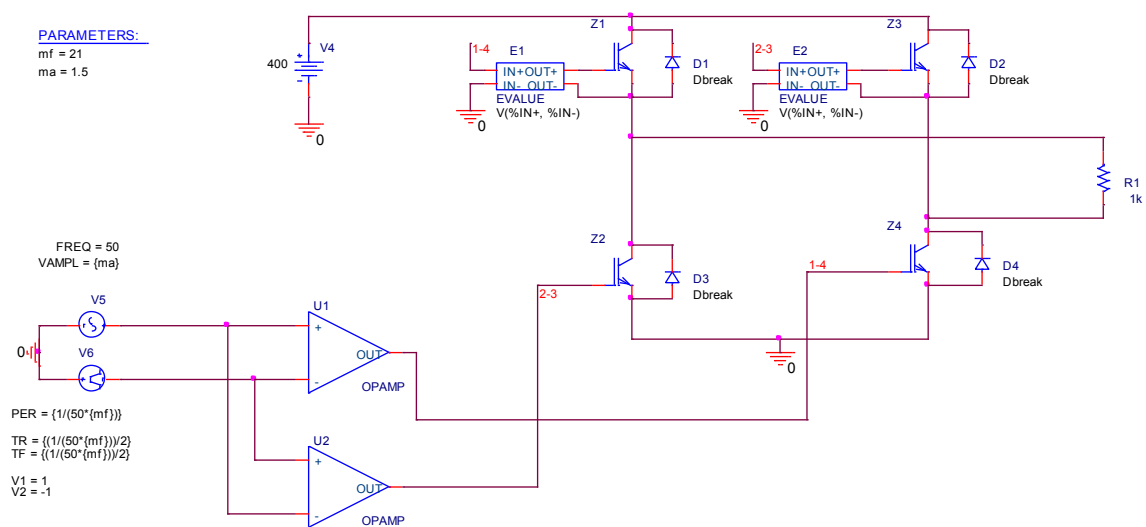


Figura 55.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo bipolar en ORCAD

En MATLAB (Figura 57), al igual que ocurría en el circuito PWM monofásico en medio puente, se ha utilizado el bloque “*Discrete PWM Generator*” para generar el disparo de los IGBT's. Como se puede observar, en los parámetros del generador de pulsos PWM se deben de especificar el número de pulsos y la frecuencia de conmutación (Figura 56).

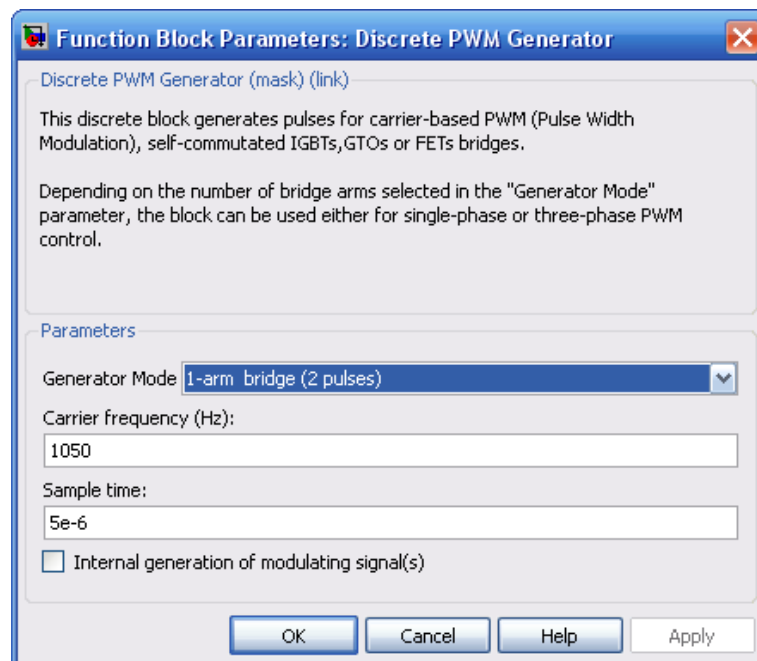


Figura 56.- Configuración Generador PWM

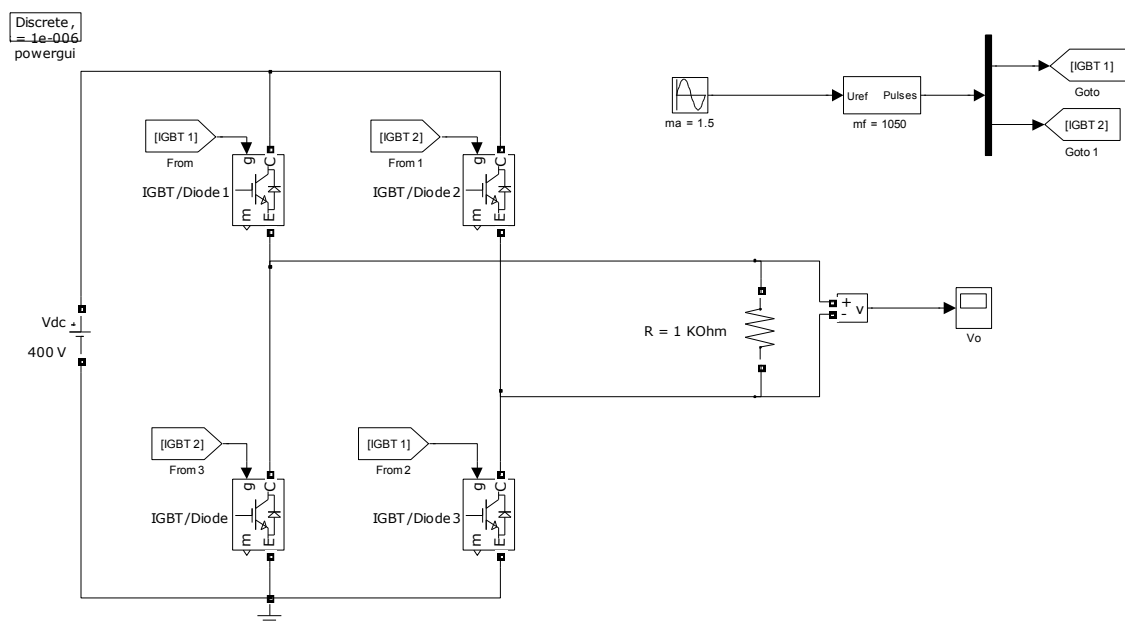


Figura 57.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo bipolar en MATLAB

Tanto en SIMPLORER como en PSIM (Figura 58 y Figura 59), se ha seguido la misma metodología que para el MATLAB, de tal forma que cada comparador generará la señal de parejas de IGBT's.

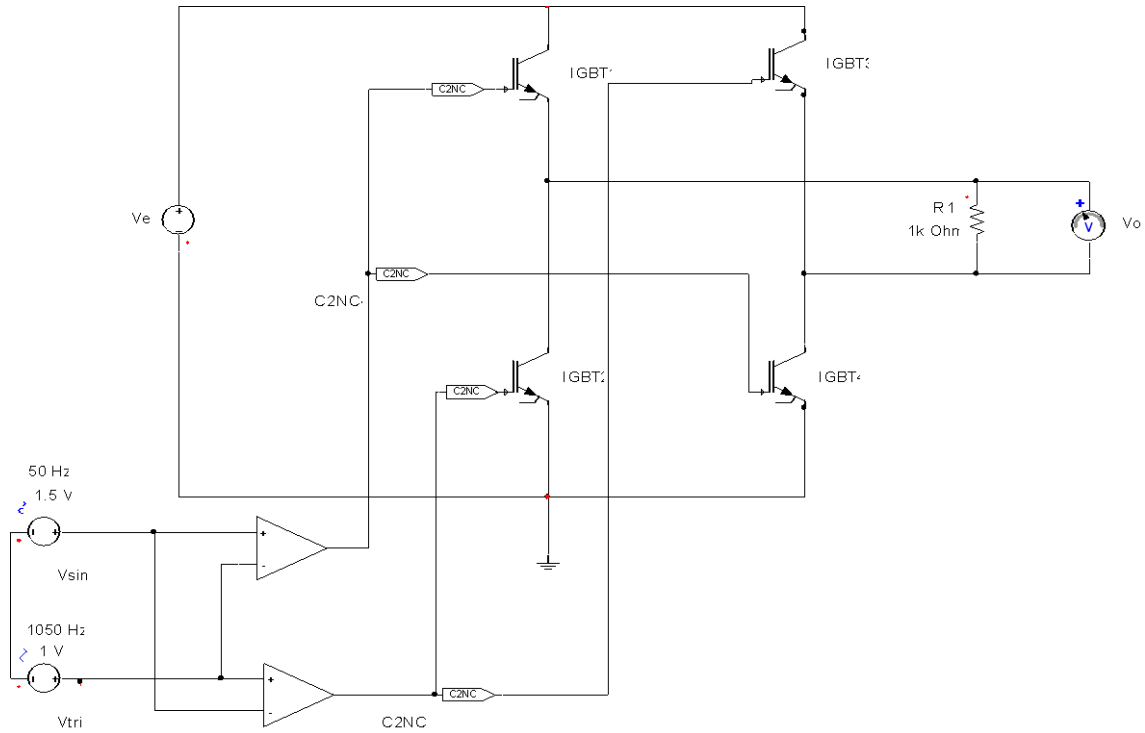


Figura 58.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo bipolar en SIMPLORER

```
mf = 21 (Ttri/Tsin)
ma = 1.5 (Vsin/Vtri)
```

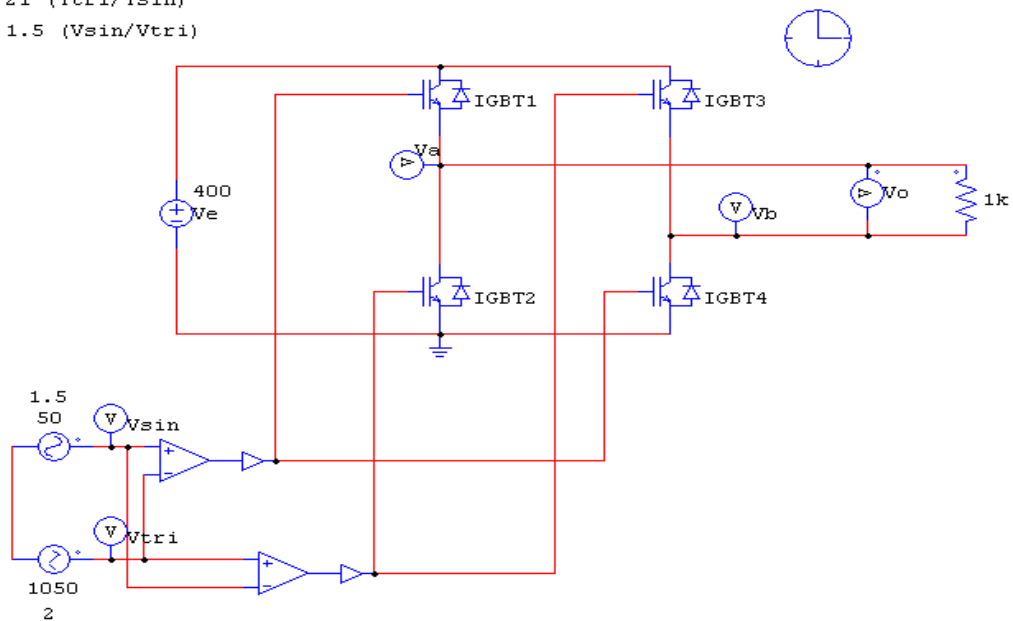


Figura 59.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo bipolar en PSIM

2) Unipolar

En este caso, existen dos señales moduladoras desfasadas “180 grados” entre ellas; cada una de estas señales se utilizará para generar los pulsos de disparo de cada rama de IGBT’s.

Al contrario que en el caso anterior, en el que una única señal PWM y su complementaria disparaban los cuatro IGBT’s, en este caso, se generan dos señales PWM diferentes. Aunque la frecuencia de conmutación de cada rama sea “ f_s ”, el efecto que se logra con esta modulación es el de tener una frecuencia de conmutación de la frecuencia de salida igual al doble de la frecuencia de conmutación para cada rama ($f_{Vo} = 2f_s$).

EN MATLAB (Figura 60), en vez de tener dos señales de entrada, comunes dos a dos para cada rama de IGBT’s, en este caso tendremos una única señal para cada IGBT.

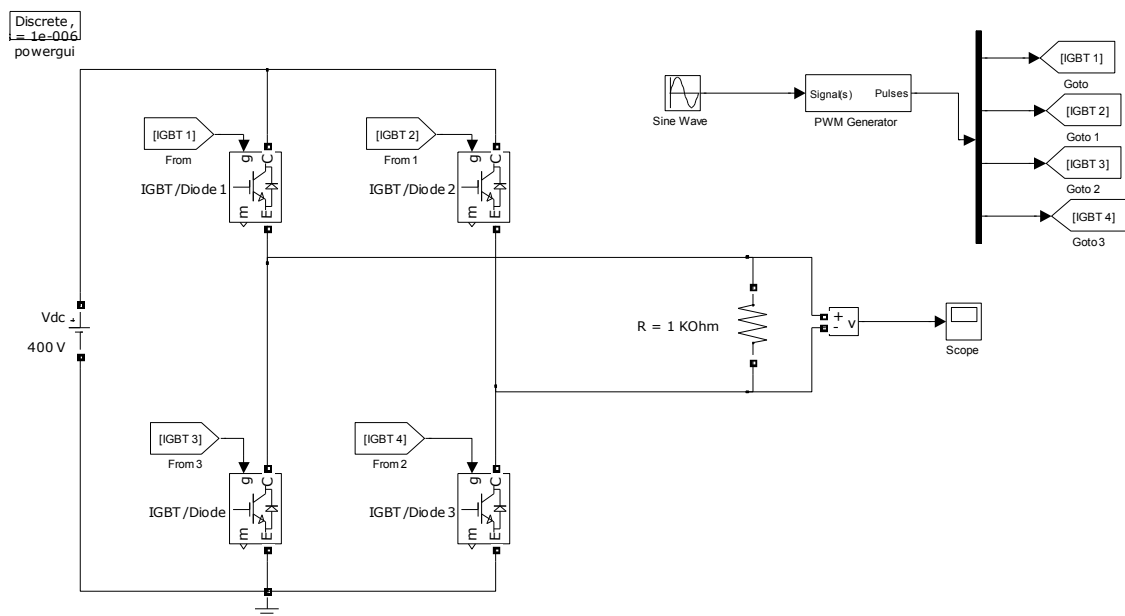


Figura 60.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo unipolar en MATLAB

EN ORCAD (Figura 61), teniendo en cuenta los bloques “EVALUE”, se observa que cada IGBT tiene una entrada distinta, cada una de ellas procediente de un comparador.

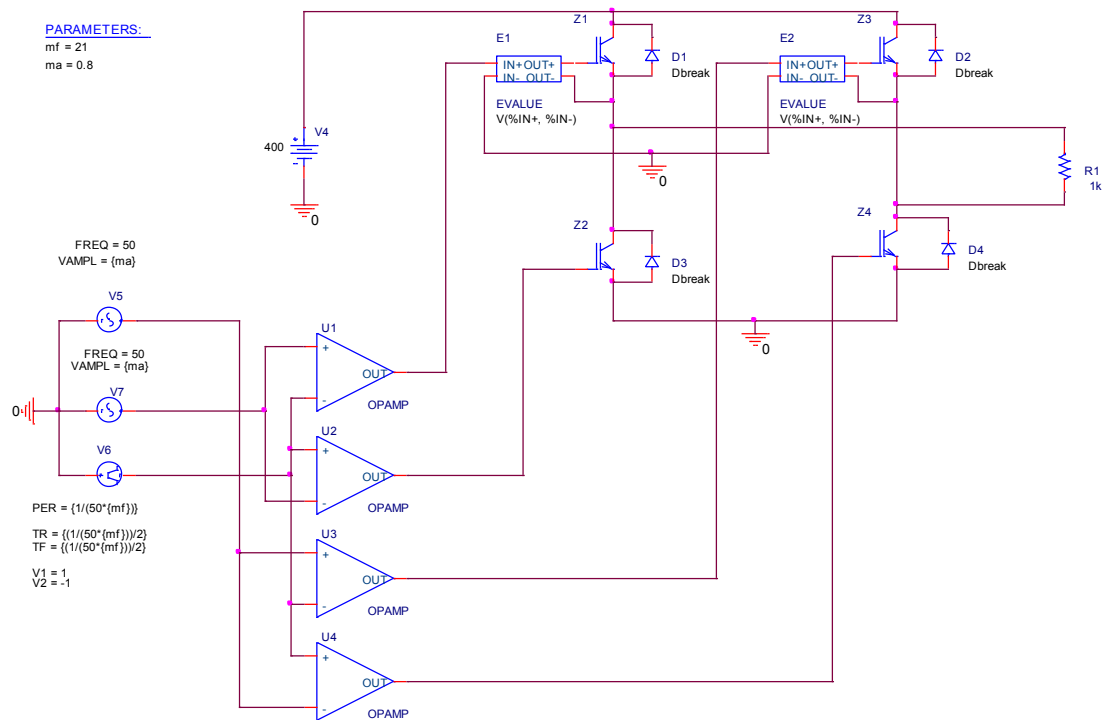


Figura 61.- Circuito inductor modulado PWM monofásico de puente completo unipolar en ORCAD

En PSIM y SIMPLORER (Figura 62 y Figura 63), el estudio es muy similar al bipolar, pero con cuatro comparadores.

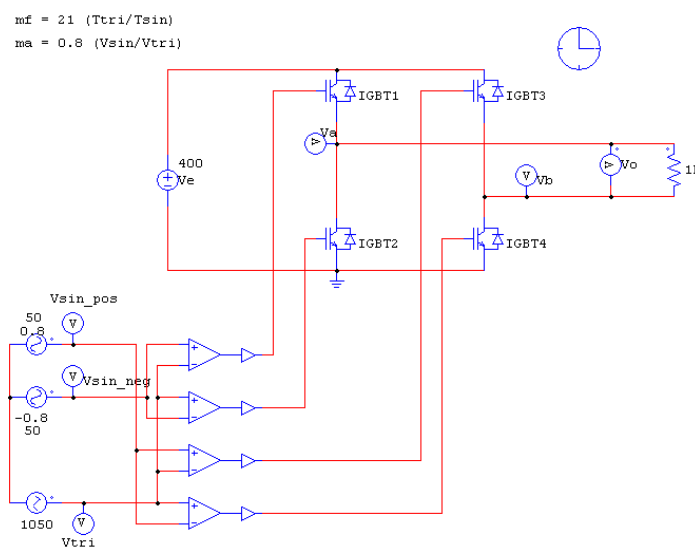


Figura 62.- Circuito inductor modulado PWM monofásico de puente completo unipolar en PSIM

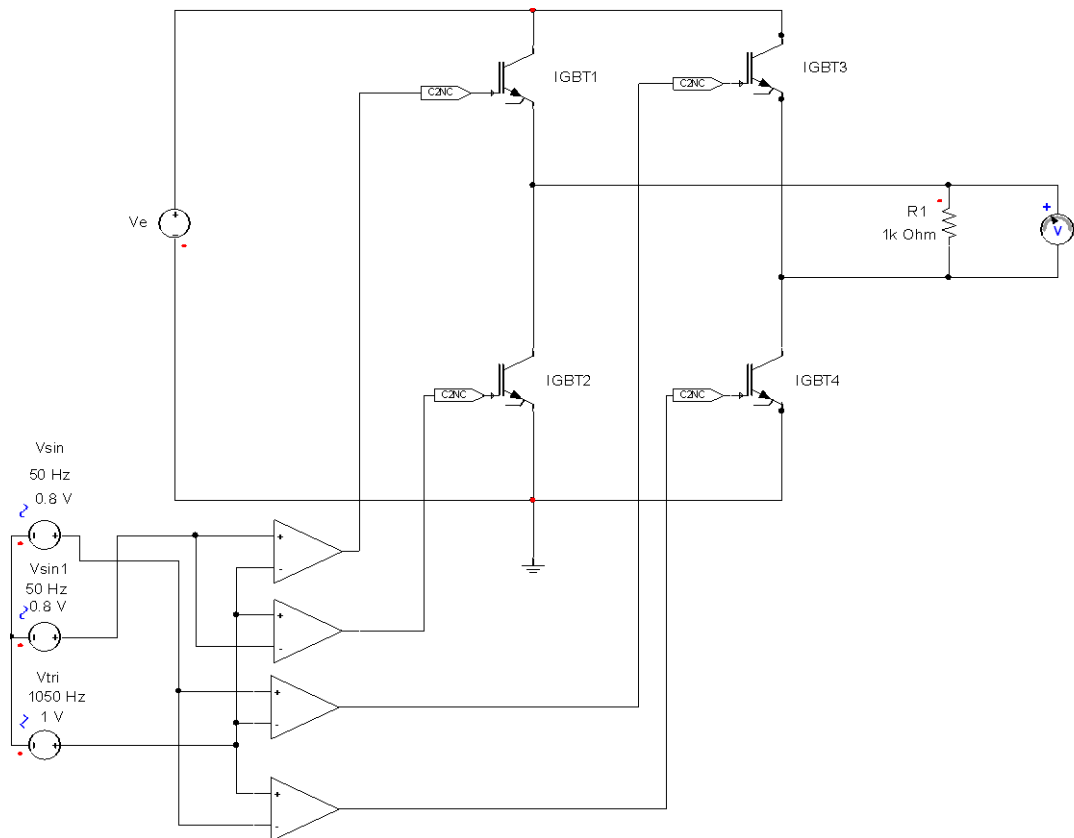


Figura 63.- Circuito inversor modulado PWM monofásico de puente completo unipolar en SIMPLORER

b) Trifásico¹⁶

En la modulación PWM trifásica es necesario, tanto una fuente trifásica como una carga trifásica por fase. La base de estudio es parecida a la modulación PWM unipolar, pero en vez de tener dos fuentes moduladoras, tenemos tres, con un desfase de “120 *grados*” entre ellas. Cada señal moduladora alimenta a dos IGBT’s, los dos de la misma rama, pero con señales complementarias.

¹⁶ Se ha realizado el estudio del puente completo únicamente.

En ORCAD (Figura 64), no ha habido mayor problema de creación y simulación del modelo ya que la base ha sido la de la modulación PWM unipolar.

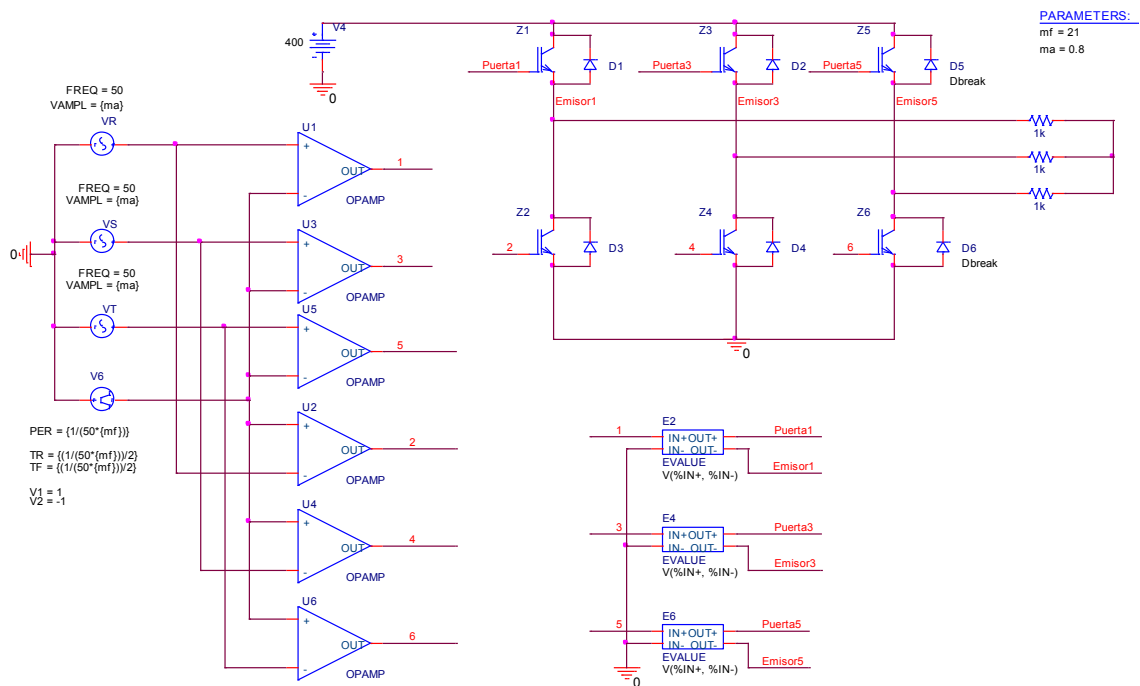


Figura 64.- Circuito inversor modulado PWM trifásico de puente completo en ORCAD

En MATLAB (Figura 65), son necesarias tres fuentes moduladoras “Sine Wave” y el “PWM Generator” es de seis pulsos, dando lugar a seis señales de salida que son las que se introducen en los IGBT’s. Además como se puede observar, también se ha introducido una carga trifásica.

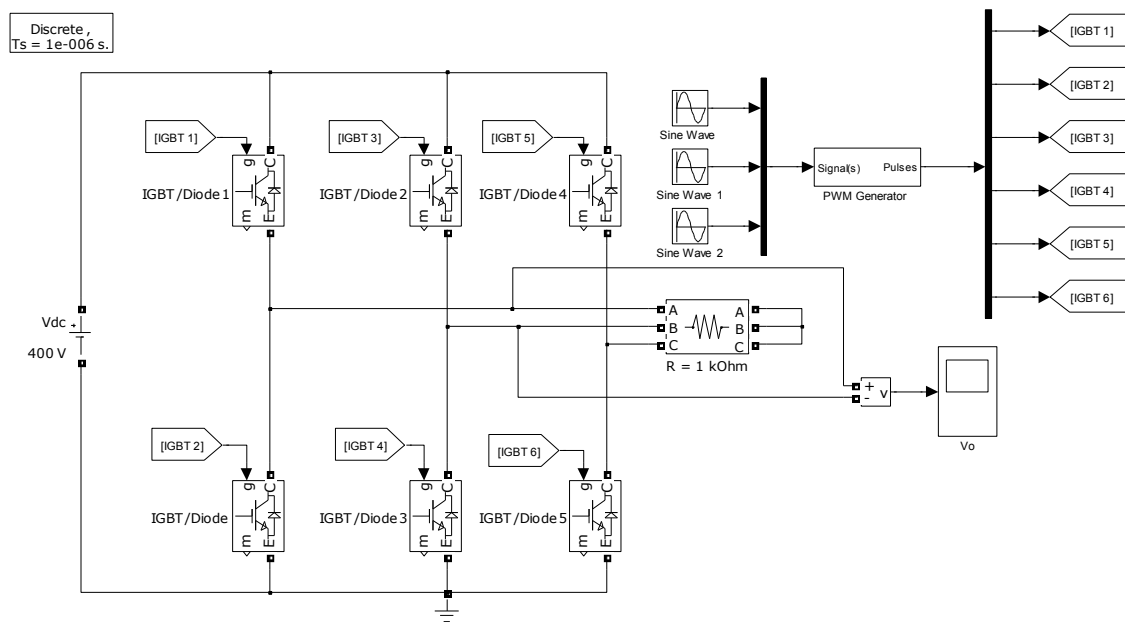


Figura 65.- Circuito inversor modulado PWM trifásico de puente completo en MATLAB

En SIMPLORER (Figura 66), se ha hecho un estudio distinto, que es considerar la comparación de las moduladoras y la portadora, negarlas, e introducir la natural en un IGBT y la negada en el otro IGBT de la misma rama.

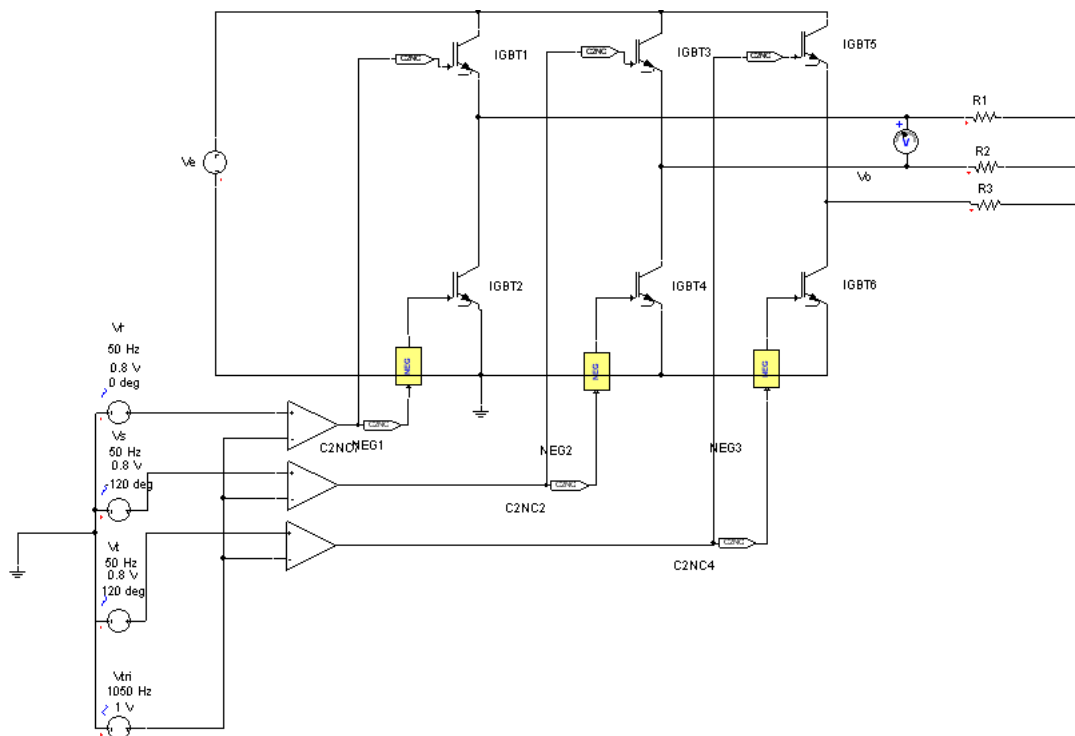


Figura 66.- Circuito inversor modulado PWM trifásico de puente completo en SIMPLORER

En cuanto al modelo de PSIM (Figura 67), el estudio es igual que en ORCAD, pero hay que tener en cuenta que en la fuente trifásica, se debe introducir el valor de línea de tensión y no el de fase ($U_L = \sqrt{3}U_F$).

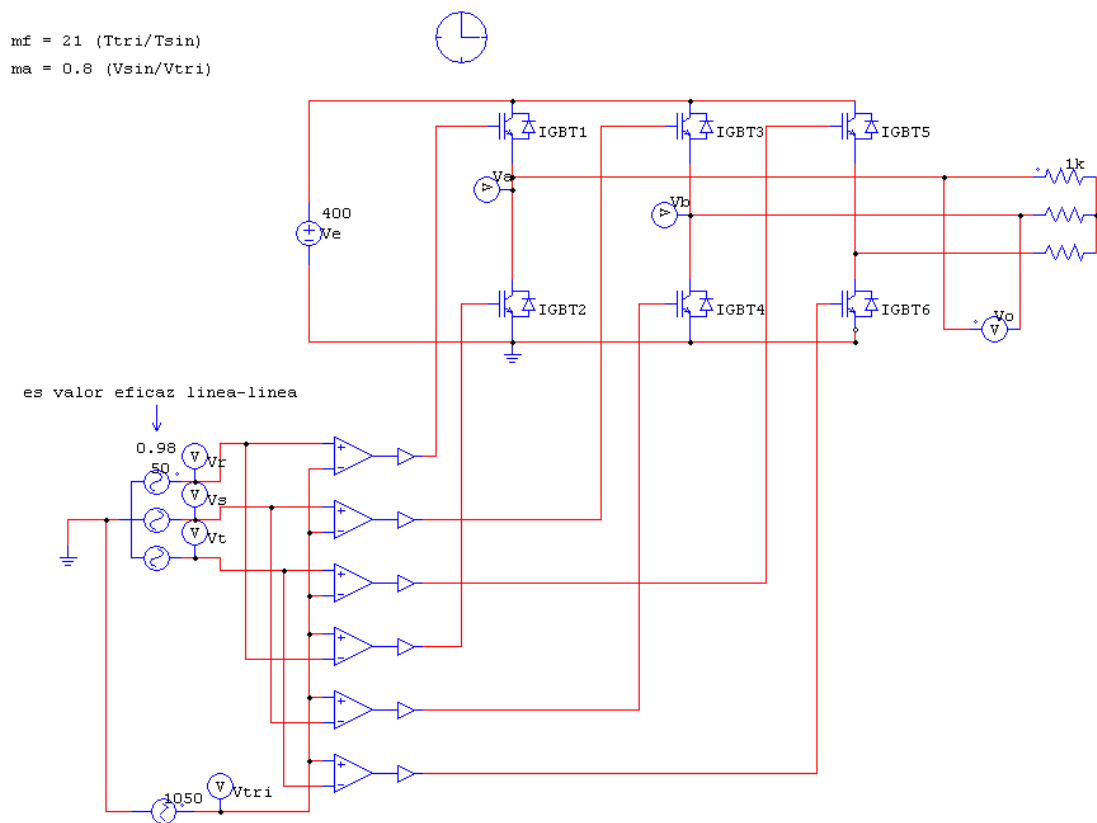


Figura 67.- Circuito inversor modulado PWM trifásico de puente completo en PSIM

Capítulo 4: Comparación de resultados

En este apartado, se presentan unas tablas comparativas entre los diferentes programas de simulación en base a unos parámetros comunes.

En cuanto a las tablas, se hará un estudio de los parámetros propios para cada simulador, como son el tiempo empleado en simular cada modelo o el espacio ocupado en disco de cada simulación, todo ello en base a una escala de tiempos y espacio en disco (véase *Tabla 2 .- Parámetros de tiempo* y *Tabla 3.- Parámetros de espacio*¹⁷).

Posteriormente, se hará un estudio¹⁸ más exhaustivo de parámetros básicos, como pueden ser el espacio que ocupa en disco la instalación del mismo, una valoración de la edición de gráficos, en función de valores como pueden ser las operaciones con variables o la exportación de gráficos para su edición, selección de componentes, acceso a las bibliotecas o el tiempo de preparación de las bibliotecas de cada modelo (véase *Tabla 4 .- Edición de gráficos y tiempo de preparación*).

También se ha realizado el estudio de los tiempos de preparación determinando qué circuitos son los más lentos de simular (véase *Tabla 5 .- Tiempo de preparación en %*).

¹⁷ En el caso del MATLAB, el espacio reservado en disco corresponde con el fichero de simulación, ya que los resultados de la simulación se almacenan en memoria, a no ser que se exporten con el "Workspace"





¹⁸ Dicho estudio se ha realizado en un PC con S.O. Windows XP Professional ServiPack 3 con procesador Intel® Core Duo de 3,00 GHz, con 2 GB de RAM.

PARAMETROS										
CONVERSIÓN	TIPO DE CONVERTIDOR			PARÁMETROS	PROGRAMAS					
					ORCAD	MATLAB	PSIM	SIMPLORER		
	TIPO DE CONVERTIDOR			ESPACIO EN DISCO DE PROGRAMA	1,97 GB	3,59 GB	35 MB	1,01 GB		
				ALMACENAMIENTO VARIABLES	TODAS	MEMORIA	SELECCIÓN	TODAS		
	CONVERTIDOR CC-CC	FLYBACK	3 DEVANADOS	resolucion 100 ns	tiempo para simular 30 ms	↓ 31 seg	↗ 11 seg	↑ 8 seg	↑ 2,5 seg	
						ACTIVE CLAMP	↓ 62 seg	↑ 13 seg	↑ 10 seg	↑ 4 seg
REDUCTOR			↓ 41 seg			↑ 7,5 seg	↑ 8 seg	↑ 6 seg		
			↓ 28 seg			↑ 5,5 seg	↑ 8 seg	↑ 3 seg		
CONVERTIDOR CA-CC	MONOFÁSICO	MEDIA ONDA	resolucion 1 μs	tiempo para simular 60 ms	↓ 11 seg	↑ 1 seg	↑ 2 seg	↑ 0,5 seg		
		ONDA COMPLETA			↓ 31 seg	↑ 0,5 seg	↑ 2 seg	↑ 0,5 seg		
	TRIFÁSICO	MEDIA ONDA			↓ 30 seg	↑ 1 seg	↑ 2 seg	↑ 2 seg		
		ONDA COMPLETA			↓ 62 seg	↑ 1,5 seg	↑ 3 seg	↑ 0,5 seg		
CONVERTIDOR CC-CA	NO MODULADOS	MEDIO PUENTE	resolucion 1 μs	tiempo para simular 20 ms	↓ 18 seg	↑ 1 seg	↑ 1 seg	↑ 1 seg		
		PUENTE COMPLETO			↓ 30 seg	↑ 1,5 seg	↑ 1 seg	↑ 1 seg		
	MODULADOS PWM	MEDIO PUENTE			MONOFÁSICO	↓ 36 seg	↑ 2 seg	↑ 5 seg	↑ 4,5 seg	
					PUENTE COMPLETO	↓ 63 seg	↑ 1,5 seg	↑ 6 seg	↑ 11 seg	
					↓ 47 seg	↑ 1,5 seg	↑ 6 seg	↑ 3,5 seg		
					↓ 88 seg	↑ 2 seg	↑ 7 seg	↑ 12 seg		

Tabla 2 .- Parámetros de tiempo

PARAMETROS										
CONVERSIÓN	TIPO DE CONVERTIDOR			PARÁMETROS	PROGRAMAS					
					ORCAD	MATLAB	PSIM	SIMPLORER		
CONVERTIDOR CC-CC	FLYBACK	FORWARD	3 DEVANADOS	resolucion 100 ns	↓ 43 Mb	↑ 0,1 Mb	↓ 33 Mb	↑ 8,5 Mb		
			ACTIVE CLAMP		↓ 63 Mb	↑ 0,1 Mb	↓ 54 Mb	↑ 3 Mb		
		REDUCTOR	espacio disco ficheros simulación			↓ 58 Mb	↑ 0,1 Mb	↓ 50 Mb	↑ 7 Mb	
						↓ 37 Mb	↑ 0,1 Mb	↓ 33 Mb	↑ 5 Mb	
CONVERTIDOR CA-CC	MONOFÁSICO	MEDIA ONDA				resolucion 1 µs	↓ 4 Mb	↑ 0,1 Mb	↑ 1 Mb	↑ 0,5 Mb
		ONDA COMPLETA					↓ 7 Mb	↑ 0,1 Mb	↑ 3 Mb	↑ 0,5 Mb
	TRIFÁSICO	MEDIA ONDA	↓ 8 Mb	↑ 1,2 Mb	↑ 4 Mb		↑ 1 Mb			
		ONDA COMPLETA	↓ 11 Mb	↑ 0,1 Mb	↑ 4 Mb		↑ 1 Mb			
CONVERTIDOR CC-CA	NO MODULADOS	MEDIO PUENTE	resolucion 1 µs	↓ 8 Mb	↑ 0,1 Mb	↑ 2 Mb	↑ 1,5 Mb			
		PUENTE COMPLETO		↓ 12 Mb	↑ 0,1 Mb	↑ 2 Mb	↓ 22 Mb			
	MODULADOS PWM	MONOFÁSICO		↓ 31 Mb	↑ 0,1 Mb	↑ 15 Mb	↑ 18 Mb			
		PUENTE COMPLETO		UNIPOLAR	↓ 49 Mb	↑ 0,1 Mb	↑ 19 Mb	↑ 35 Mb		
	BIPOLAR			↓ 42 Mb	↑ 0,1 Mb	↑ 16 Mb	↑ 3 Mb			
	TRIFÁSICO	↓ 73 Mb		↑ 0,1 Mb	↑ 22 Mb	↑ 14 Mb				

Tabla 3.- Parámetros de espacio

LEYENDA	SI = 1		NO= 0	
	 1	 2	 3	 4

PARÁMETROS PARA EL ESTUDIO DE LA EDICION DE GRÁFICOS					
PARAMETROS	OPERACIONES CON VARIABLES (operaciones algebraicas)	EXPORTACION DE DATOS (base de datos, excel,...)	VISUALIZACION DE GRÁFICAS (ver las gráficas sin necesidad de volver a simular)	EXPORTACIÓN DE GRÁFICAS (jpg, bmp,...)	TOTAL
PROGRAMAS					
ORCAD	1	1	1	1	4
MATLAB	0	1	0	0	1
PSIM	1	1	0	1	3
SIMPLORER	0	1	1	0	2

PARÁMETROS PARA EL ESTUDIO DEL TIEMPO DE PREPARACIÓN					
PARAMETROS	APERTURA PROGRAMA	SELECCIÓN DE COMPONENTES	ACCESO A LIBRERÍAS	INTERCONEXIÓN DE LOS COMPONENTES	TOTAL
PROGRAMAS					
ORCAD	1	1	1	1	4
MATLAB	0	1	1	0	2
PSIM	1	1	1	1	4
SIMPLORER	0	1	1	1	3

Tabla 4 .- Edición de gráficos y tiempo de preparación

TIEMPO DE SIMULACIÓN EN %									
CONVERSIÓN	TIPO DE CONVERTIDOR		PARÁMETROS		PROGRAMAS				
			TIEMPO SIMULACIÓN	RESOLUCION	ORCAD	MATLAB	PSIM	SIMPLORER	
CONVERTIDOR CC-CC	FLYBACK	3 DEVANADOS	30 ms	100 ns	↓ 100,00%	↗ 35,48%	↑ 24,19%	↑ 8,06%	
					↓ 100,00%	↑ 20,97%	↑ 16,13%	↑ 6,45%	
	FORWARD	ACTIVE CLAMP			↓ 100,00%	↑ 18,29%	↑ 19,51%	↑ 14,63%	
					↓ 100,00%	↑ 19,64%	↑ 25,00%	↑ 10,71%	
CONVERTIDOR CA-CC	MONOFÁSICO	MEDIA ONDA	60 ms	1 μs	↓ 100,00%	↑ 9,09%	↑ 18,18%	↑ 4,55%	
		ONDA COMPLETA			↓ 100,00%	↑ 1,61%	↑ 6,45%	↑ 1,61%	
	TRIFÁSICO	MEDIA ONDA			↓ 100,00%	↑ 3,33%	↑ 6,67%	↑ 6,67%	
		ONDA COMPLETA			↓ 100,00%	↑ 2,42%	↑ 4,84%	↑ 0,81%	
CONVERTIDOR CC-CA	NO MODULADOS	MEDIO PUENTE	20 ms	1 μs	↓ 100,00%	↑ 5,56%	↑ 5,56%	↑ 5,56%	
		PUENTE COMPLETO			↓ 100,00%	↑ 5,00%	↑ 3,33%	↑ 3,33%	
	MODULADOS PWM	MEDIO PUENTE	MONOFÁSICO		↓ 100,00%	↑ 5,56%	↑ 13,89%	↑ 12,50%	
					PUENTE COMPLETO	UNIPOLAR	↓ 100,00%	↑ 2,38%	↑ 9,52%
			BIPOLAR			↓ 100,00%	↑ 3,19%	↑ 12,77%	↑ 7,45%
			TRIFÁSICO		↓ 100,00%	↑ 2,27%	↑ 7,95%	↑ 13,64%	

Tabla 5 .- Tiempo de preparación en %

Las conclusiones que se pueden extraer de los resultados obtenidos en las tablas comparativas arriba mostradas son las siguientes:

- En cuanto al tiempo de simulación¹⁹, MATLAB SIMULINK es el programa más rápido en la mayoría de los casos junto con SIMPLORER, frente a ORCAD que es el más lento.
- En cuanto a los tamaños que ocupan los ficheros en disco, MATLAB SIMULINK vuelve a ser el más eficaz de los simuladores, siendo ORCAD el que más ocupa en sus ficheros, ya que las variables utilizadas por MATLAB son almacenadas en memoria, a no ser que se exporten al *“Workspace”*, mientras que ORCAD utiliza todas las variables posibles. PSIM se encuentra entre los simuladores cuyos resultados ocupan más espacio en disco.
- En cuanto al apartado de edición de gráficos, se puede observar que el post-procesador que ofrece mayor calidad a la hora de visualizar los resultados, posibilidad de operar con las variables mostradas, etc.... es sin duda ORCAD, siendo en esta ocasión MATLAB SIMULINK el simulador más carente de poder operar y modificar los resultados en su visualizador. Esto es porque, en MATLAB, para poder operar con los resultados, es necesario exportarlos al *“Workspace”*, por lo que dicha edición no es tan intuitiva y fácil de realizar como en los simuladores específicos.

¹⁹ Se debe apreciar que para los distintos modelos de estudio, el tiempo de simulación es distinto, ya que no es necesario el mismo tiempo para simular un rectificador que un inversor.

- Por último, en el apartado del tiempo de preparación de las bibliotecas de circuitos, ORCAD, junto con PSIM, son los simuladores más fáciles e intuitivos a la hora de creación de los modelos, ya que su interfaz de bibliotecas, la conexión de los componentes y la propia apertura de los circuitos, es muy sencilla. En este caso, no se queda lejos SIMPLORER, siendo bastante fácil el manejo del programa a la hora de la creación de los circuitos.

En definitiva, queda constancia de que es que MATLAB es un simulador potente, versátil y útil en muchos campos, pero su herramienta SIMULINK no está tan enfocada a la Electrónica de Potencia. SIMPLORER y PSIM son dos simuladores que se defienden bastante mejor en este campo. ORCAD es un simulador de circuitos electrónicos muy potente, pero a pesar de su capacidad, no es la herramienta óptima para simulación de circuitos de potencia, debido sobre todo al tiempo de simulación.

Capítulo 5: Conclusiones

En este proyecto, se han realizado las simulaciones de trece de los convertidores electrónicos de potencia más representativos, utilizando 4 simuladores eléctricos diferentes, y se han alcanzado los tres objetivos principales planteados al inicio del trabajo, los cuales han sido los siguientes:

- Se han creado un conjunto de modelos básicos, a modo de biblioteca, de los circuitos típicos utilizados en la conversión de energía, que son:
 - Convertidores CC/CC: reductor, flyback, forward clásico o de tres devanados y forward con active clamp o enclavamiento activo.
 - Rectificadores CA/CC: rectificadores de media y onda completa, tanto controlados como sin controlar, ya sea en su versión monofásica como en la trifásica.
 - Inversores CC/CA: monofásicos y trifásicos, en medio y puente completo, tanto modulados PWM como no modulados.
- Se ha hecho una comparación de los cuatro simuladores eléctricos (ORCAD, MATLAB con su herramienta SIMULINK con la toolbox “SIMPOWERSYS”, PSIM y SIMPLORER) a través de la simulación de los circuitos anteriormente citados. Las principales conclusiones que se han podido esclarecer de este estudio son:
 - ORCAD es una herramienta muy potente, pero sus mayores defectos son el tiempo de simulación y la complejidad en la configuración de las simulaciones para evitar problemas de convergencia.
 - MATLAB es un simulador muy potente para cualquier campo en que se le aplique, pero existen deficiencias en cuanto a SIMULINK para la Electrónica de Potencia, como por ejemplo, la representación de los datos.
 - PSIM es el simulador más sencillo perfecto para iniciarse en la Electrónica de Potencia, ya que trabaja principalmente con elementos ideales, y no requiere un estudio previo muy exhaustivo para su utilización.

- SIMPLORER, al igual que PSIM, es bastante sencillo, pero más completo que éste, siendo muy intuitivo y teniendo un buen post-procesado de simulaciones.
- Se han creado unos manuales de ayuda al usuario no iniciado en forma de presentación, junto con una aplicación HTML que estructura los contenidos del material general, como pueden ser descripción de los simuladores, los propios manuales de ayuda, enlaces a las simulaciones, etc.

Los manuales son unos archivos básicos de funcionamiento de cada simulador, en los cuales se realiza un estudio de un circuito electrónico de potencia en cada uno de ellos, detallando, por ejemplo, el acceso a los componentes en las diferentes bibliotecas, la interconexión de los componentes, la simulación del modelo y la visualización de los resultados, entre otras.

Anexos: Manuales de ayuda

Manual 1.- ORCAD

MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DE ORCAD CAPTURE

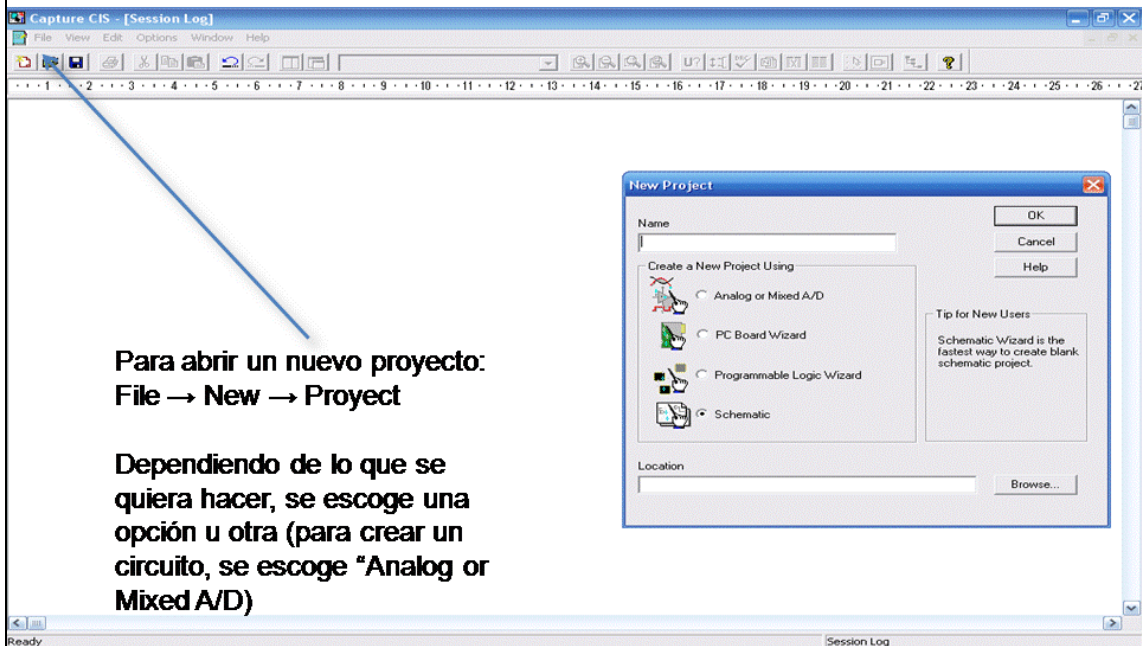
ORCAD CAPTURE

OrCAD

OrCAD 10.5 Release

© 2005 Cadence Design Systems, Inc. All rights reserved. OrCAD and the OrCAD logo are registered trademarks. All others are properties of their respective holders.

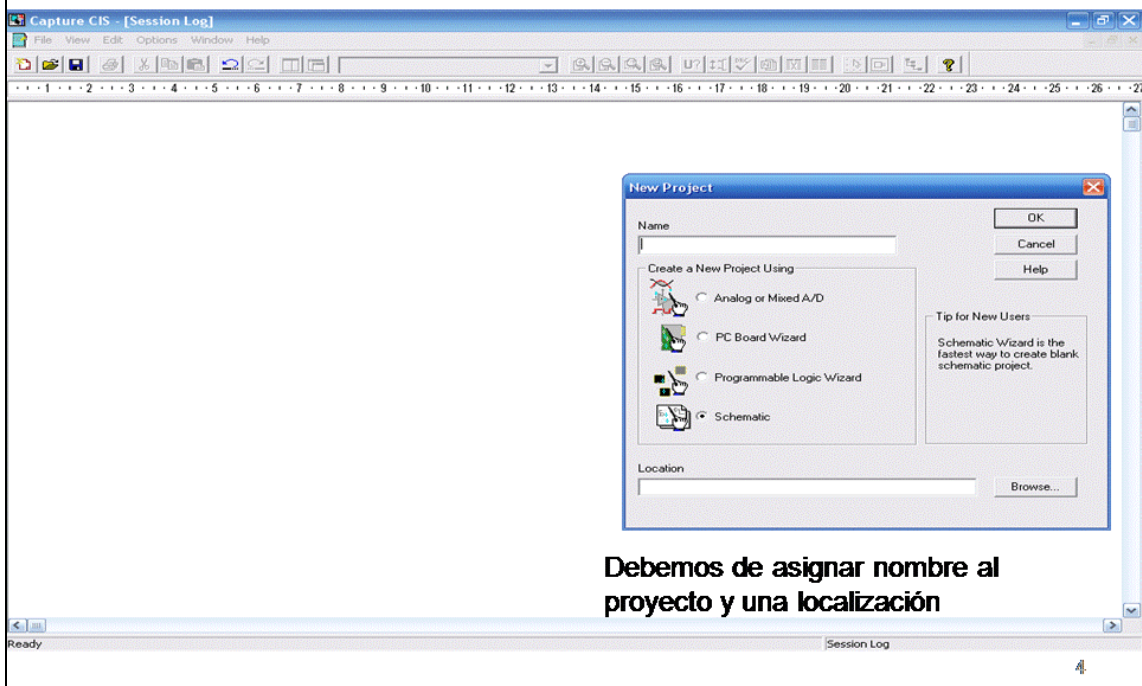
NUEVO PROYECTO



Para abrir un nuevo proyecto:
File → New → Project

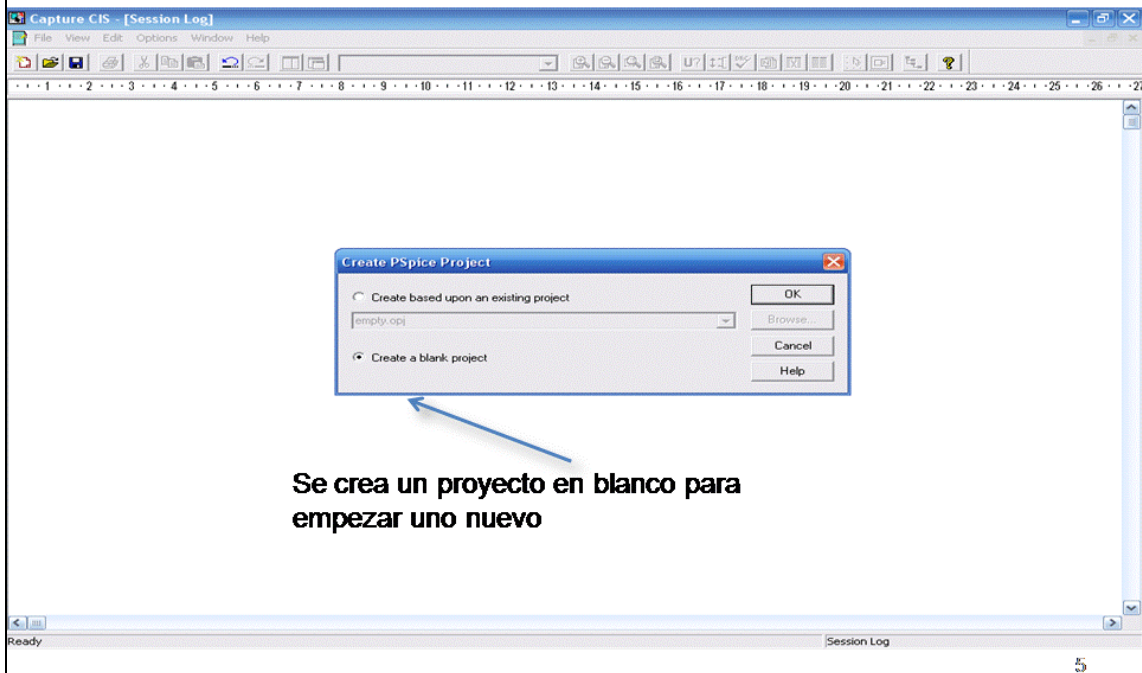
Dependiendo de lo que se
quiera hacer, se escoge una
opción u otra (para crear un
circuito, se escoge "Analog or
Mixed A/D")

NUEVO PROYECTO

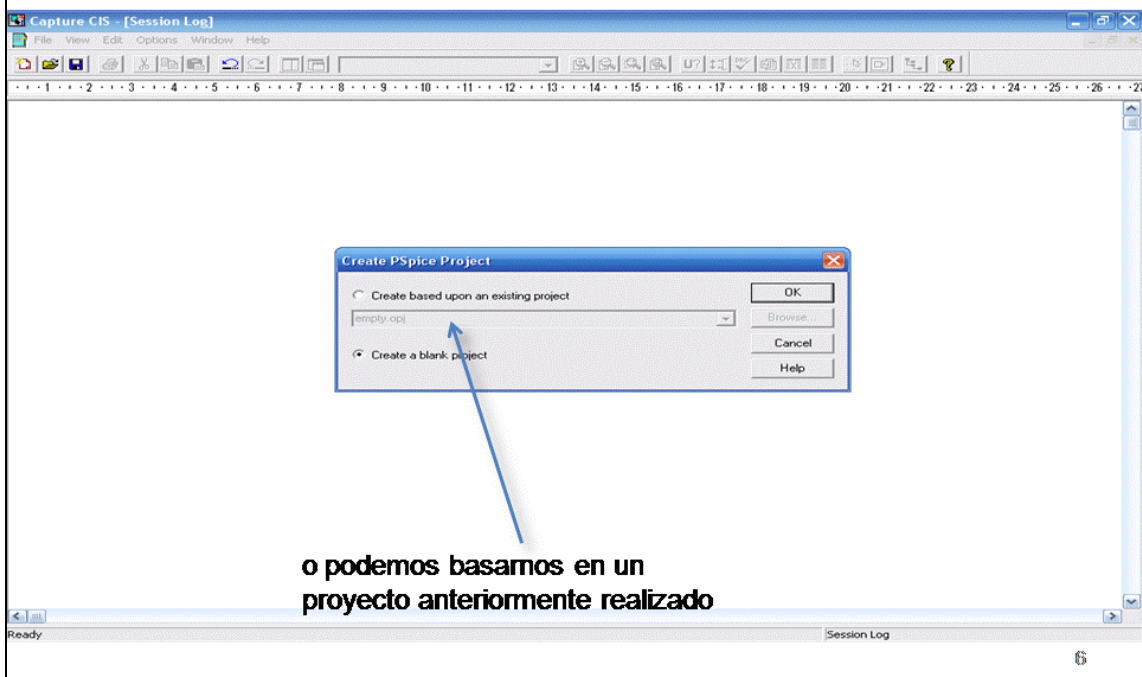


Debemos de asignar nombre al
proyecto y una localización

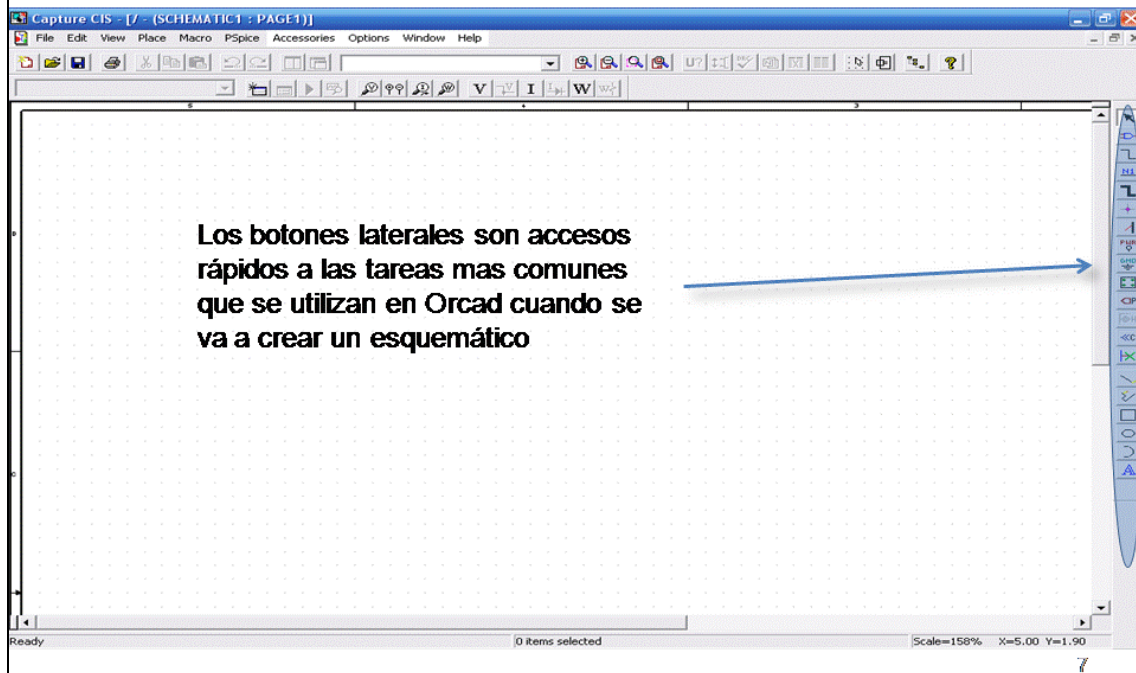
NUEVO PROYECTO



NUEVO PROYECTO



ESQUEMÁTICO



ESQUEMÁTICO. ELEMENTOS MÁS UTILIZADOS



SELECT (Permite seleccionar un elemento)



PLACE PART (Permite agregar un elemento desde las bibliotecas)



PLACE WIRE (Permite unir nodos de elementos mediante un cable)



PLACE NET ALIAS (Permite renombrar las uniones)



PLACE GROUND (Nos agrega una "tierra" al circuito)



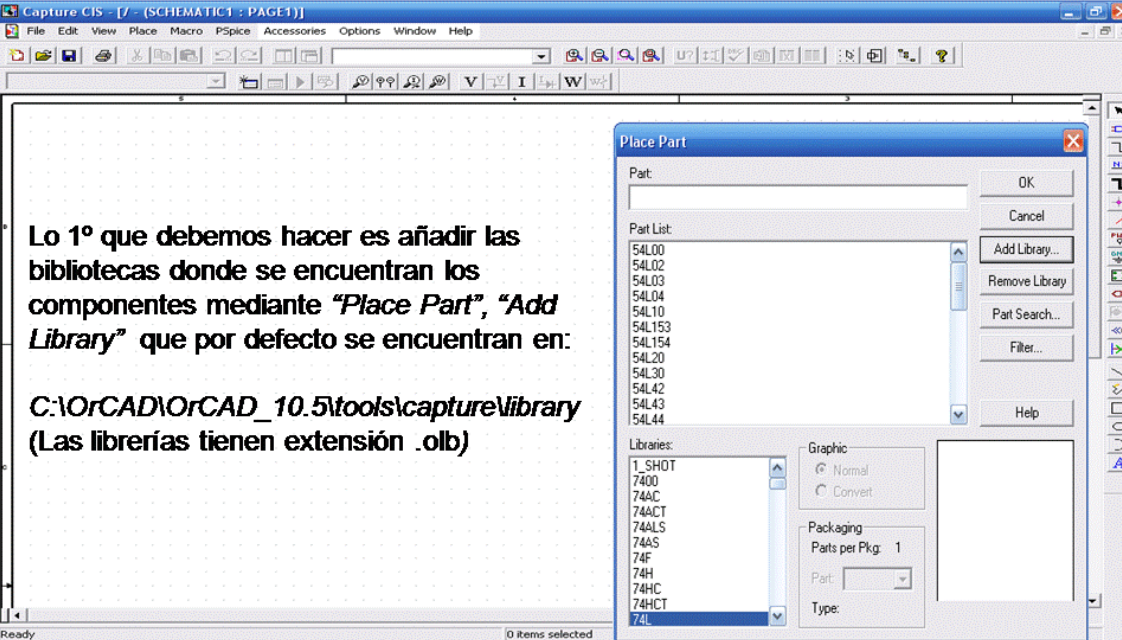
PLACE PIN (Añade un pin de E/S; utilizados en subcircuitos)

8

ESQUEMÁTICO. LIBRERÍAS

Lo 1º que debemos hacer es añadir las bibliotecas donde se encuentran los componentes mediante "Place Part", "Add Library" que por defecto se encuentran en:

C:\OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library
(Las librerías tienen extensión .olb)

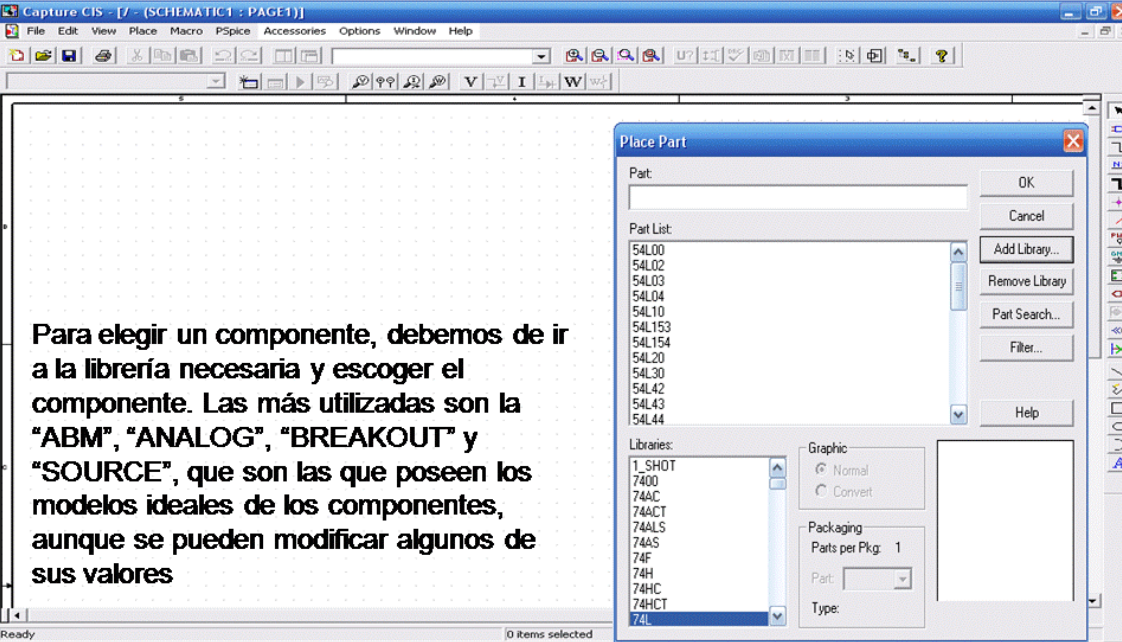


Ready 0 items selected

9

ESQUEMÁTICO. LIBRERÍAS

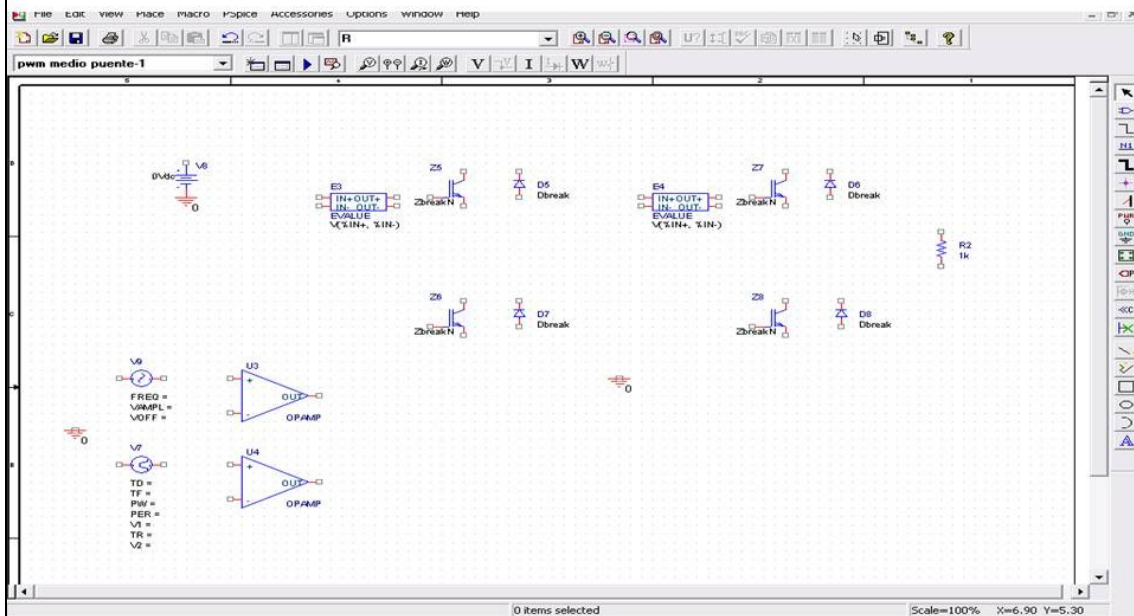
Para elegir un componente, debemos de ir a la librería necesaria y escoger el componente. Las más utilizadas son la "ABM", "ANALOG", "BREAKOUT" y "SOURCE", que son las que poseen los modelos ideales de los componentes, aunque se pueden modificar algunos de sus valores



Ready 0 items selected

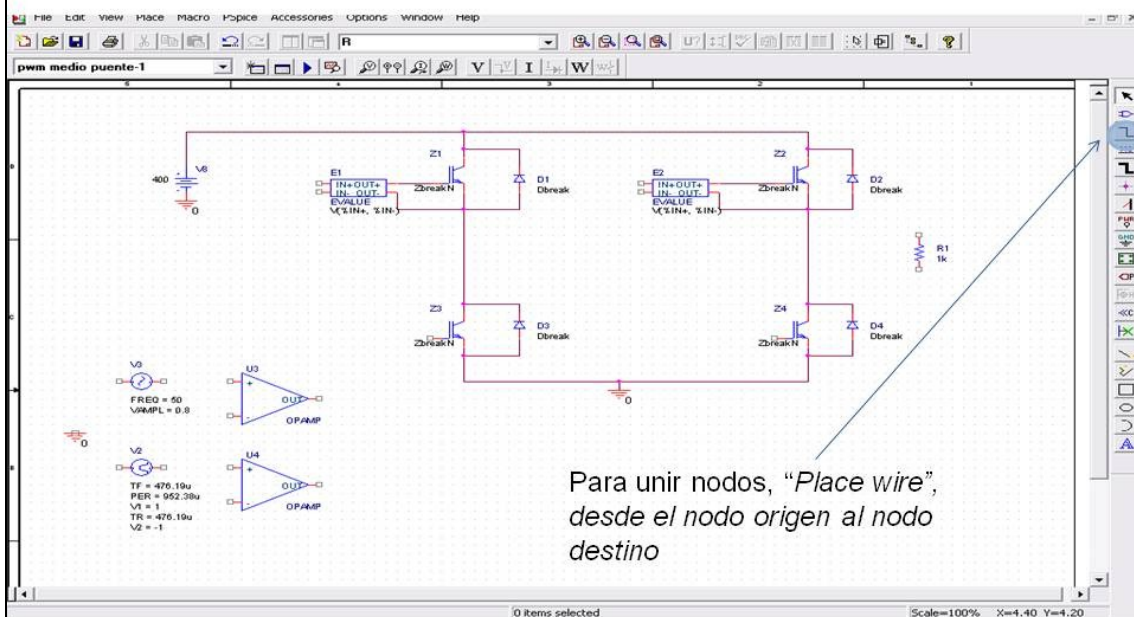
10

ESQUEMÁTICO. CIRCUITO CC-CA PWM BIPOLAR PUENTE COMPLETO



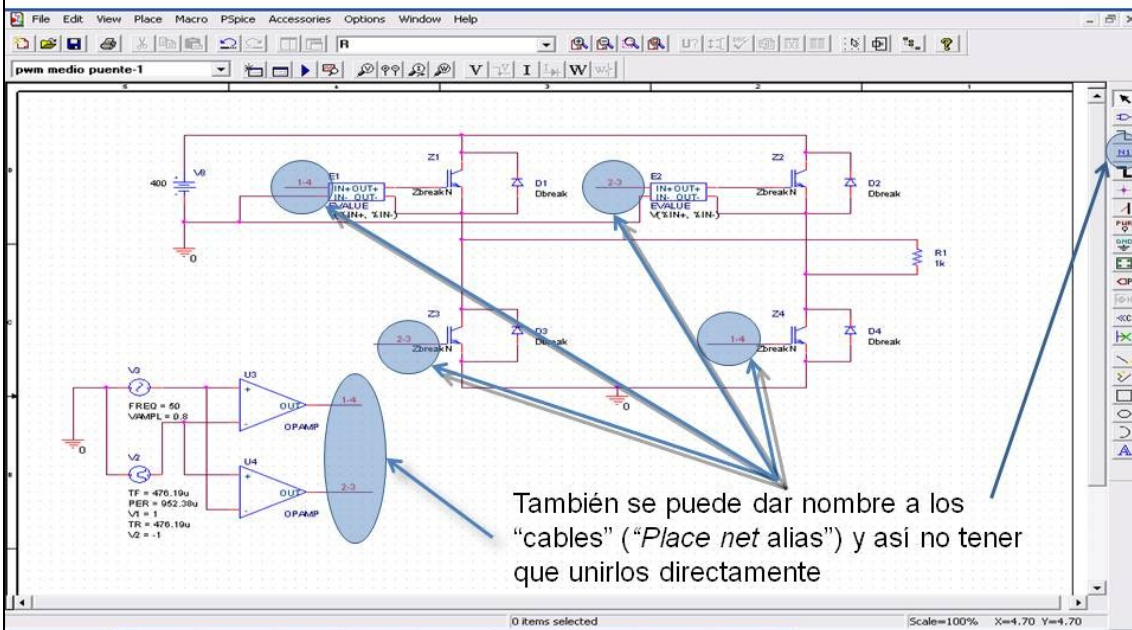
12

ESQUEMÁTICO. CIRCUITO CC-CA PWM BIPOLAR PUENTE COMPLETO



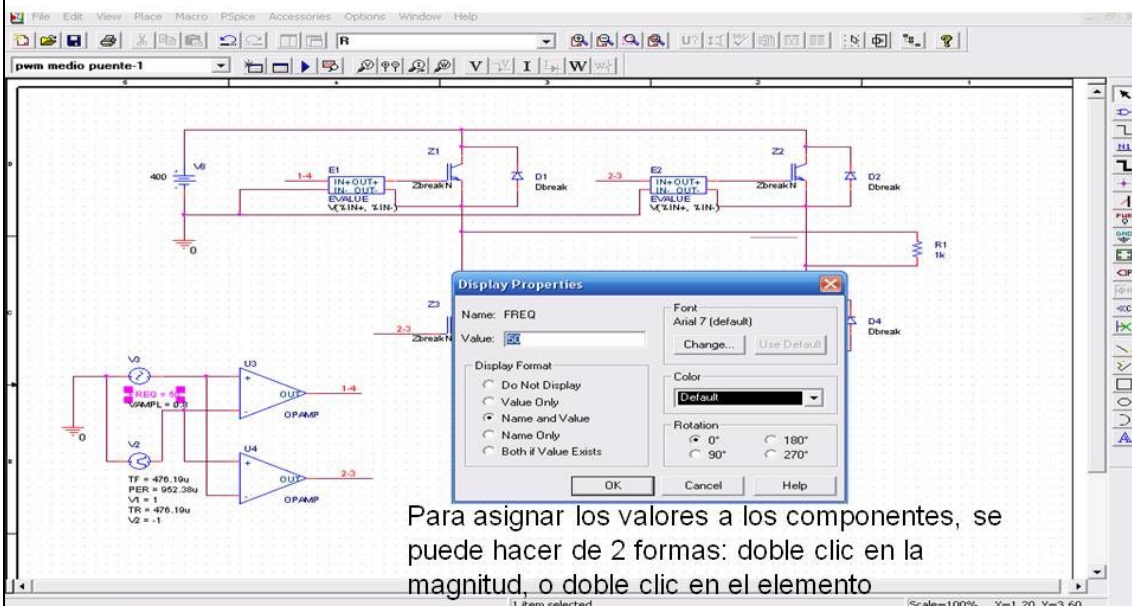
13

ESQUEMÁTICO. CIRCUITO CC-CA PWM BIPOLAR PUENTE COMPLETO



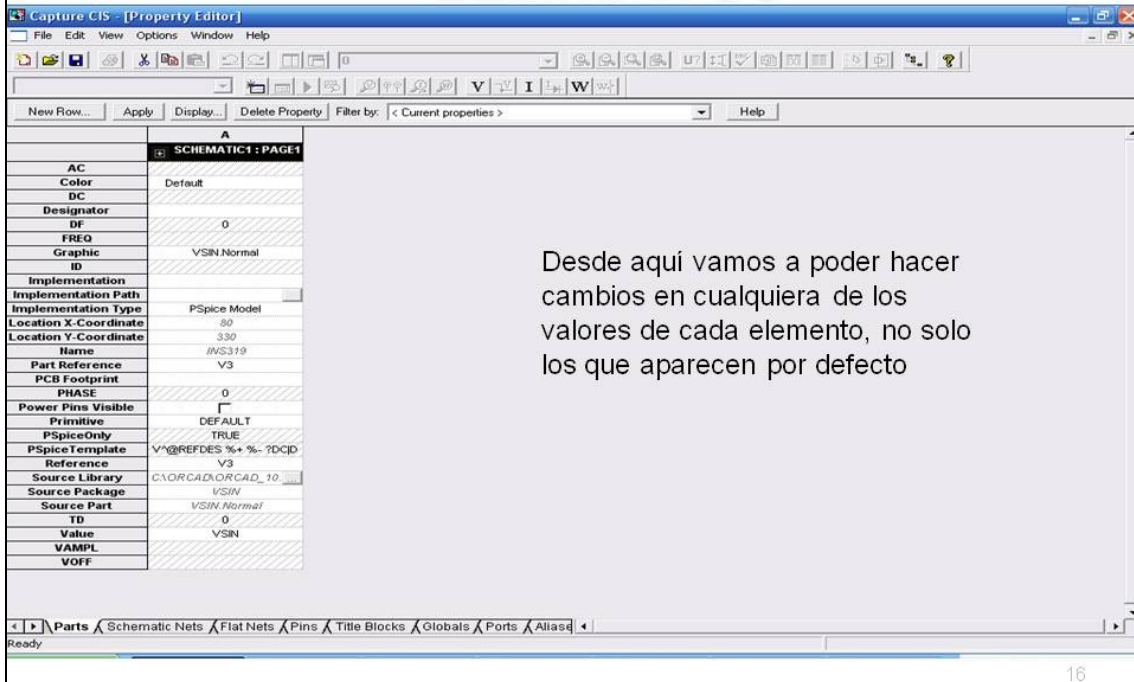
14

ESQUEMÁTICO. VALORES DE LOS ELEMENTOS



15

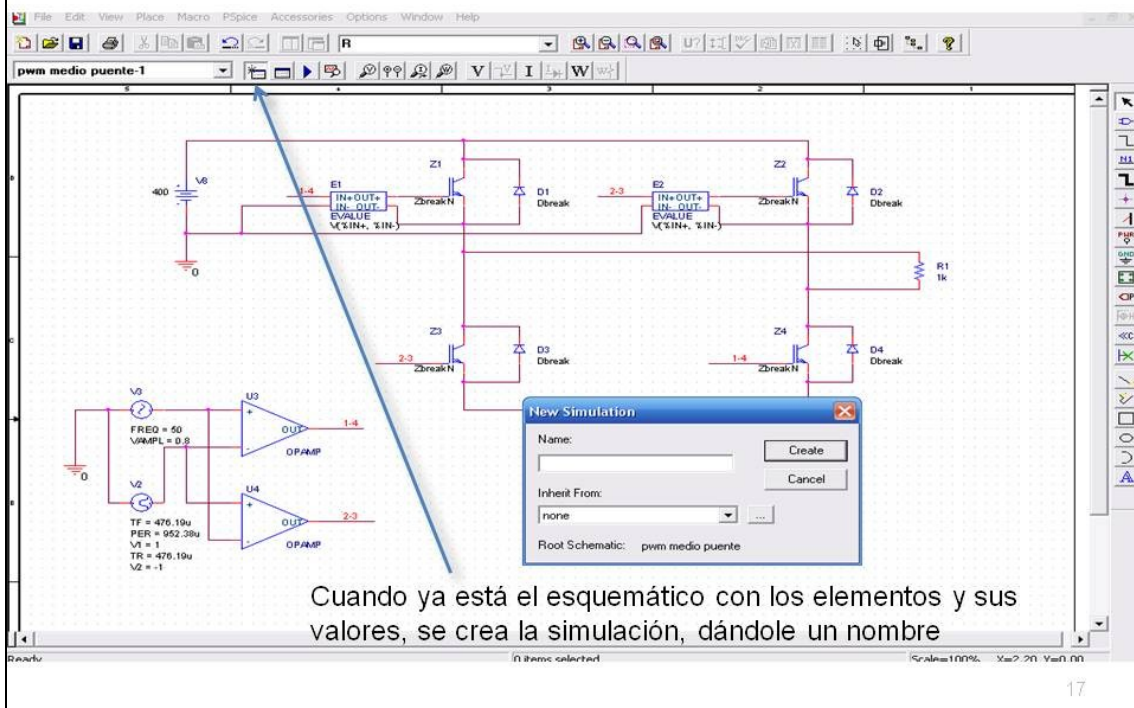
ESQUEMÁTICO. VALORES DE LOS ELEMENTOS



Desde aquí vamos a poder hacer cambios en cualquiera de los valores de cada elemento, no solo los que aparecen por defecto

Property	Value
AC	Default
Color	Default
DC	0
Designator	VSIN Normal
DF	0
FREQ	VSIN Normal
Graphic	VSIN Normal
ID	VSIN
Implementation	PSPICE Model
Implementation Path	80
Implementation Type	330
Location X-Coordinate	INS319
Location Y-Coordinate	V3
Name	VSIN
Part Reference	VSIN
PCB Footprint	VSIN
PHASE	0
Power Pins Visible	DEFAULT
Primitive	TRUE
PSPICE Only	VSIN
PSPICE Template	V*REFDES %* %- ?DCID
Reference	V3
Source Library	C:\ORCAD\ORCAD_10
Source Package	VSIN
Source Part	VSIN Normal
TD	0
Value	VSIN
VAMPL	
VOFF	

SIMULACIÓN



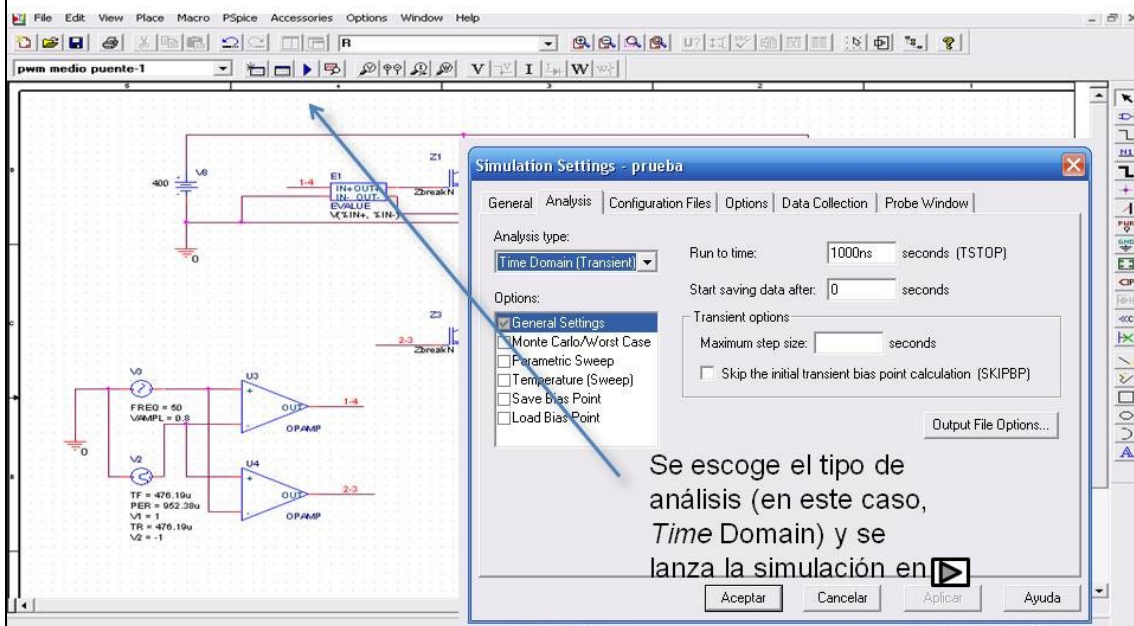
Quando ya está el esquemático con los elementos y sus valores, se crea la simulación, dándole un nombre

The screenshot shows a circuit schematic for a bridge simulation. A blue arrow points from the 'New Simulation' dialog box to the circuit. The dialog box has the following fields:

- Name: (empty)
- Inherit From: none
- Root Schematic: pwm medio puente

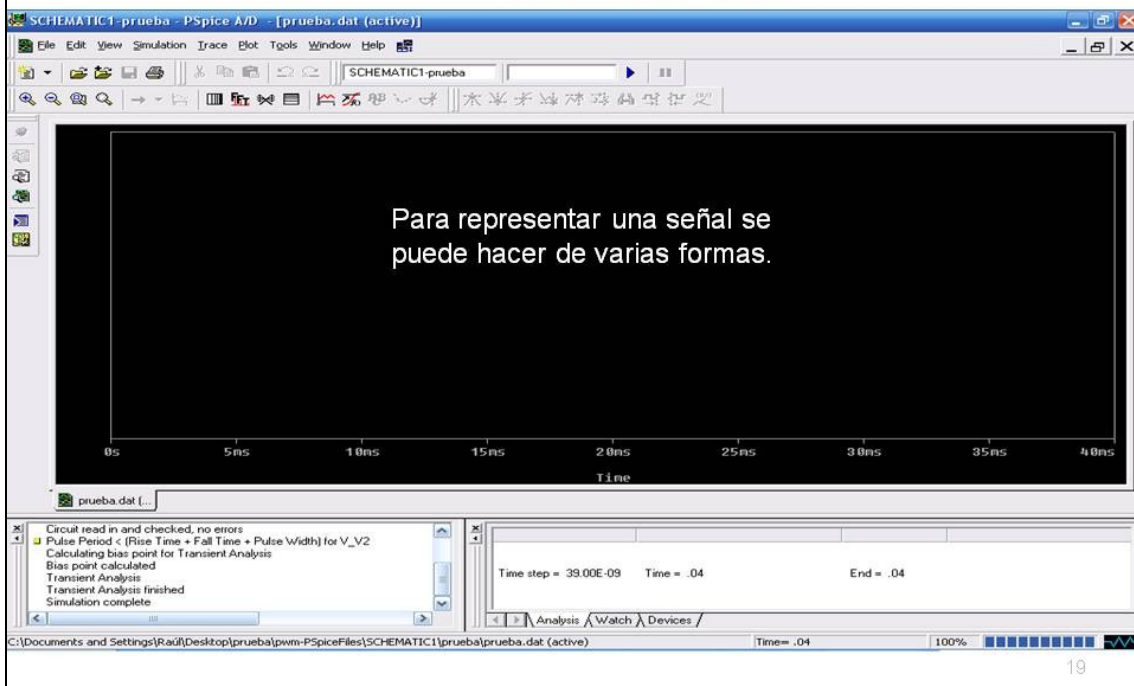
The circuit schematic includes a voltage source V6, a current source V5, and several resistors (R1, R2, R3, R4). It also features two operational amplifiers (U3, U4) and a network of transistors (Z1, Z2, Z3, Z4) and diodes (D1, D2, D3, D4). The circuit is configured for a simulation named 'pwm medio puente'.

SIMULACIÓN



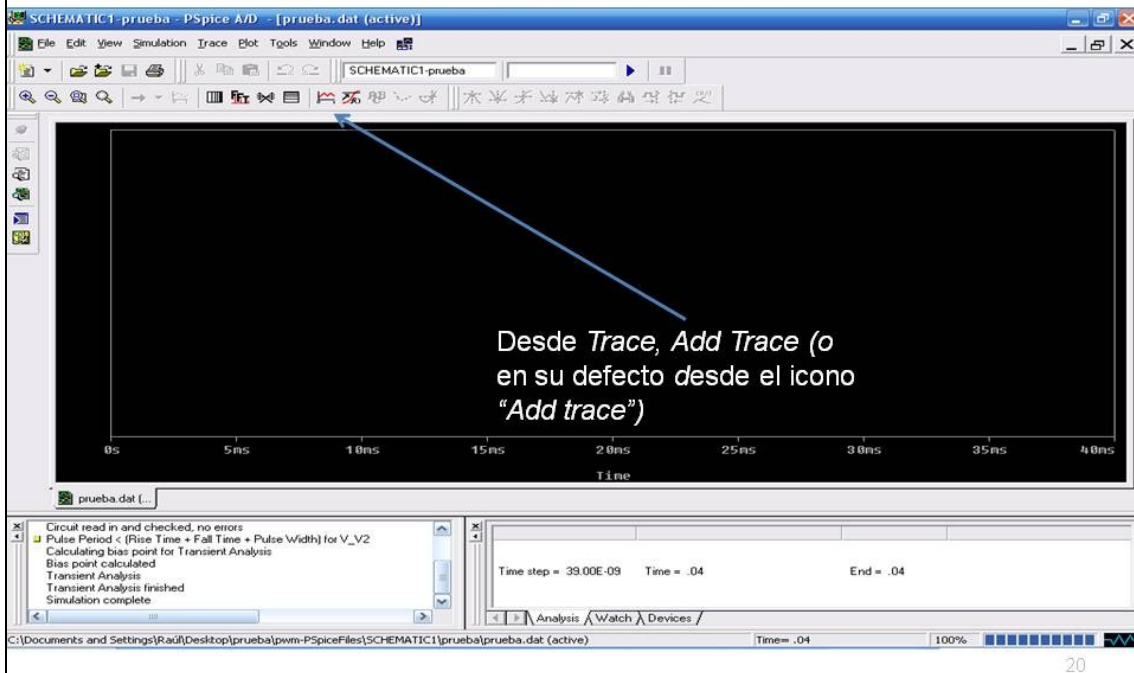
18

PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



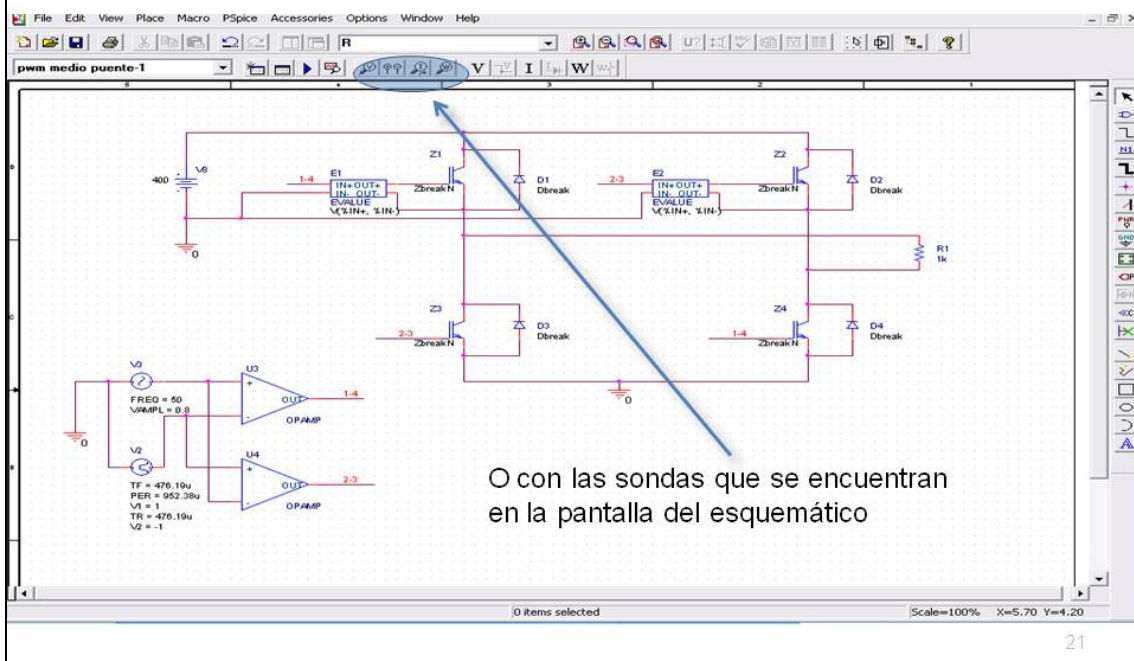
19

PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



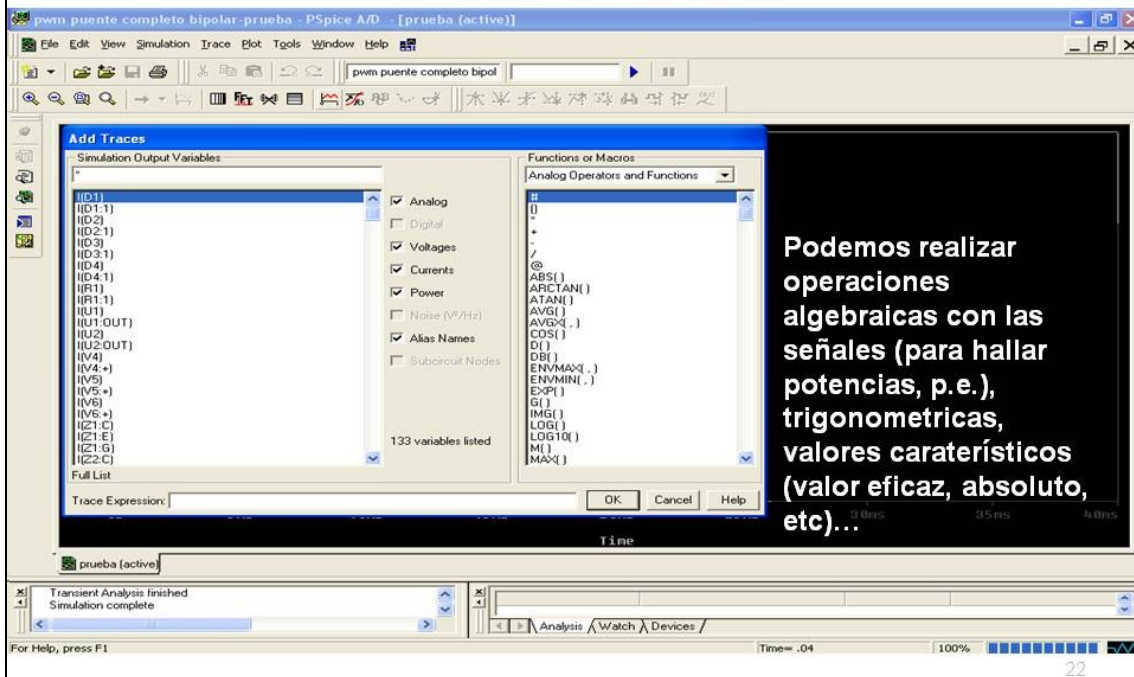
20

PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN

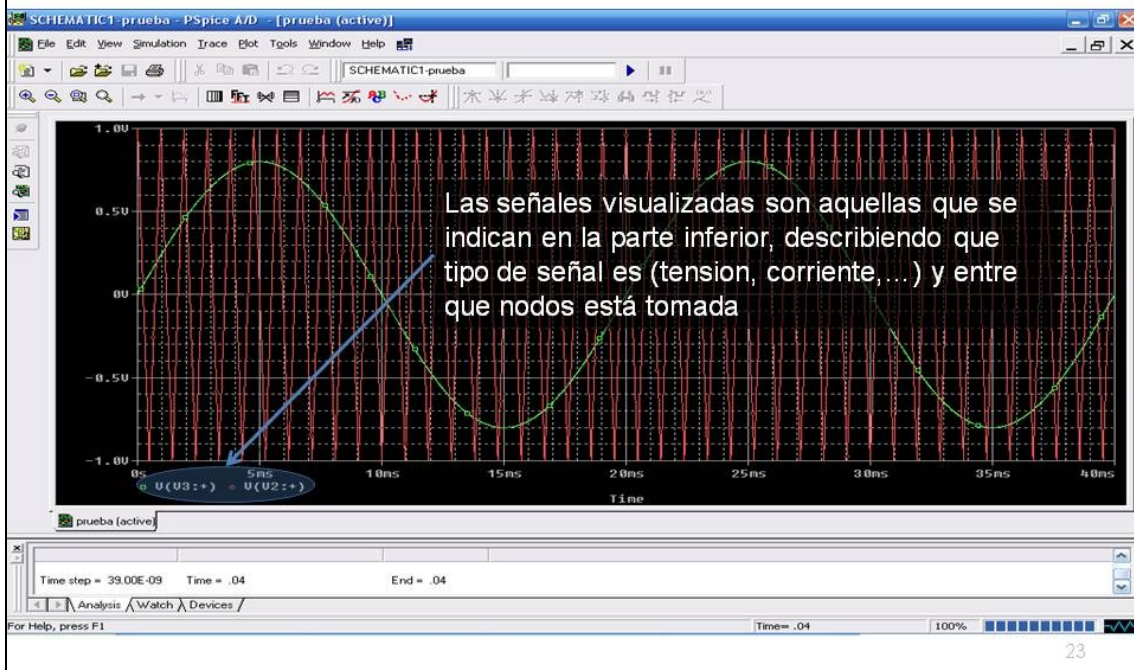


21

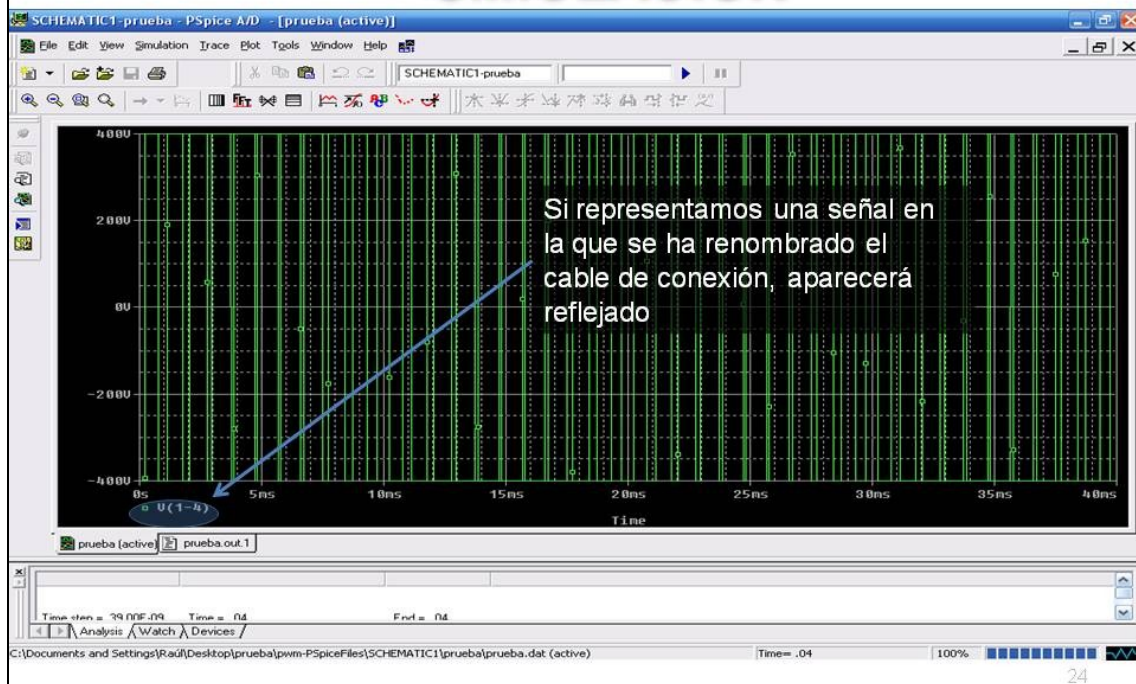
PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN

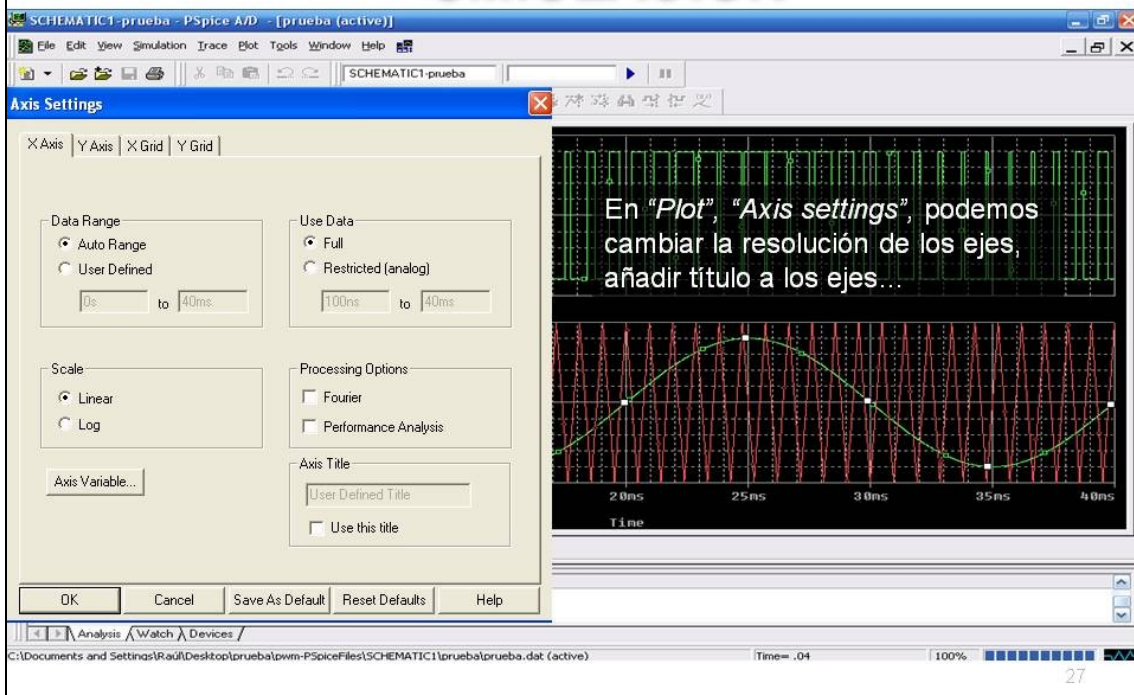


PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



26

PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



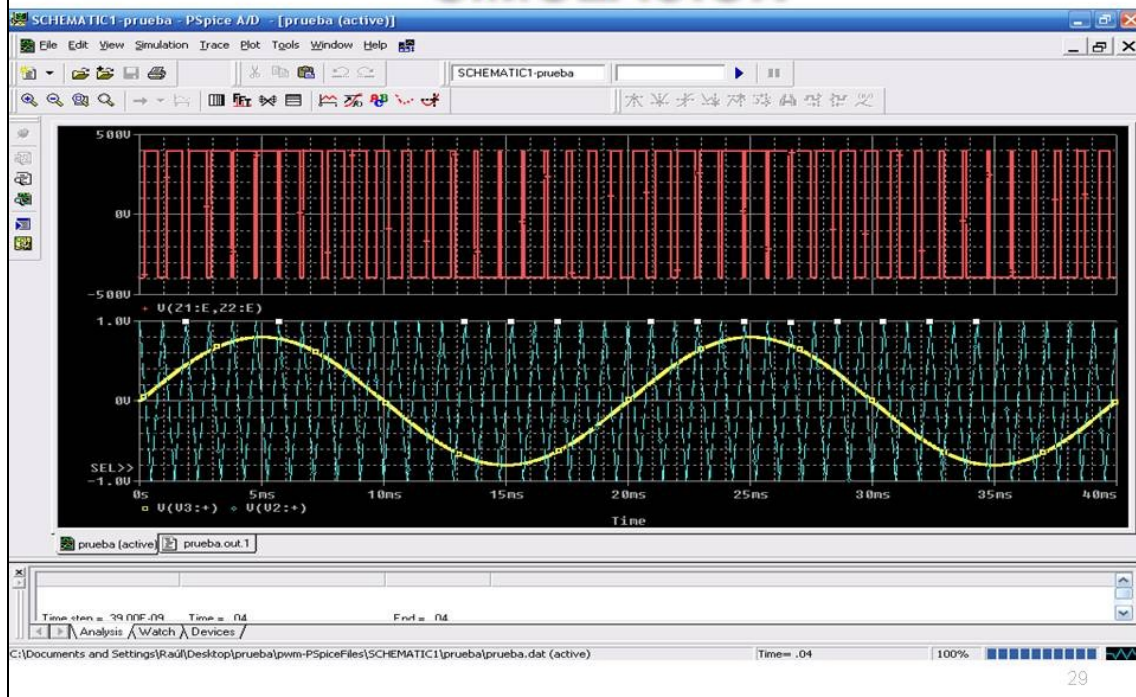
27

PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



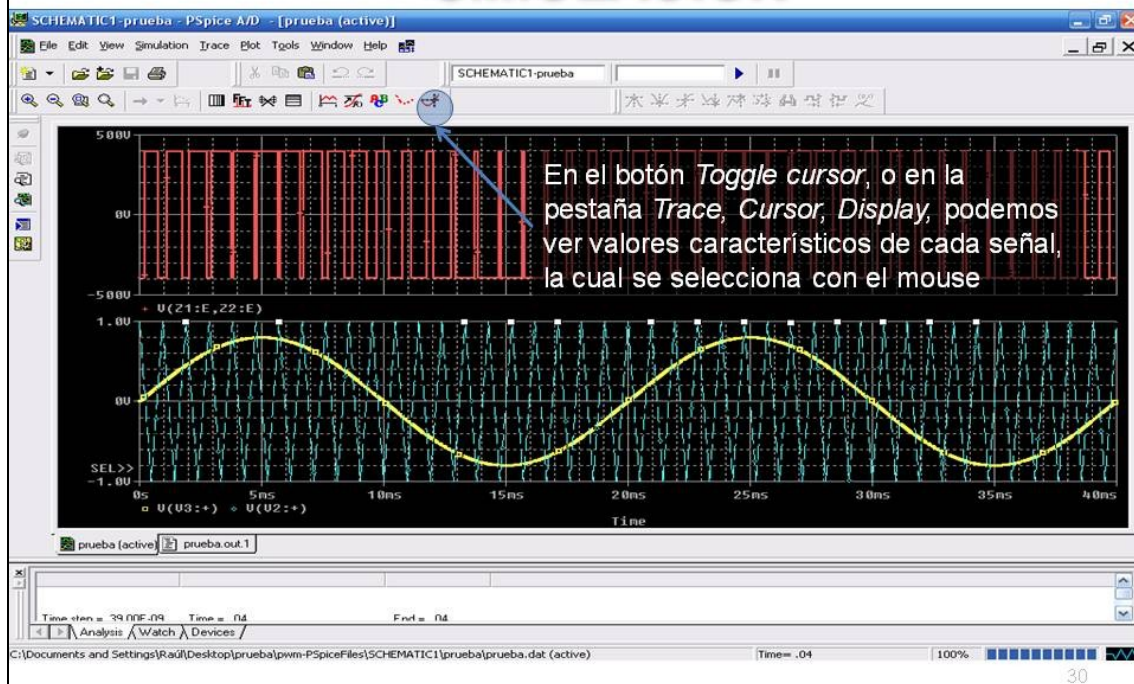
28

PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN

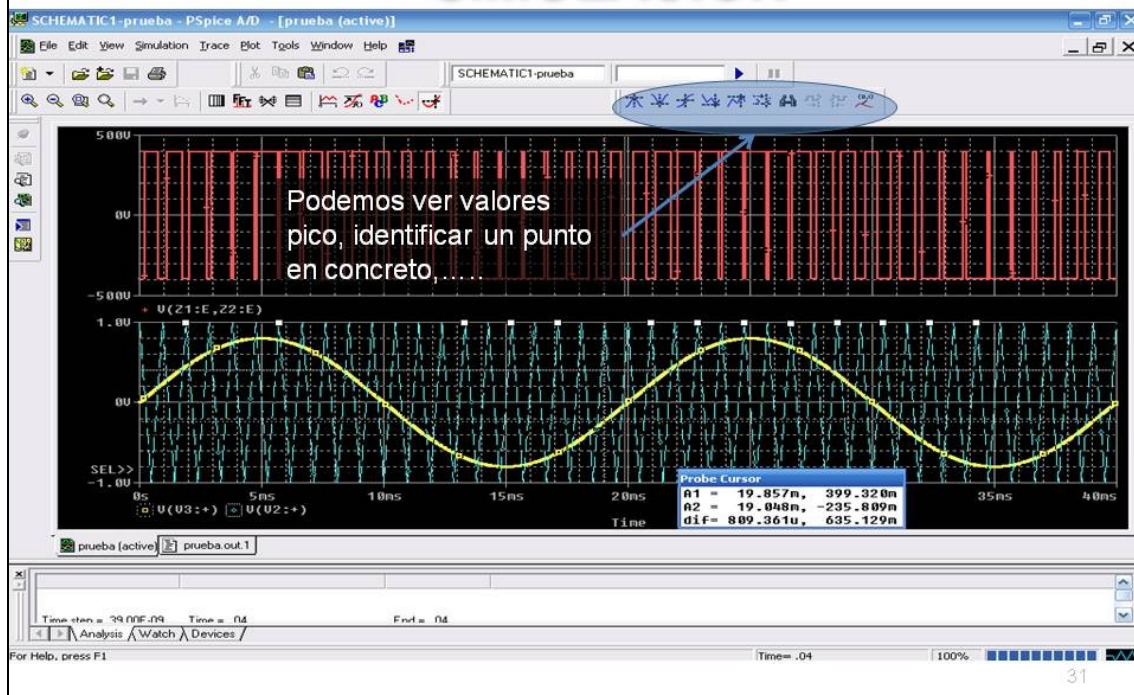


29

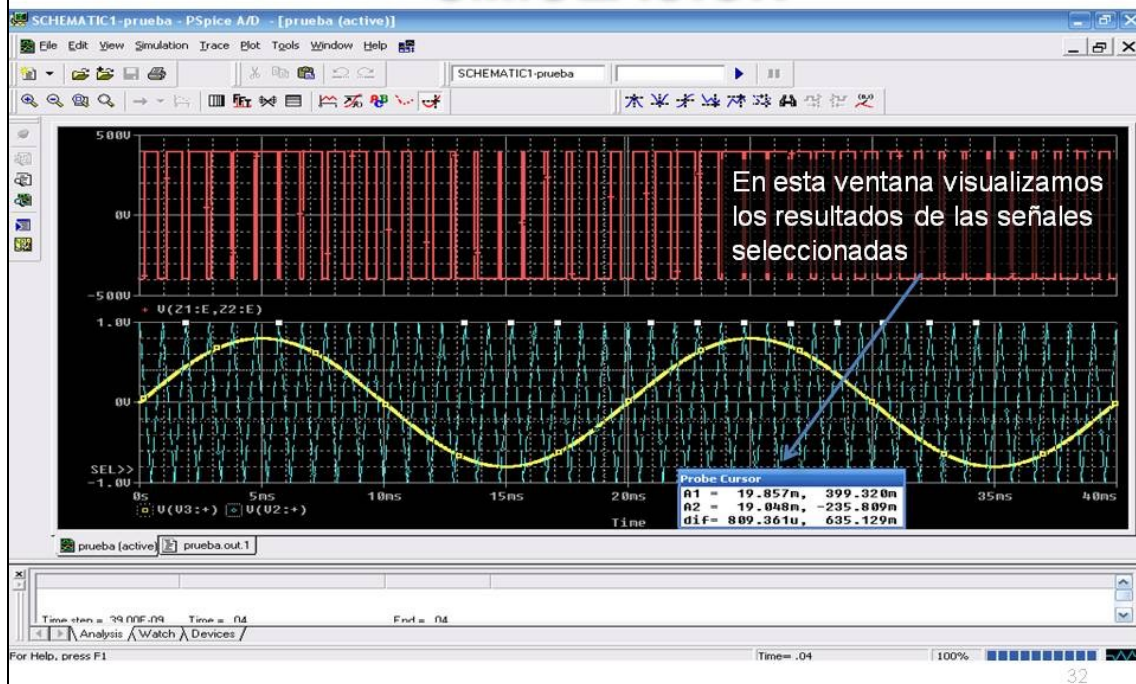
PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



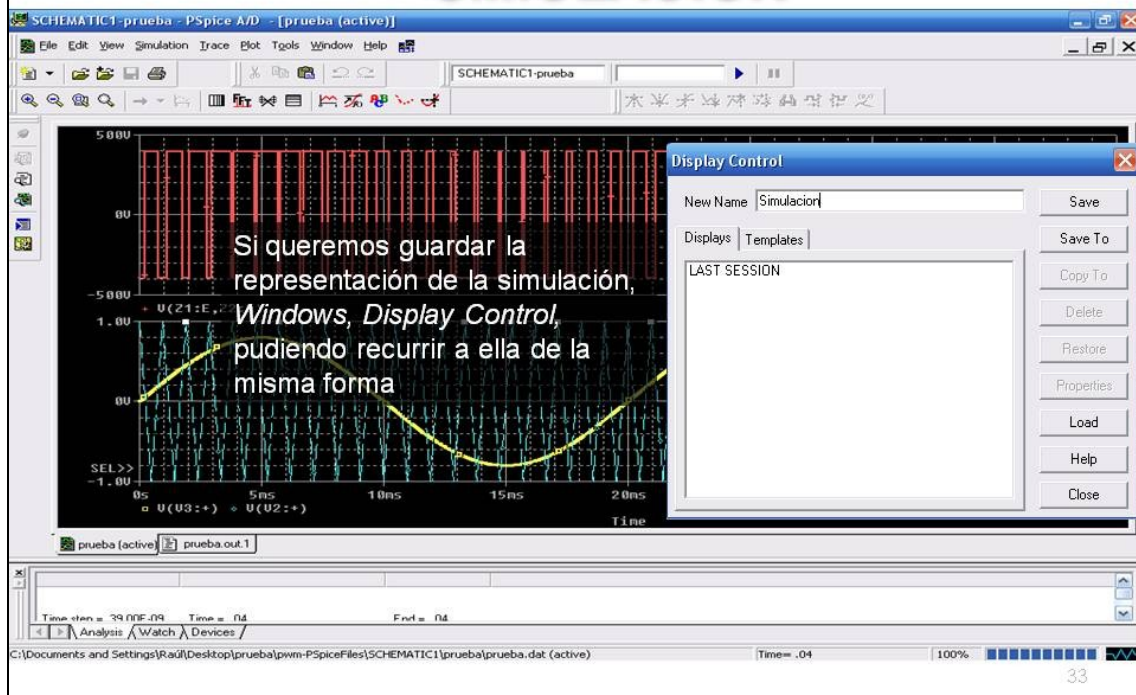
PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN



PSPICE A/D. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN

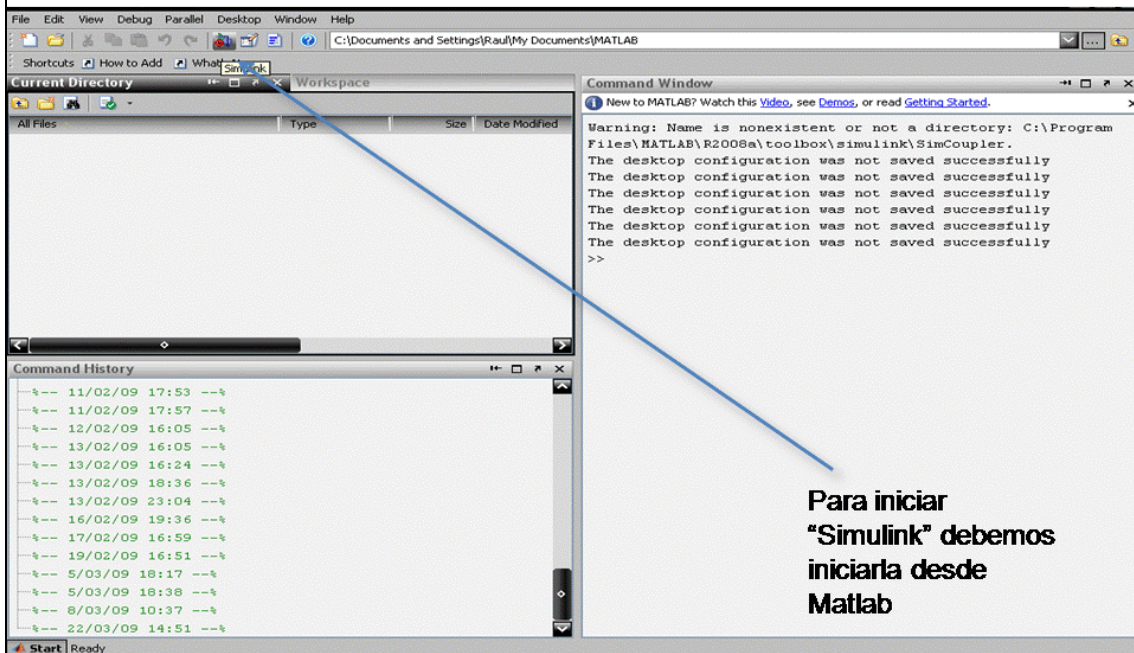


MANUAL BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE SIMULINK

SIMULINK



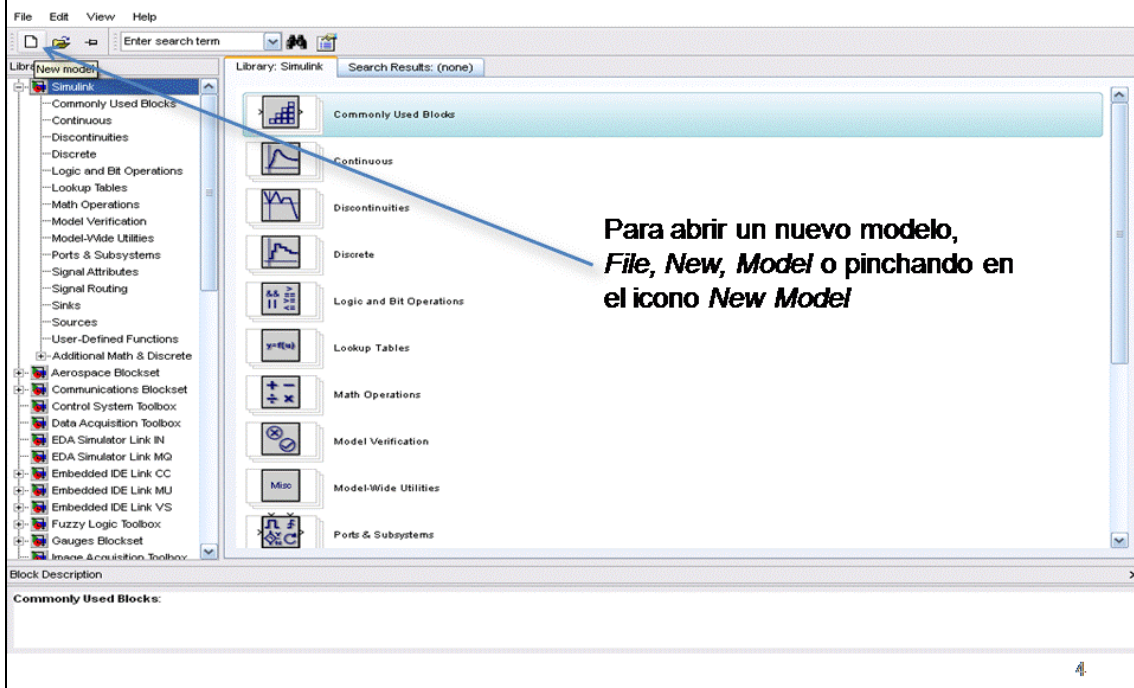
SIMULINK



Para iniciar
"Simulink" debemos
iniciarla desde
Matlab

3

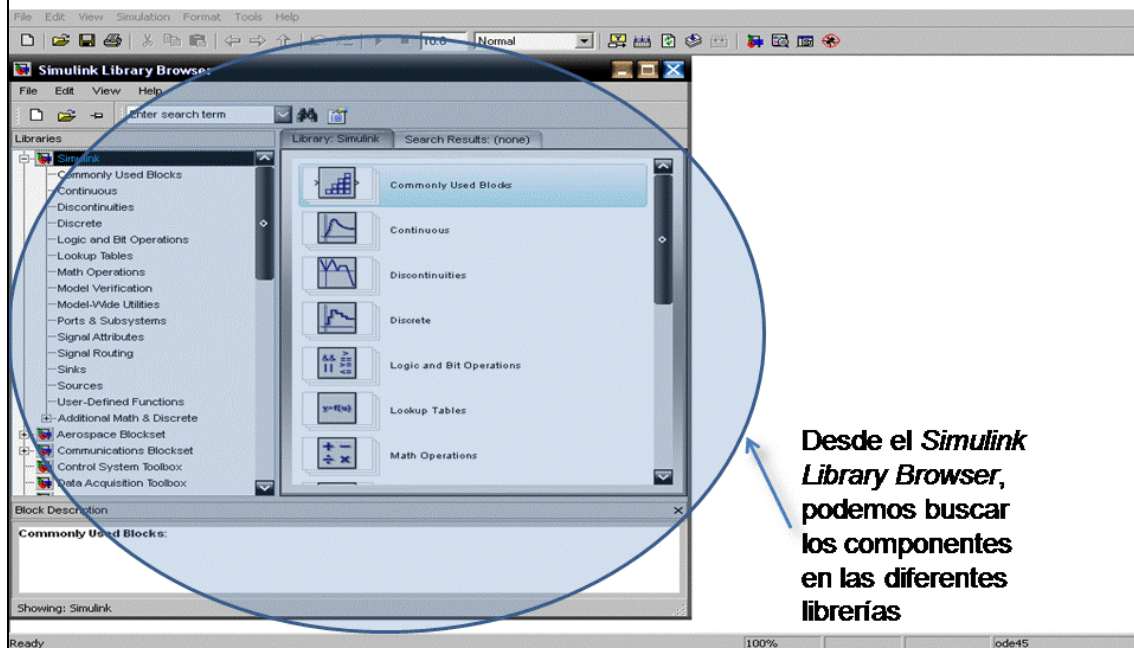
CREAR UN NUEVO FICHERO



Para abrir un nuevo modelo,
File, New, Model o pinchando en
el icono New Model

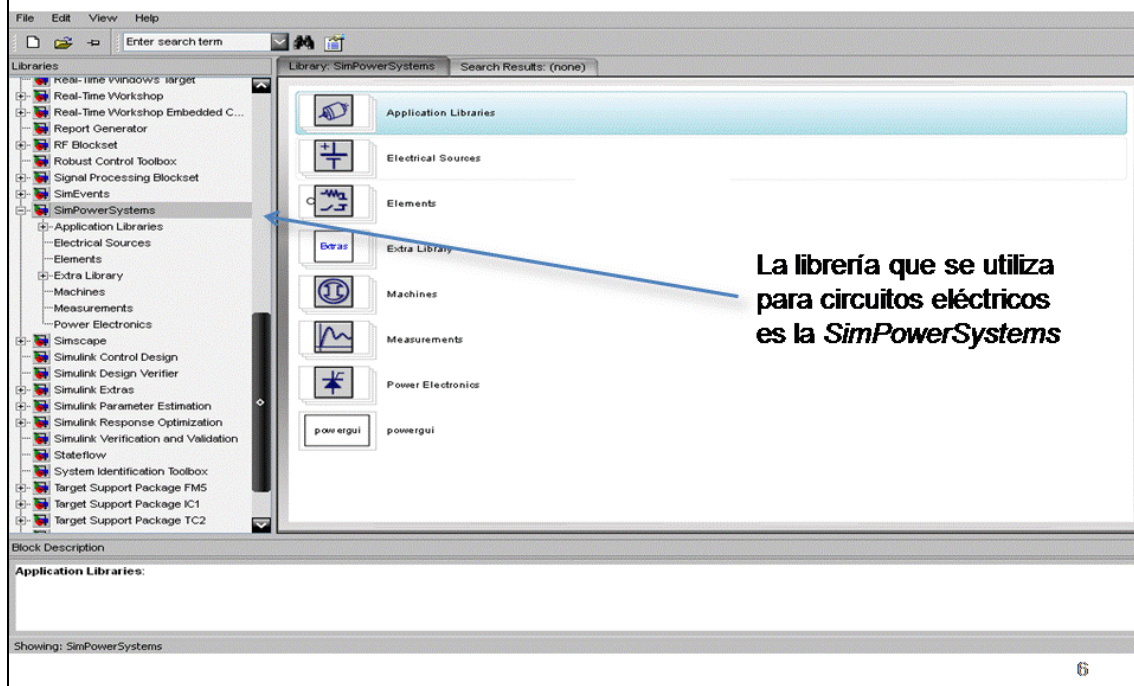
4

LIBRERÍAS



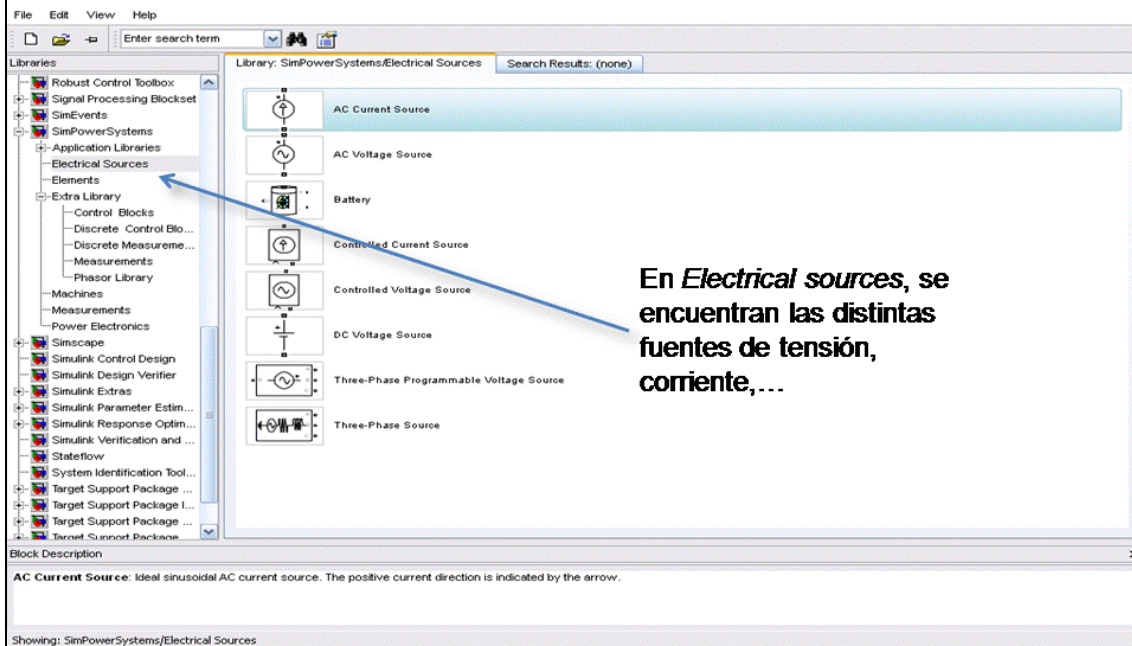
5

LIBRERÍAS



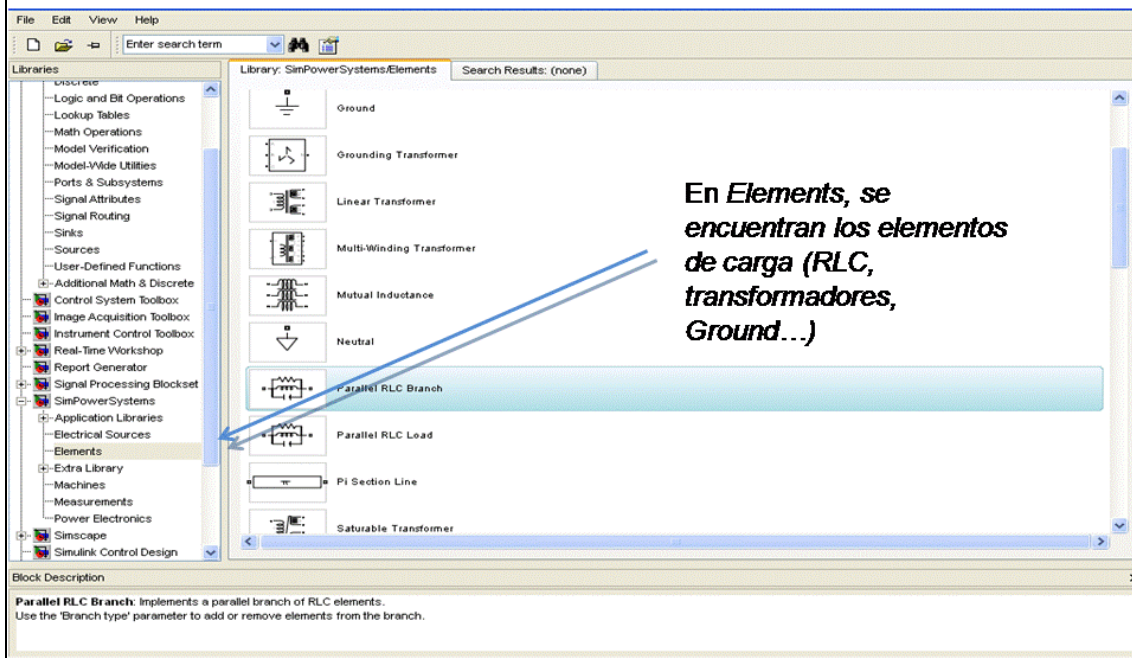
6

LIBRERÍAS



7

LIBRERÍAS



8

LIBRERÍAS

En *Power electronics*, se encuentran los componentes para los circuitos de potencia

Detailed Thyristor: Detailed model of Thyristor in parallel with a series RC snubber circuit. In on-state the Thyristor model has an internal resistance (R_{on}) and inductance (L_{on}). In off-state the Detailed Thyristor acts as an impedance. Best accuracy is achieved when T_q is larger than the simulation step size.

Showing: SinPowerSystems/Power Electronics

9

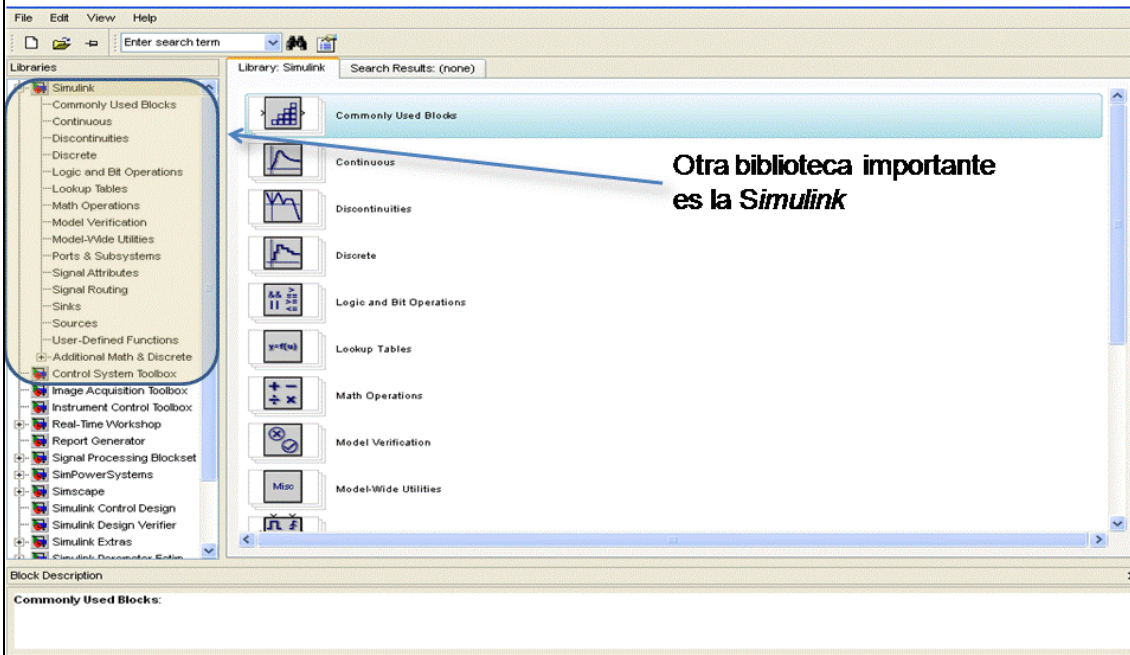
LIBRERÍAS

En *Measurements* se encuentran los diferentes aparatos de medida

Current Measurement: Ideal current measurement.

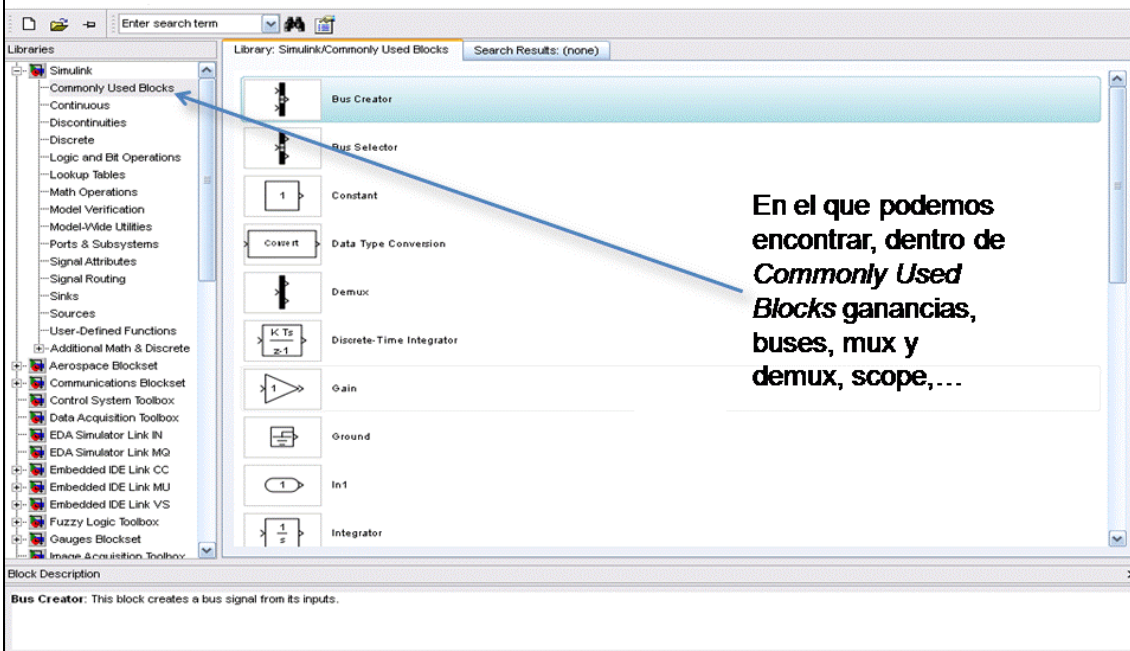
10

LIBRERÍAS



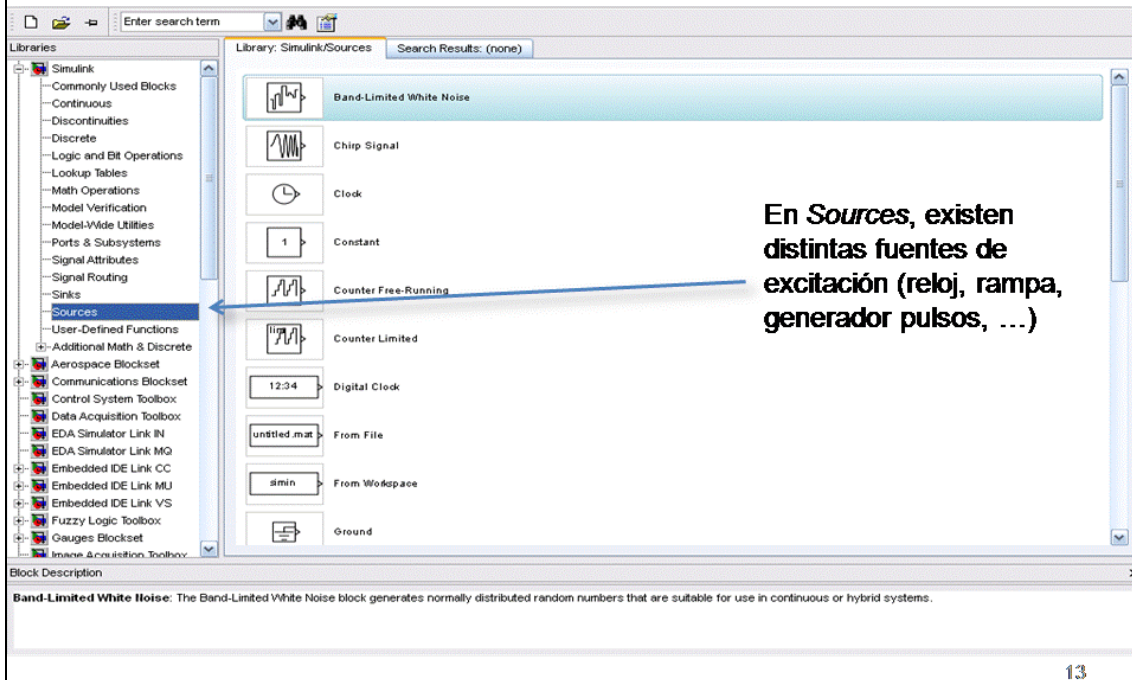
11

LIBRERÍAS



12

LIBRERÍAS

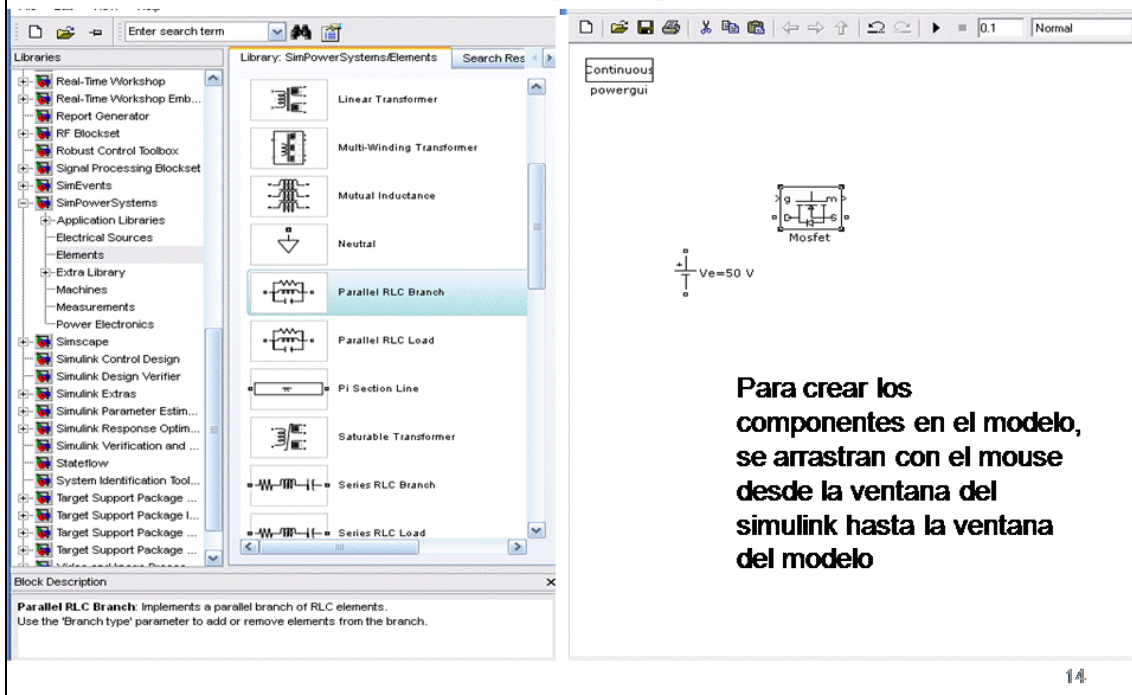


En *Sources*, existen distintas fuentes de excitación (reloj, rampa, generador pulsos, ...)

Block Description
Band-Limited White Noise: The Band-Limited White Noise block generates normally distributed random numbers that are suitable for use in continuous or hybrid systems.

13

ESQUEMATICO: CONVERTIDOR CC-CC REDUCTOR

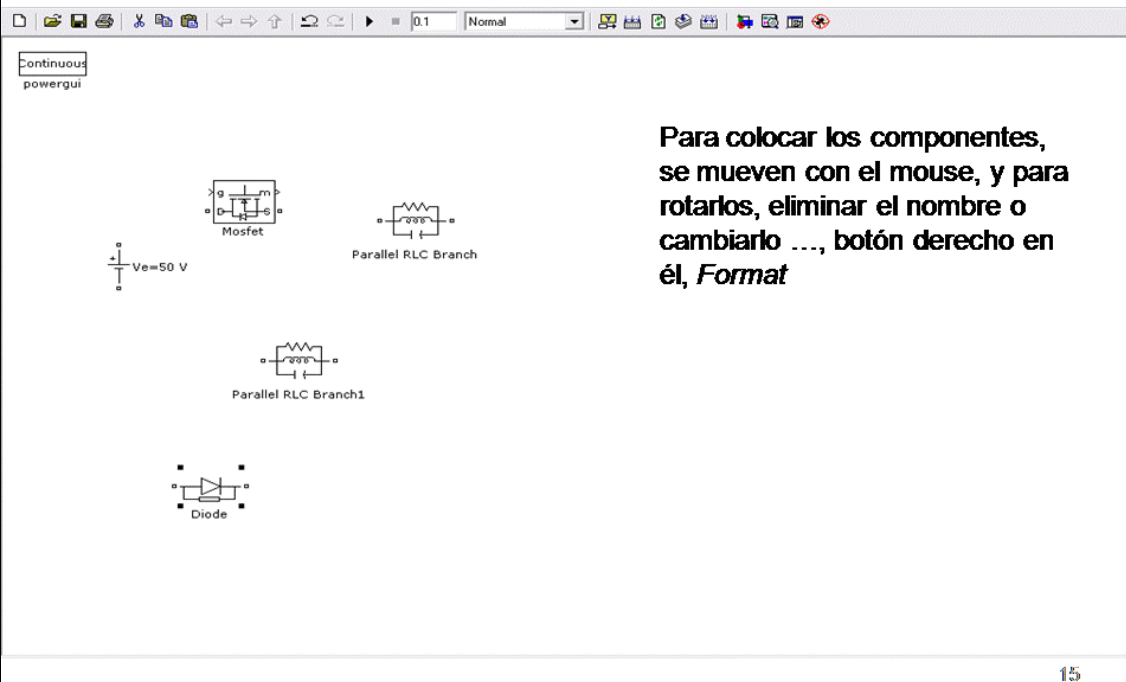


Para crear los componentes en el modelo, se arrastran con el mouse desde la ventana del simulink hasta la ventana del modelo

Block Description
Parallel RLC Branch: implements a parallel branch of RLC elements. Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.

14

ESQUEMATICO: CONVERTIDOR CC-CC REDUCTOR



Continuous powergui

Mosfet

Parallel RLC Branch

Ve=50 V

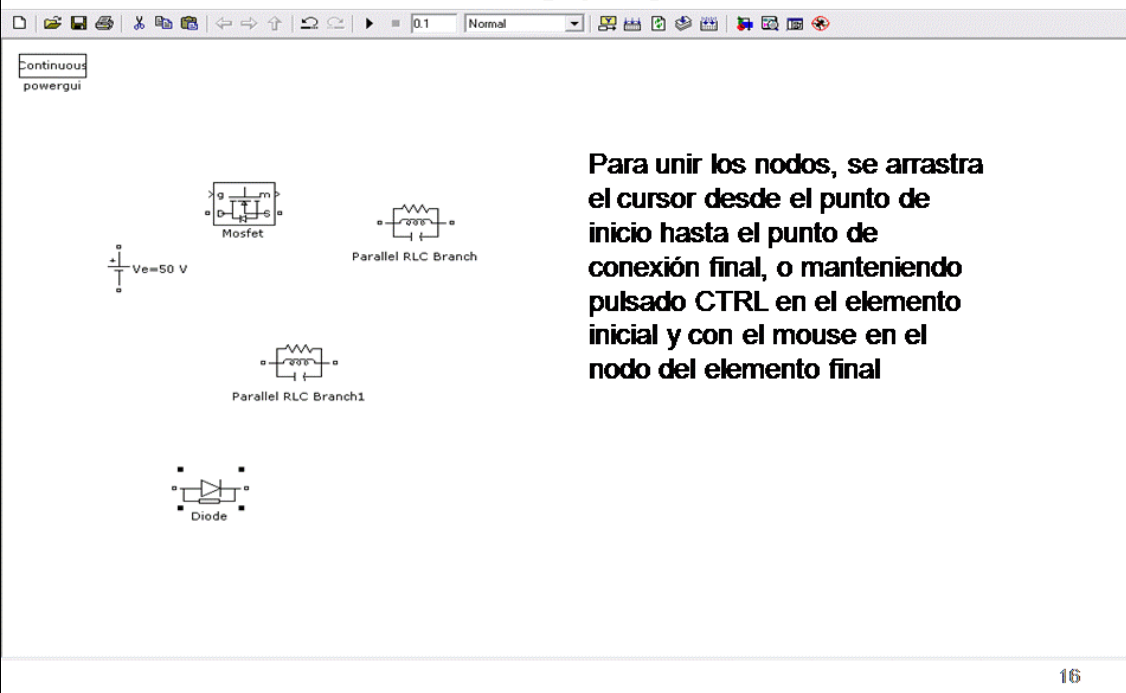
Parallel RLC Branch1

Diode

Para colocar los componentes, se mueven con el mouse, y para rotarlos, eliminar el nombre o cambiarlo ..., botón derecho en él, *Format*

15

ESQUEMATICO: CONVERTIDOR CC-CC REDUCTOR



Continuous powergui

Mosfet

Parallel RLC Branch

Ve=50 V

Parallel RLC Branch1

Diode

Para unir los nodos, se arrastra el cursor desde el punto de inicio hasta el punto de conexión final, o manteniendo pulsado CTRL en el elemento inicial y con el mouse en el nodo del elemento final

16

ESQUEMATICO: CONVERTIDOR CC-CC REDUCTOR

The screenshot shows a circuit schematic for a buck converter. It includes a Pulse Generator, a Mosfet, a 50V DC source (V_e=50 V), and a Parallel RLC Branch1. The 'Block Parameters: Parallel RLC Branch1' dialog box is open, showing the 'Parameters' tab. The 'Branch type' is set to 'L' (Inductor). The 'Inductance L' is set to '1e-3'. The 'Measurement' dropdown is set to 'Open circuit'. The 'Set the in' checkbox is unchecked.

Para seleccionar los tipos de cargas, botón derecho en ellas y elegir R, RL, RLC,..., indicando los valores para cada uno de ellos

17

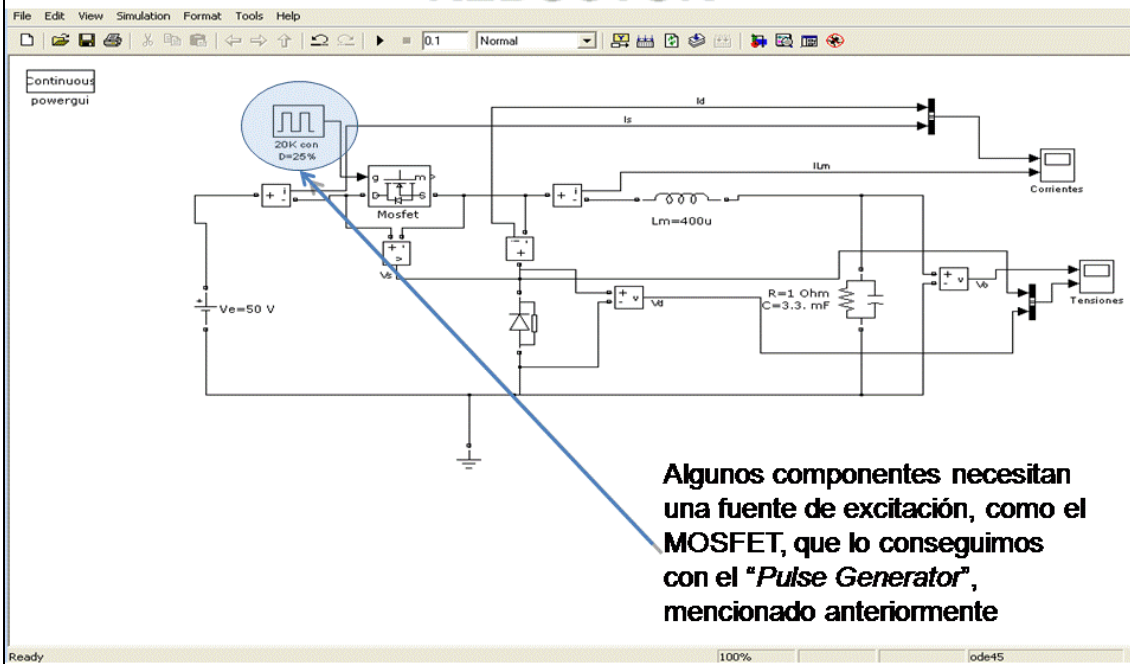
ESQUEMATICO: CONVERTIDOR CC-CC REDUCTOR

The screenshot shows the same circuit schematic as the previous slide, but with the 'Block Parameters: Parallel RLC Branch' dialog box open. The 'Branch type' is set to 'RC'. The 'Resistance R (Ohms)' is set to '1'. The 'Capacitance C (F)' is set to '1e-6'. The 'Set the initial capacitor voltage' checkbox is unchecked. The 'Measurements' dropdown is set to 'None'. The 'None' option is highlighted in the dropdown list.

Los elementos *RLC Branches* tienen la posibilidad de mostrar las medidas que quieren visualizarse sin ayuda de ningún tipo de aparato de medida

18

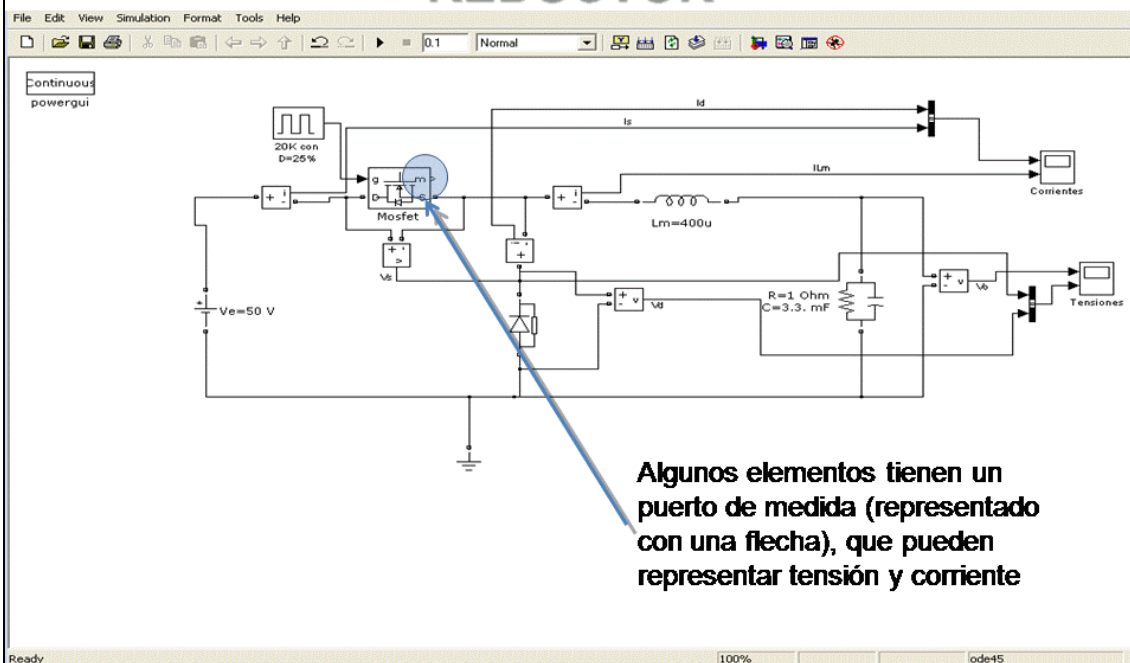
ESQUEMATICO: CONVERTIDOR CC-CC REDUCTOR



Algunos componentes necesitan una fuente de excitación, como el MOSFET, que lo conseguimos con el "Pulse Generator", mencionado anteriormente

19

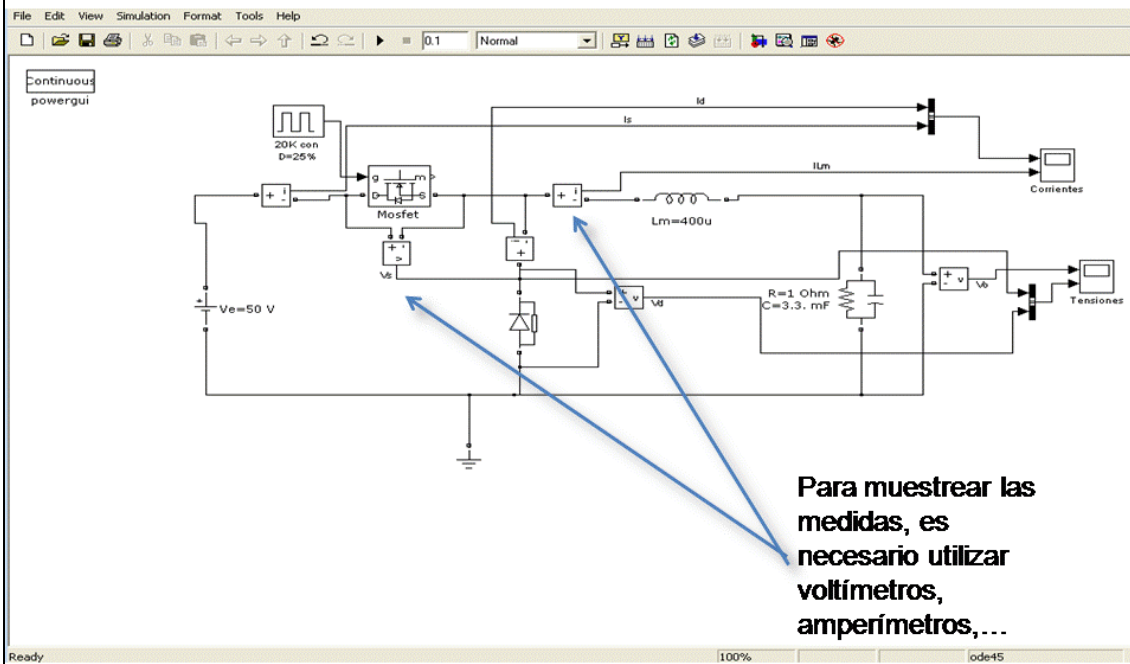
ESQUEMATICO: CONVERTIDOR CC-CC REDUCTOR



Algunos elementos tienen un puerto de medida (representado con una flecha), que pueden representar tensión y corriente

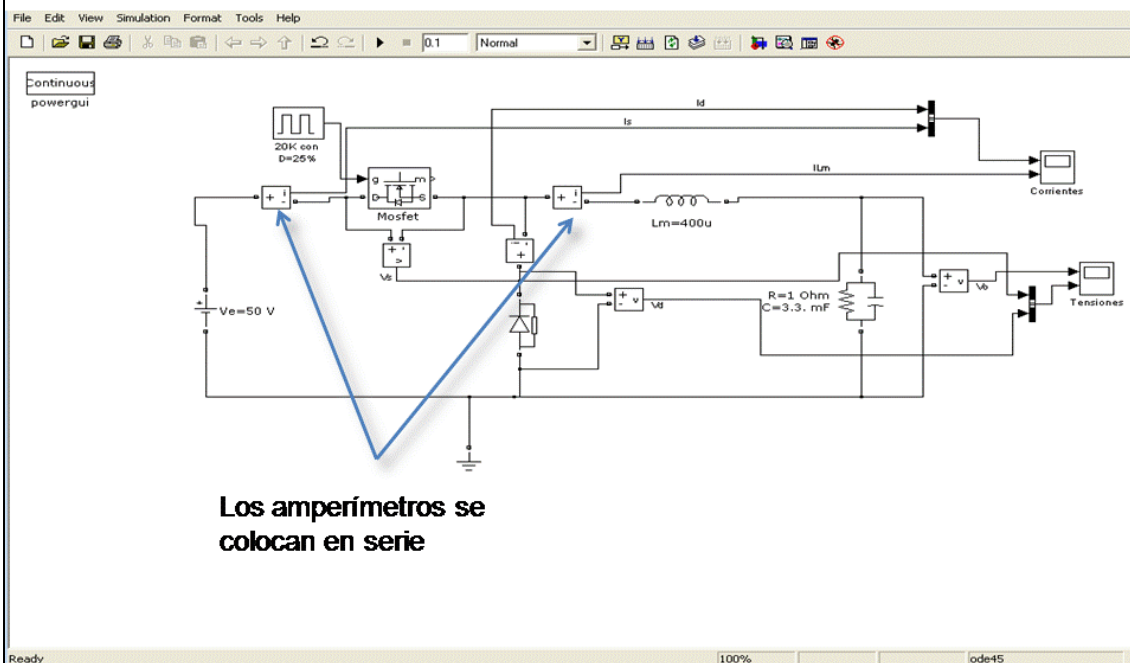
20

ELEMENTOS DE MEDIDA



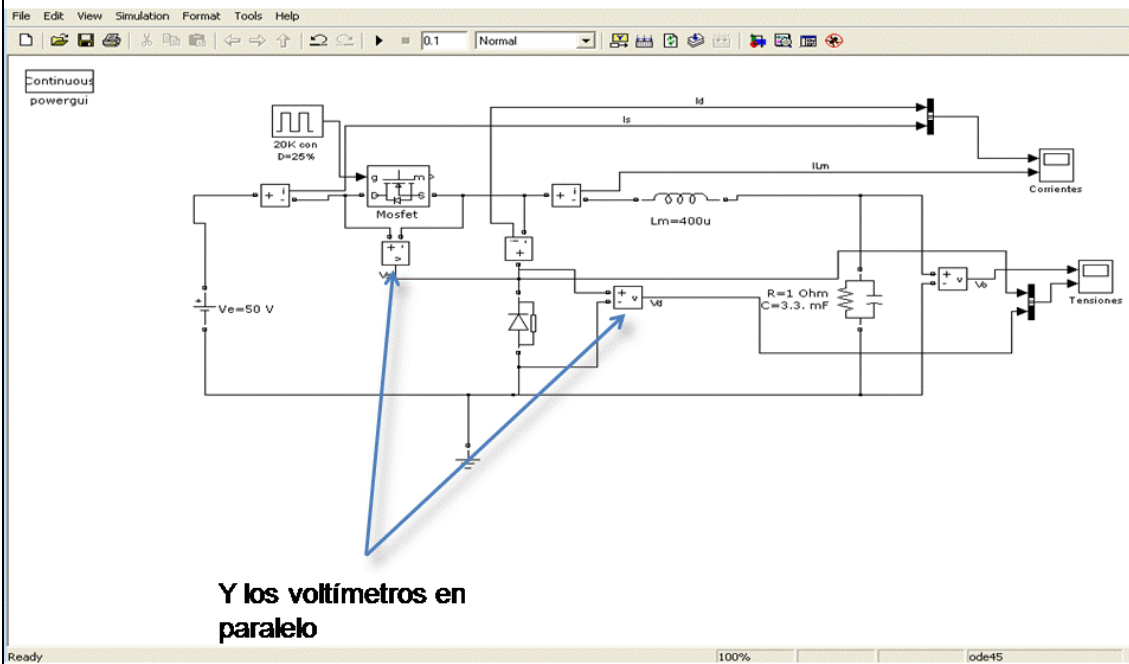
21

ELEMENTOS DE MEDIDA



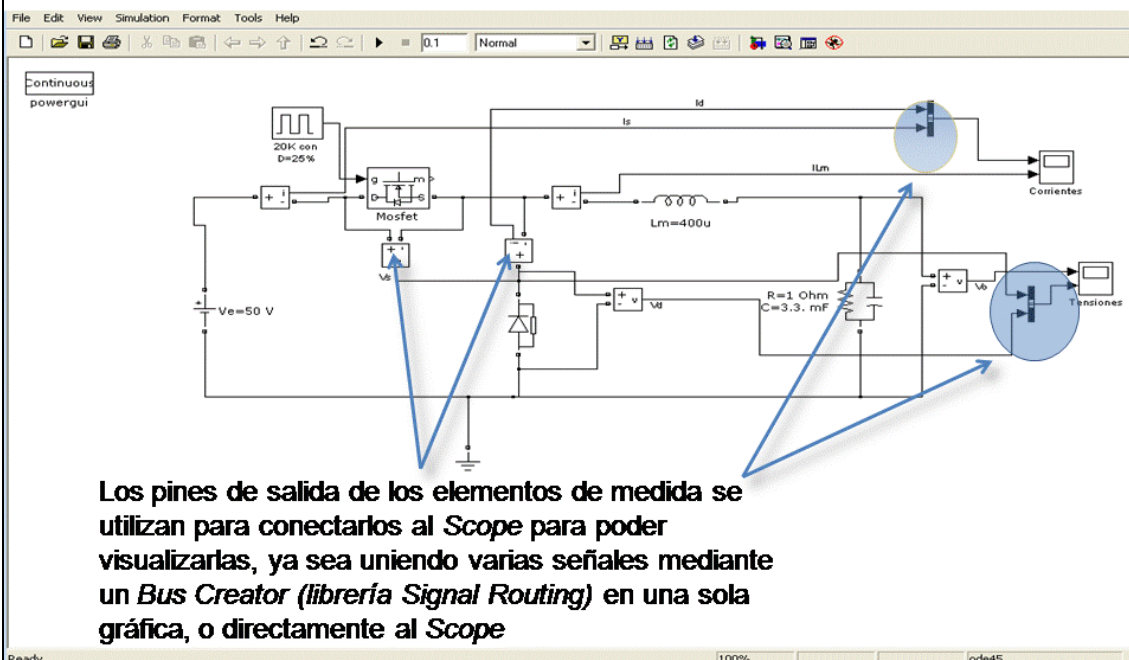
22

ELEMENTOS DE MEDIDA



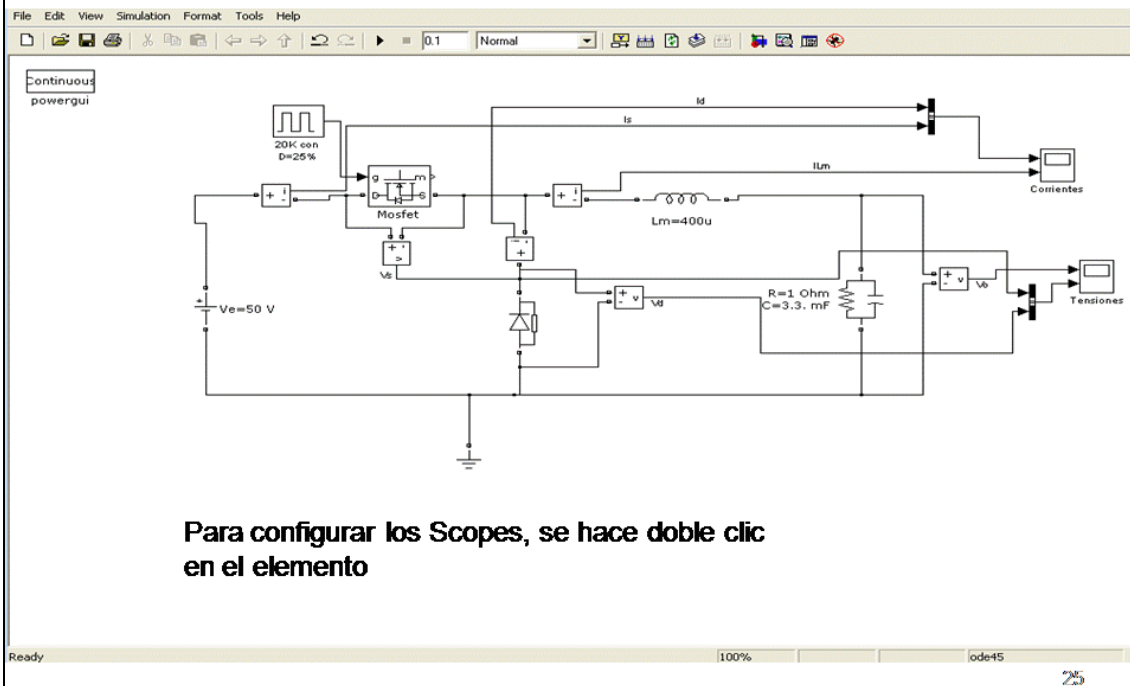
23

ELEMENTOS DE VISUALIZACIÓN

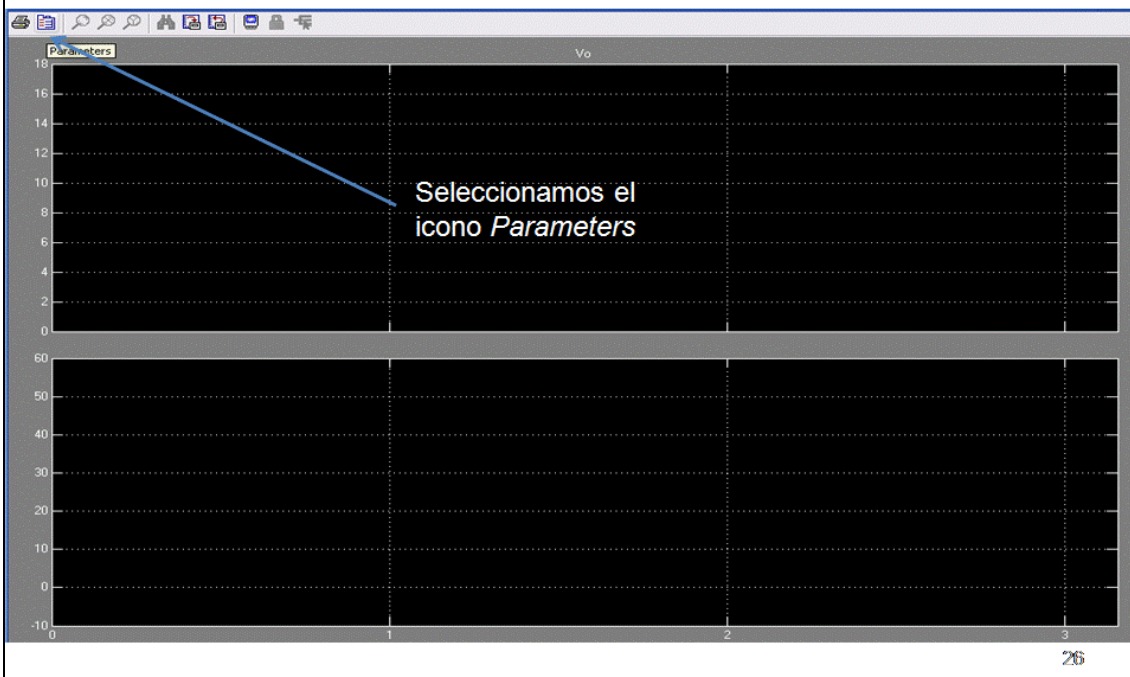


24

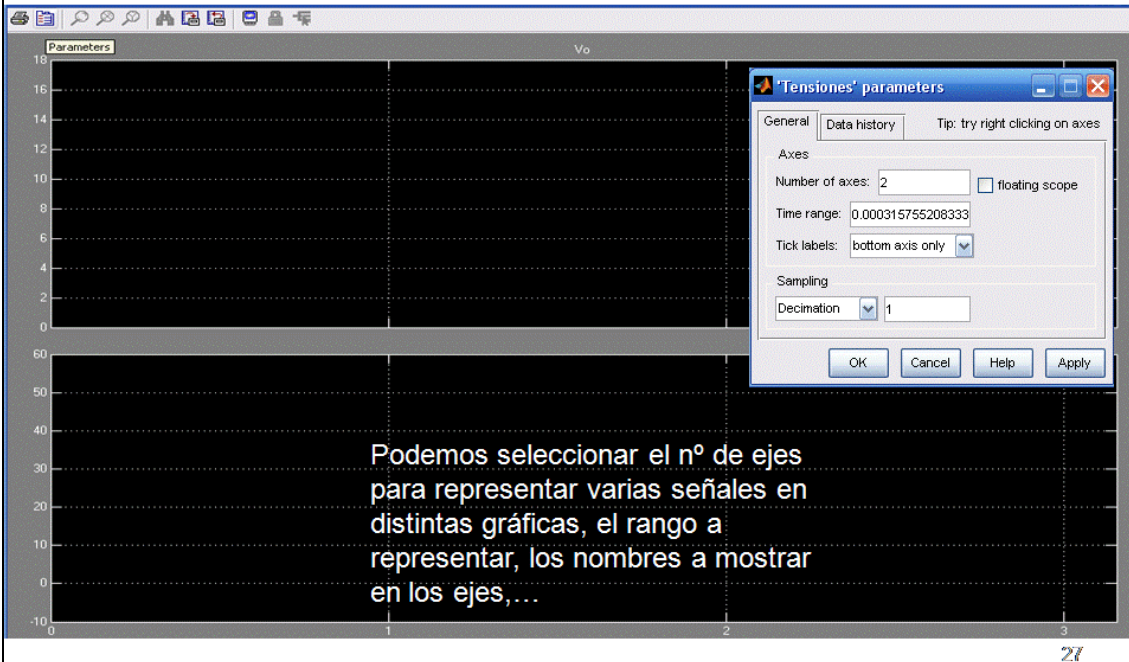
PROPIEDADES SCOPE



PROPIEDADES SCOPE



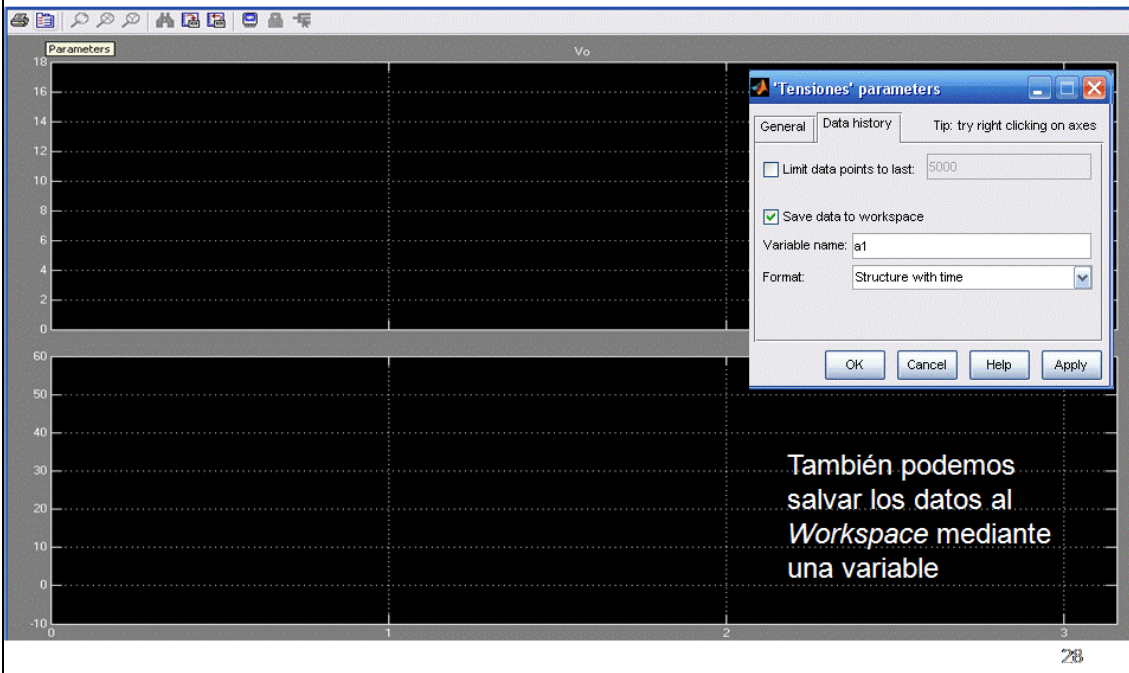
PROPIEDADES SCOPE



Podemos seleccionar el nº de ejes para representar varias señales en distintas gráficas, el rango a representar, los nombres a mostrar en los ejes,...

27

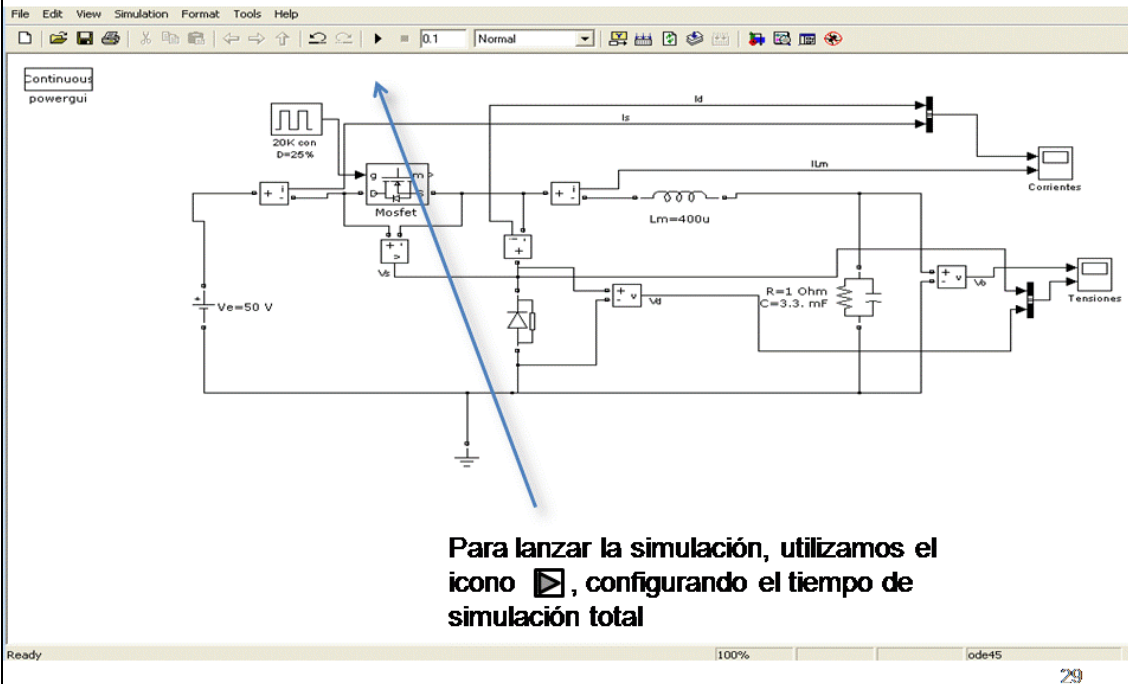
PROPIEDADES SCOPE



También podemos salvar los datos al *Workspace* mediante una variable

28

LANZAR SIMULACIÓN



Continuous powergui

20K con D=25%

Mosfet

$V_s = 50\text{ V}$

I_s

I_{Lm}


$L_m = 400\mu$

$R = 1\text{ Ohm}$
 $C = 3.3\text{ mF}$

V_o

Corrientes

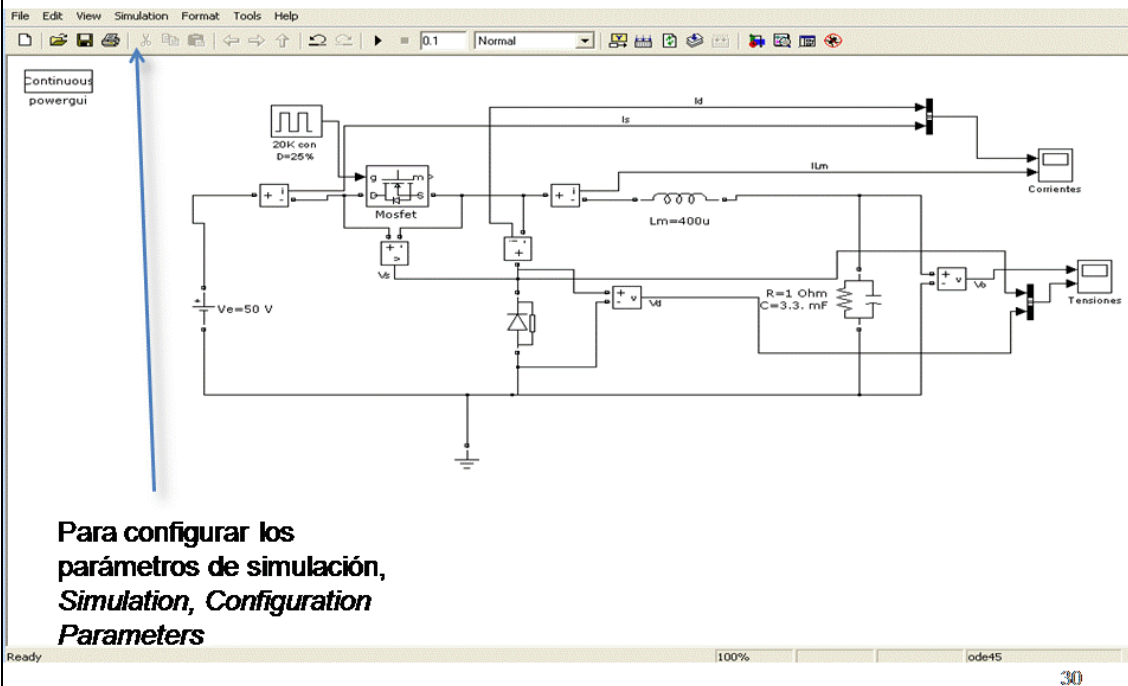
Tensiones

Para lanzar la simulación, utilizamos el icono , configurando el tiempo de simulación total

Ready 100% ode45

29

LANZAR SIMULACIÓN



Continuous powergui

20K con D=25%

Mosfet

$V_s = 50\text{ V}$

I_s

I_{Lm}

$L_m = 400\mu$

$R = 1\text{ Ohm}$
 $C = 3.3\text{ mF}$

V_o

Corrientes

Tensiones

Para configurar los parámetros de simulación, *Simulation, Configuration Parameters*

Ready 100% ode45

30

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Select:

- Solver
- Data Import/Export
- Optimization
- Diagnostics
 - Sample Time
 - Data Validity
 - Type Conversion
 - Connectivity
 - Compatibility
 - Model Referencing
 - Saving
- Hardware Implementation
- Model Referencing
- HDL Coder
 - Global Settings
 - Test Bench
 - EDA Tool Scripts

Simulation time

Start time: 0.0 Stop time: 0.1

Solver options

Type: Variable-step

Max step size: 1e-6

Min step size: auto

Initial step size: auto

Consecutive min step size violations allowed: 1

Stateshape preservation: Disable all

Solver: ode45 (Dormand-Prince)

Relative tolerance: 1e-3

Absolute tolerance: auto

Tasking and sample time options

Tasking mode for periodic sample times: Auto

☐ Automatically handle rate transition for data transfer

☐ Higher priority value indicates higher task priority

Zero crossing options

Zero crossing control: Use local settings

Conservative zero crossings relative tolerance: 10*1.28*eps

Number of consecutive zero crossings allowed: 1000

Zero crossing location algorithm: Non-adaptive

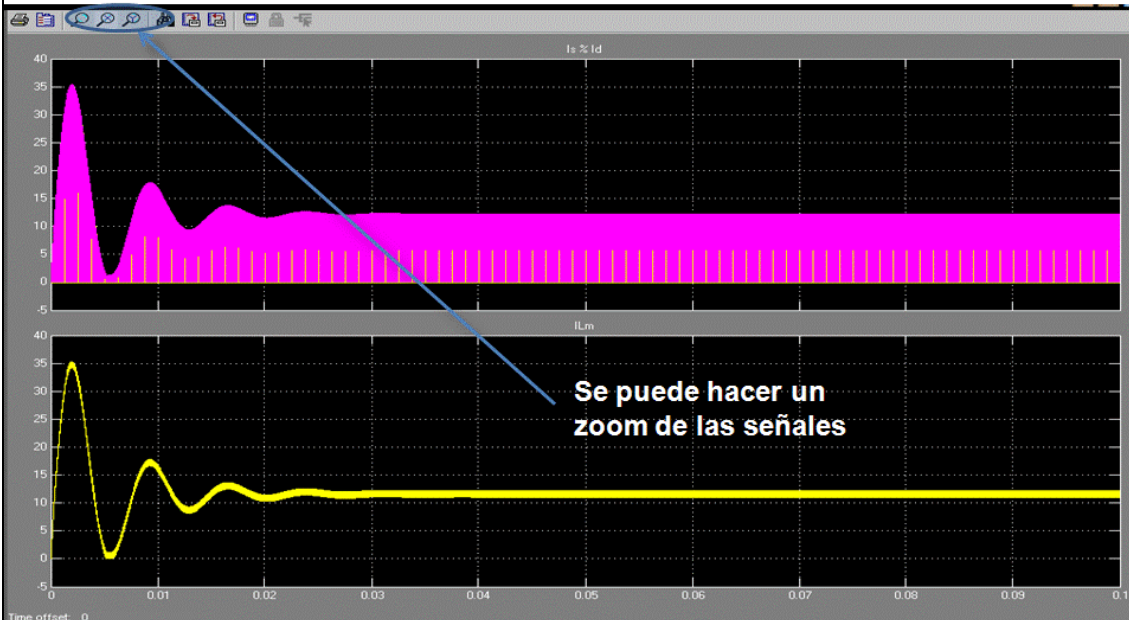
Zero crossing location threshold: auto

Se puede configurar el inicio de la simulación, el final, la resolución, el paso de simulación...

OK Cancel Help Apply

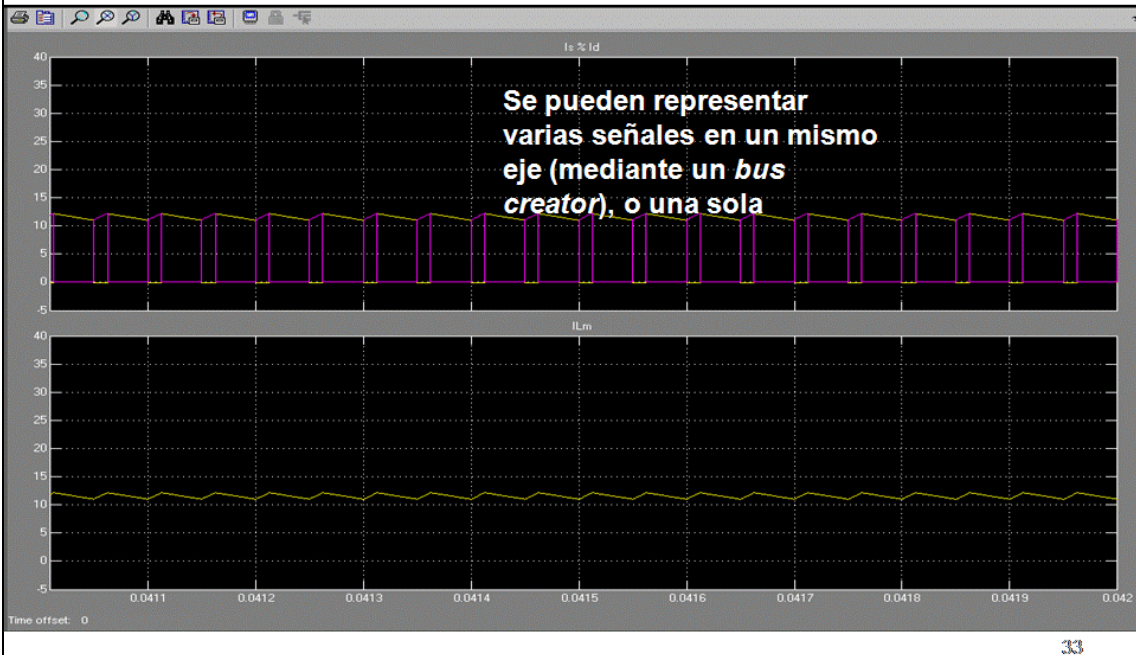
31

SCOPE: POST-PROCESADOR DE IMÁGENES



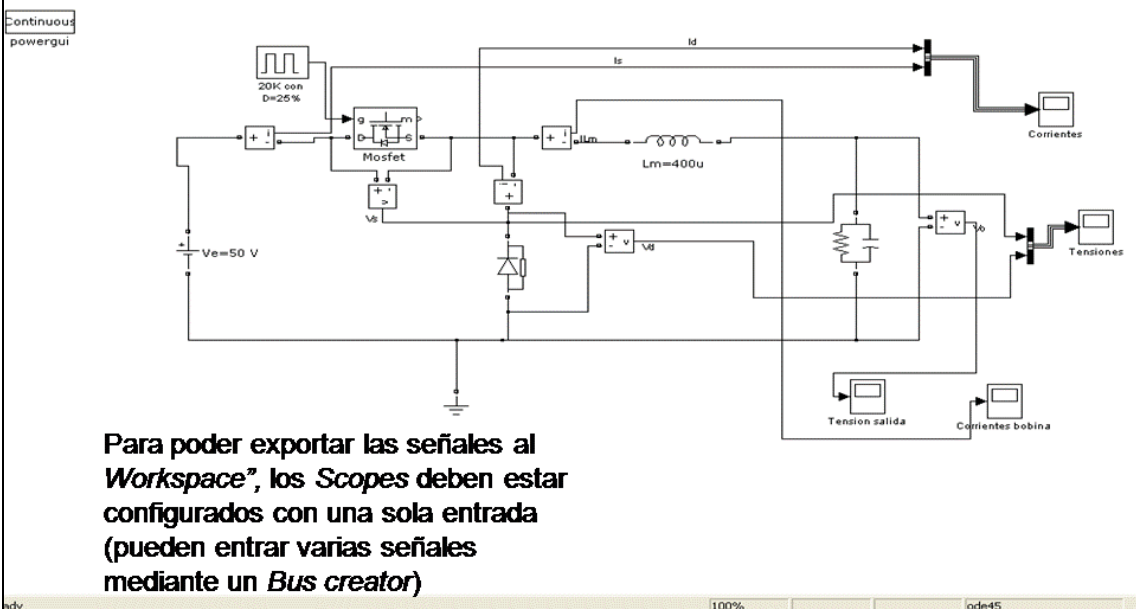
32

SCOPE: POST-PROCESADOR DE IMÁGENES



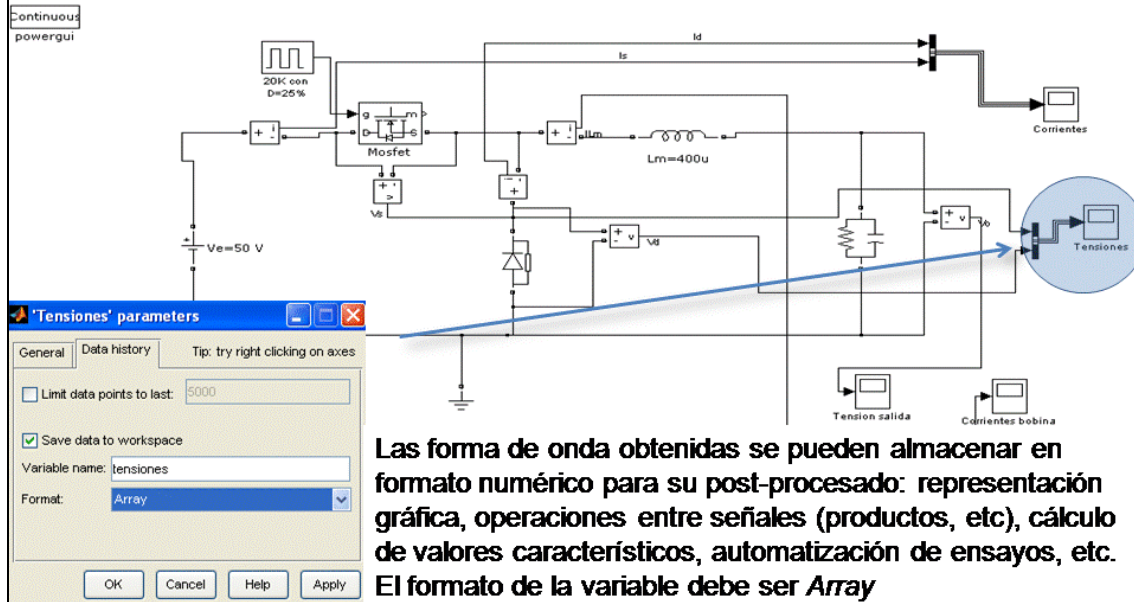
33

SCOPE: POST-PROCESADOR DE IMÁGENES



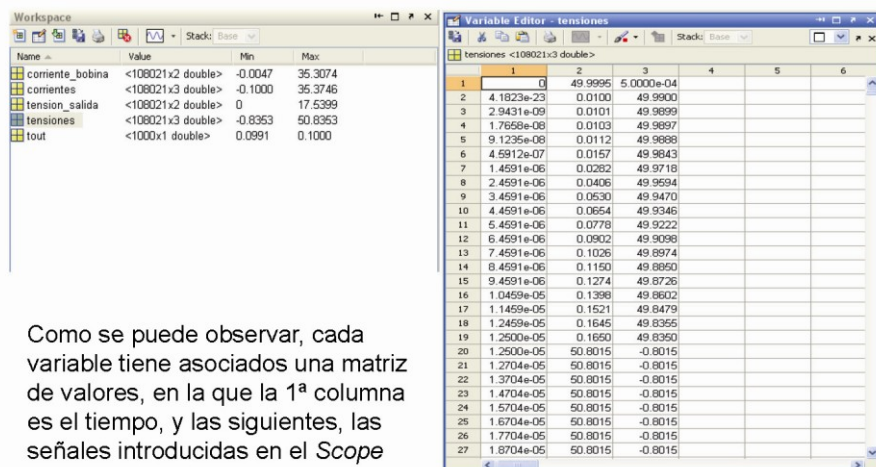
34

SCOPE: POST-PROCESADOR DE IMÁGENES



35

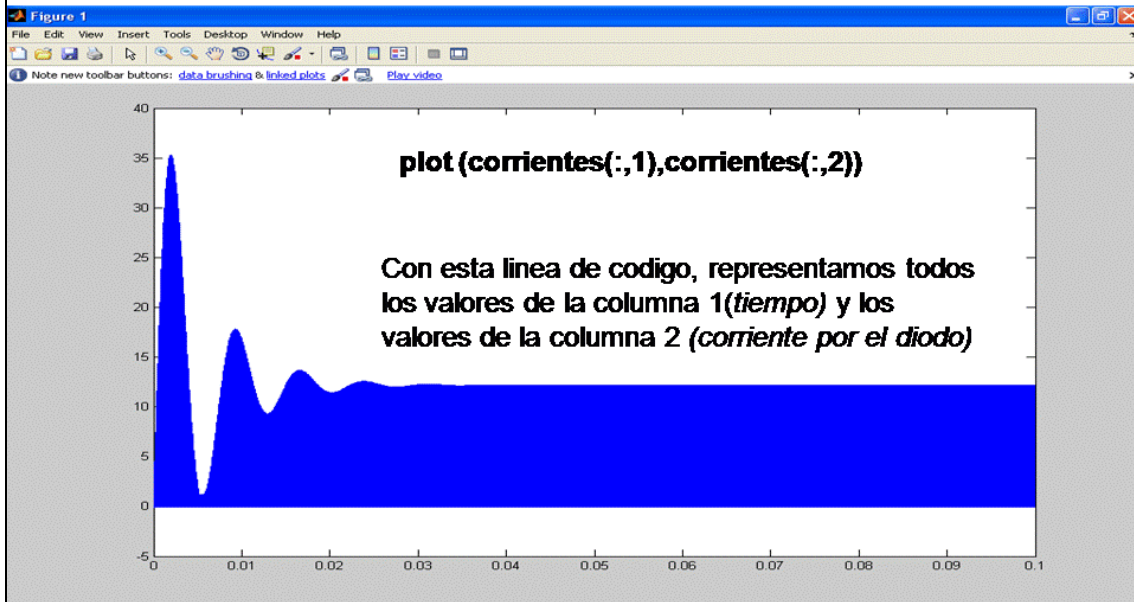
POST-PROCESADO DE IMÁGENES EN EL WORKSPACE



Como se puede observar, cada variable tiene asociados una matriz de valores, en la que la 1ª columna es el tiempo, y las siguientes, las señales introducidas en el Scope

36

POST-PROCESADO DE IMÁGENES EN EL WORKSPACE

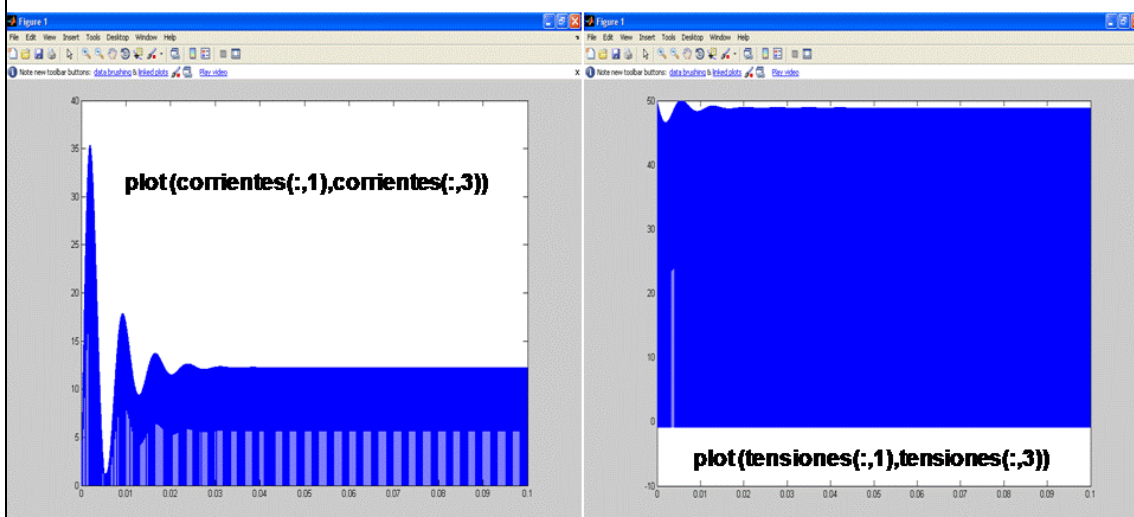


37

POST-PROCESADO DE IMÁGENES EN EL WORKSPACE

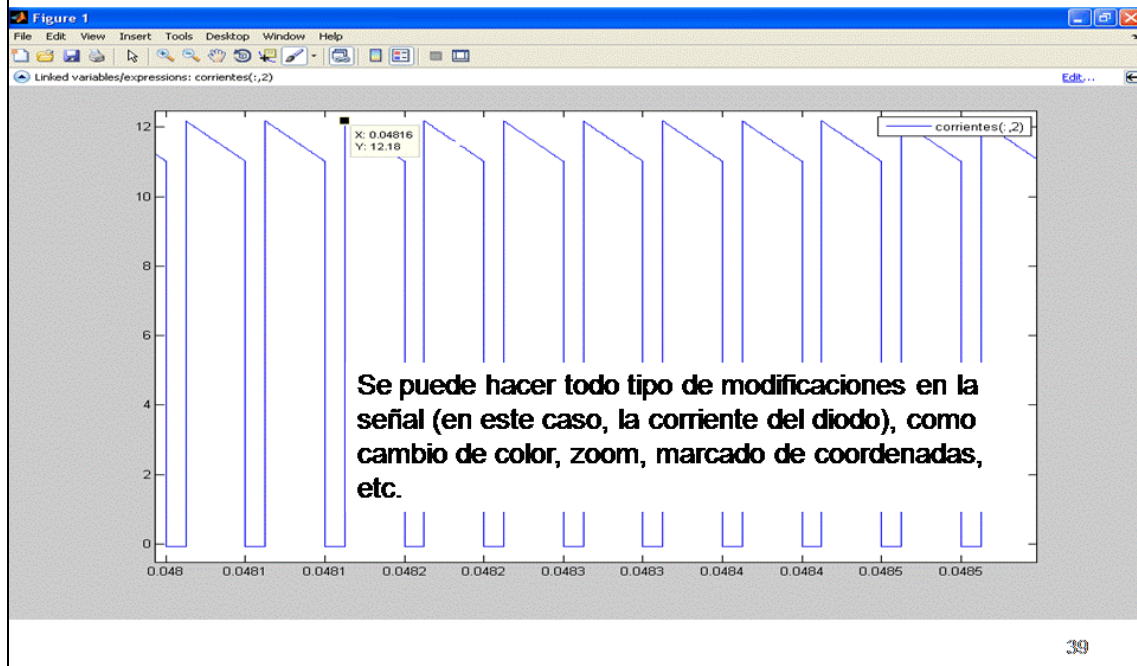
CORRIENTE POR EL MOSFET

TENSION POR EL MOSFET



38

POST-PROCESADO DE IMÁGENES EN EL WORKSPACE

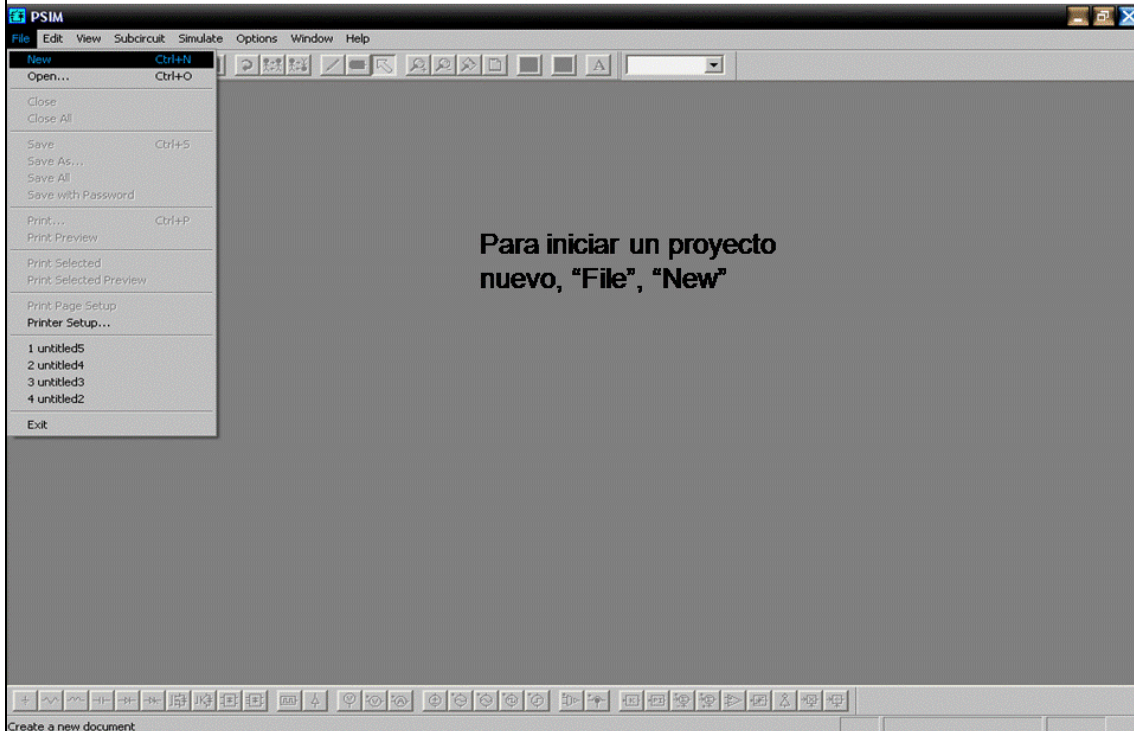


MANUAL BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE PSIM

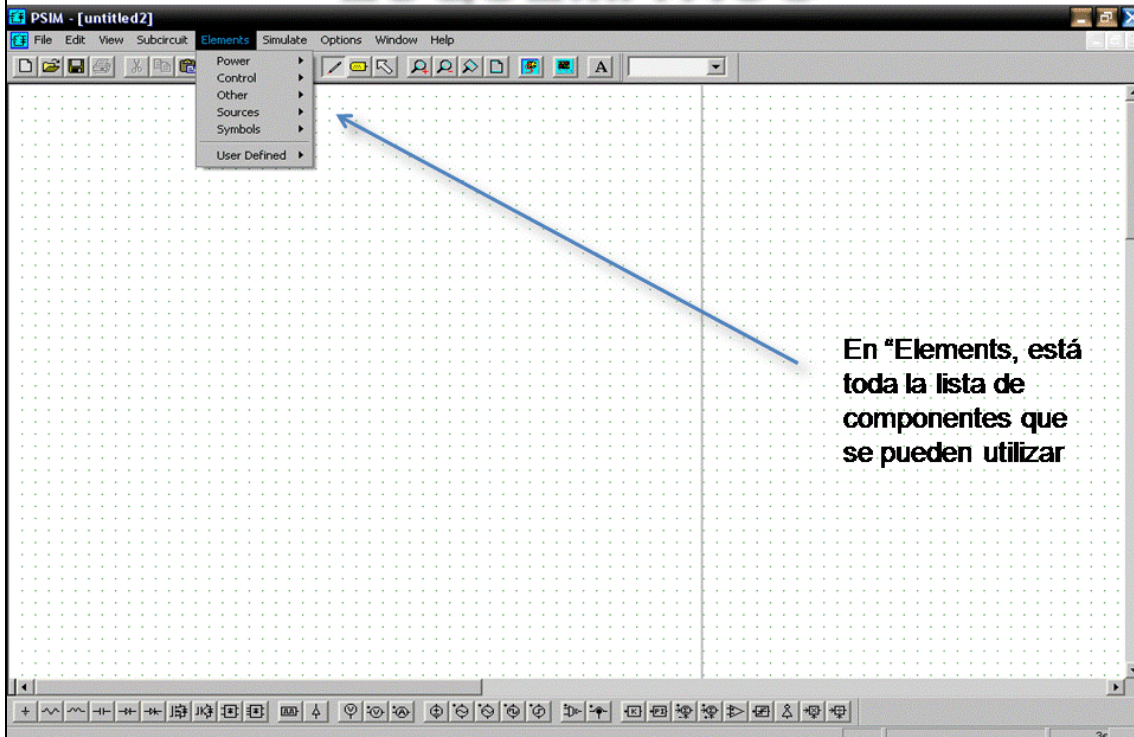
PSIM



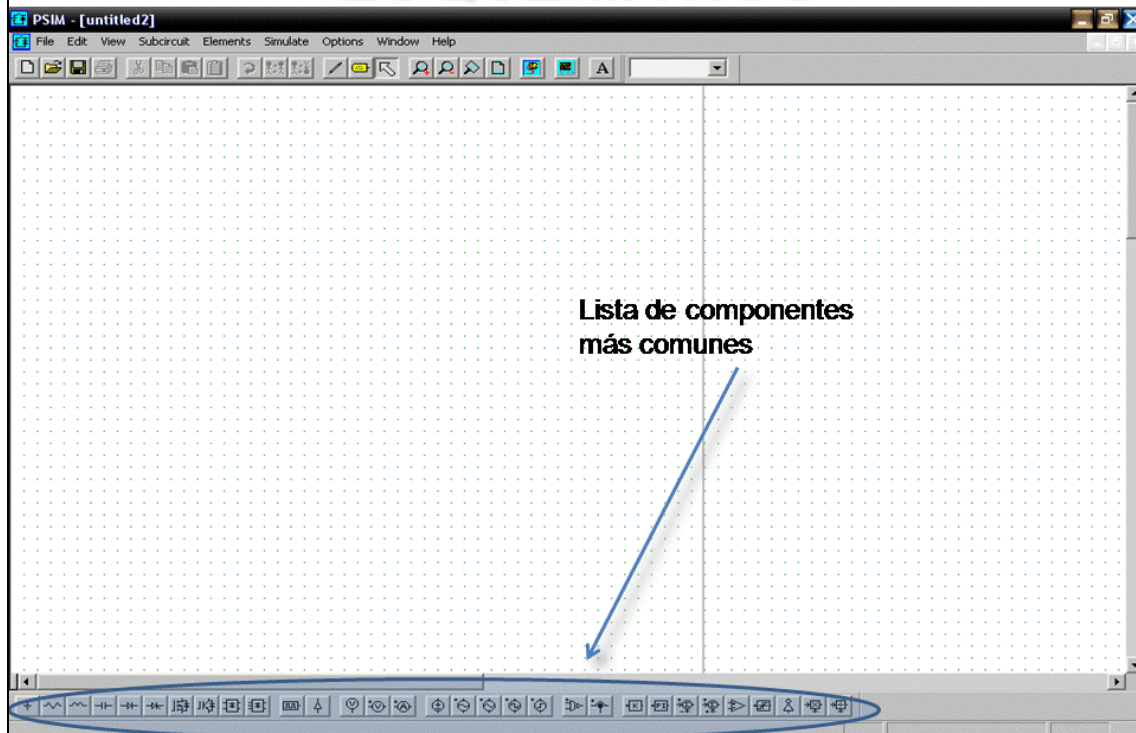
INICIO DE PROYECTO



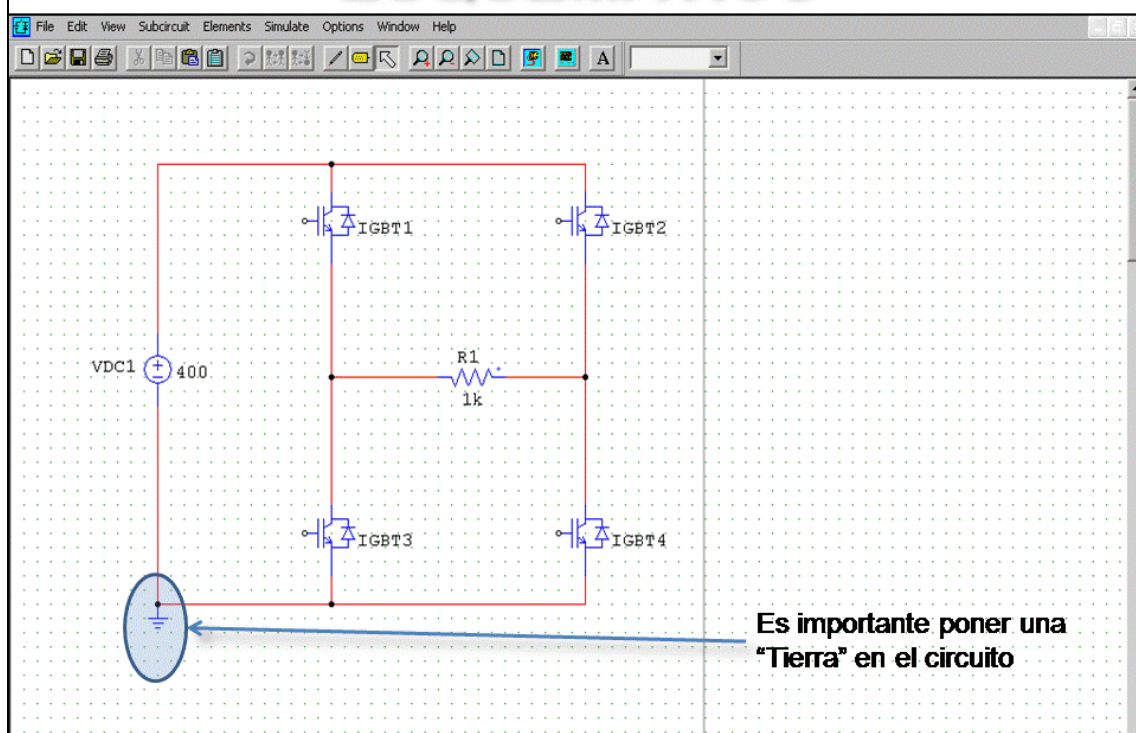
ESQUEMÁTICO



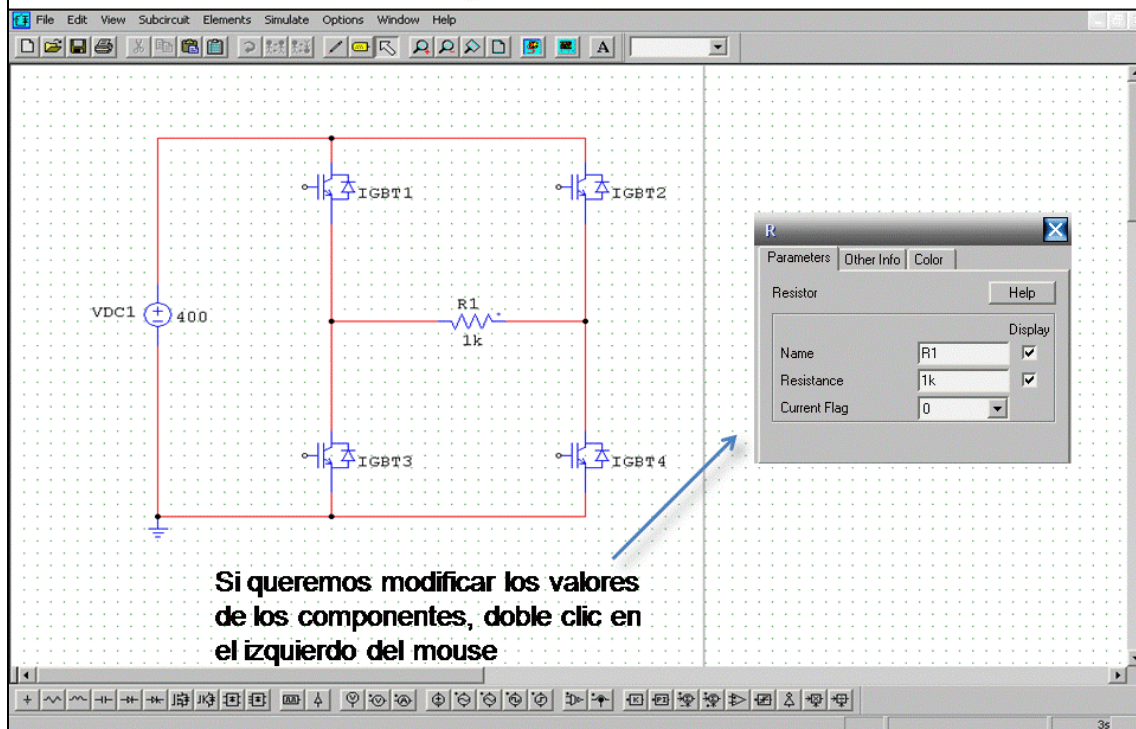
ESQUEMÁTICO



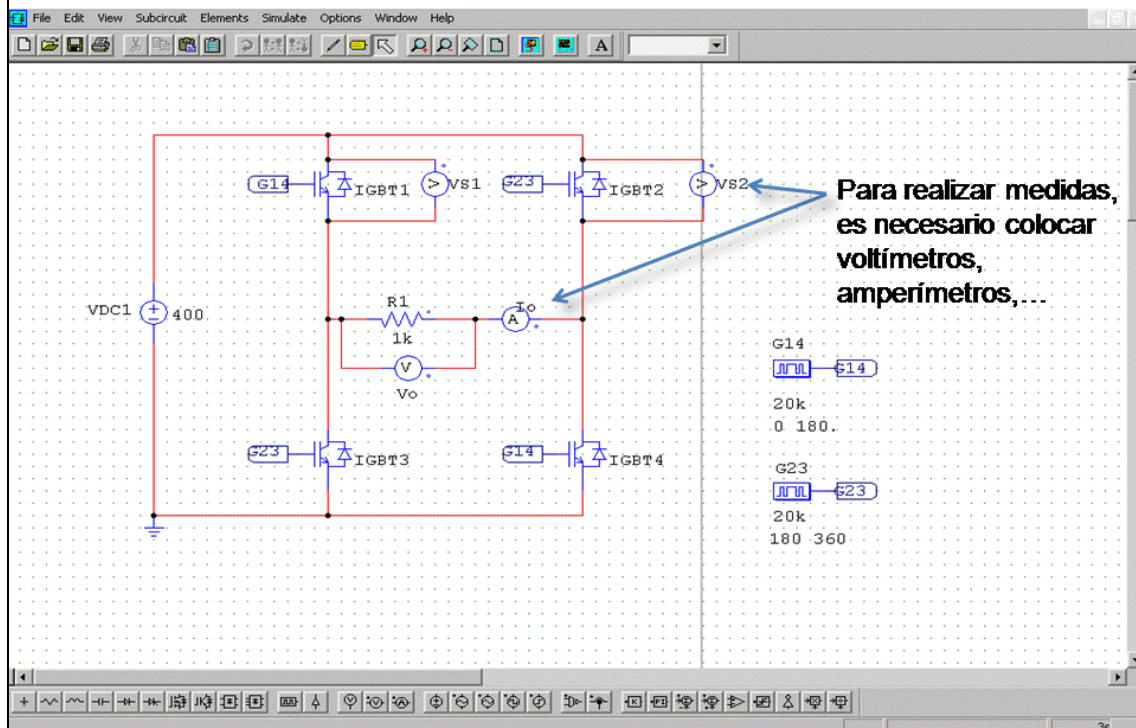
ESQUEMÁTICO



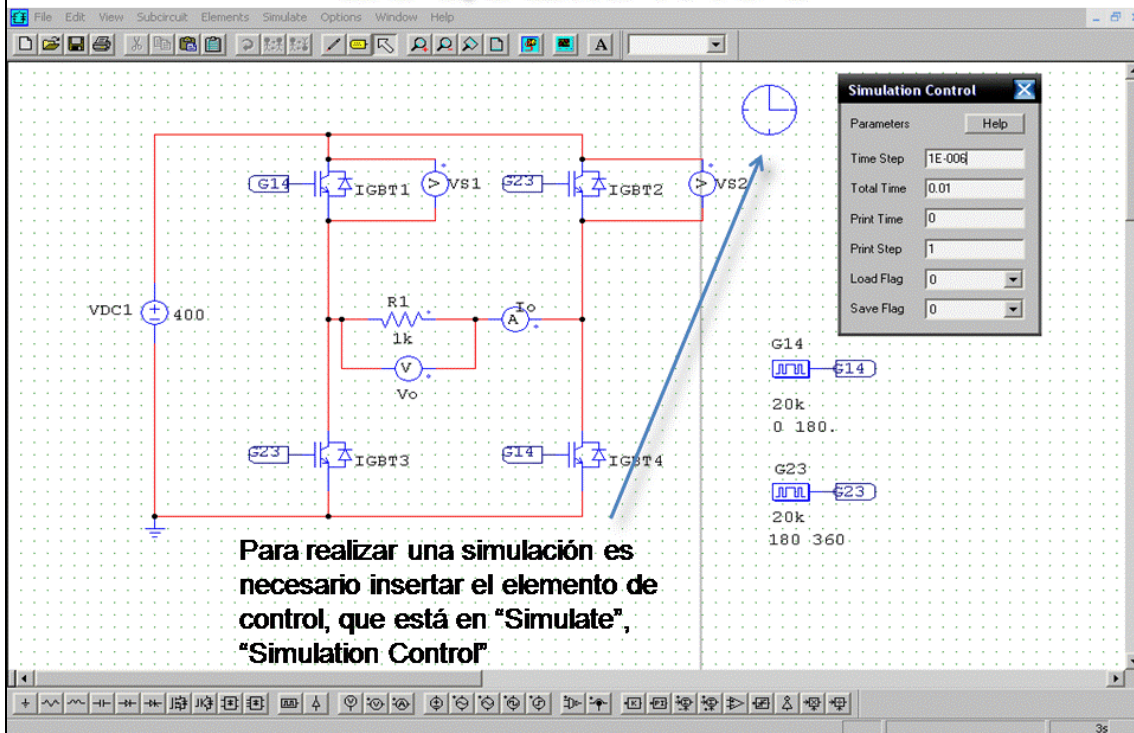
ESQUEMÁTICO



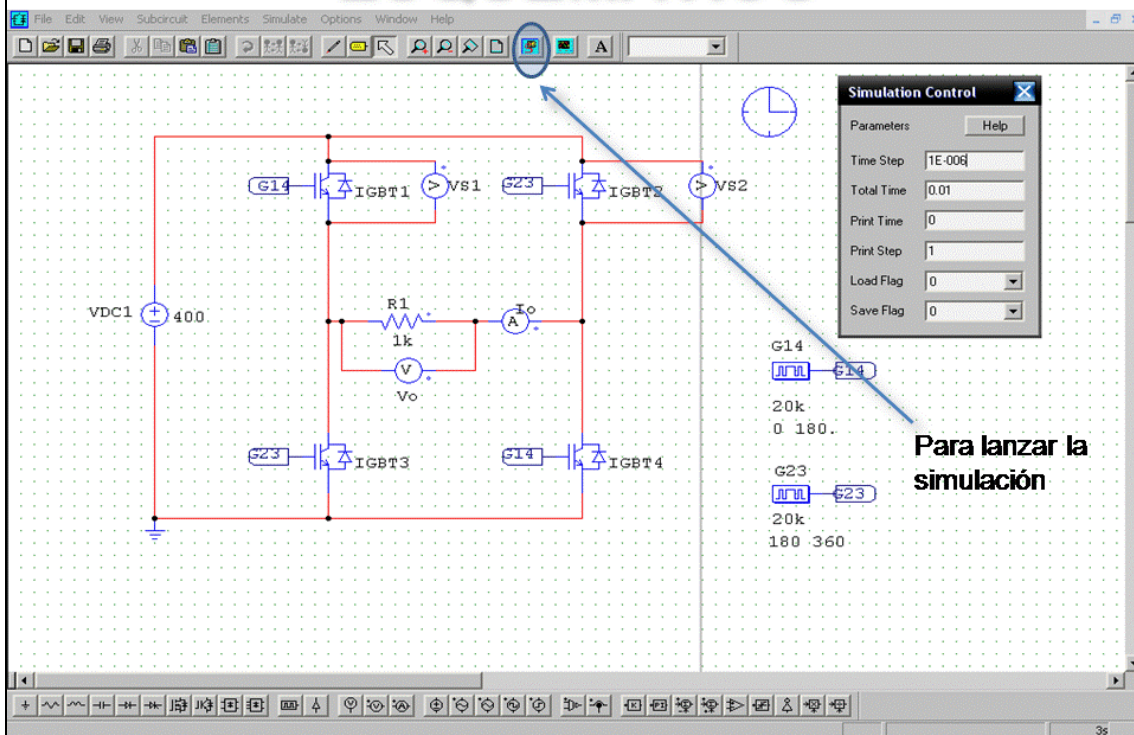
ESQUEMÁTICO



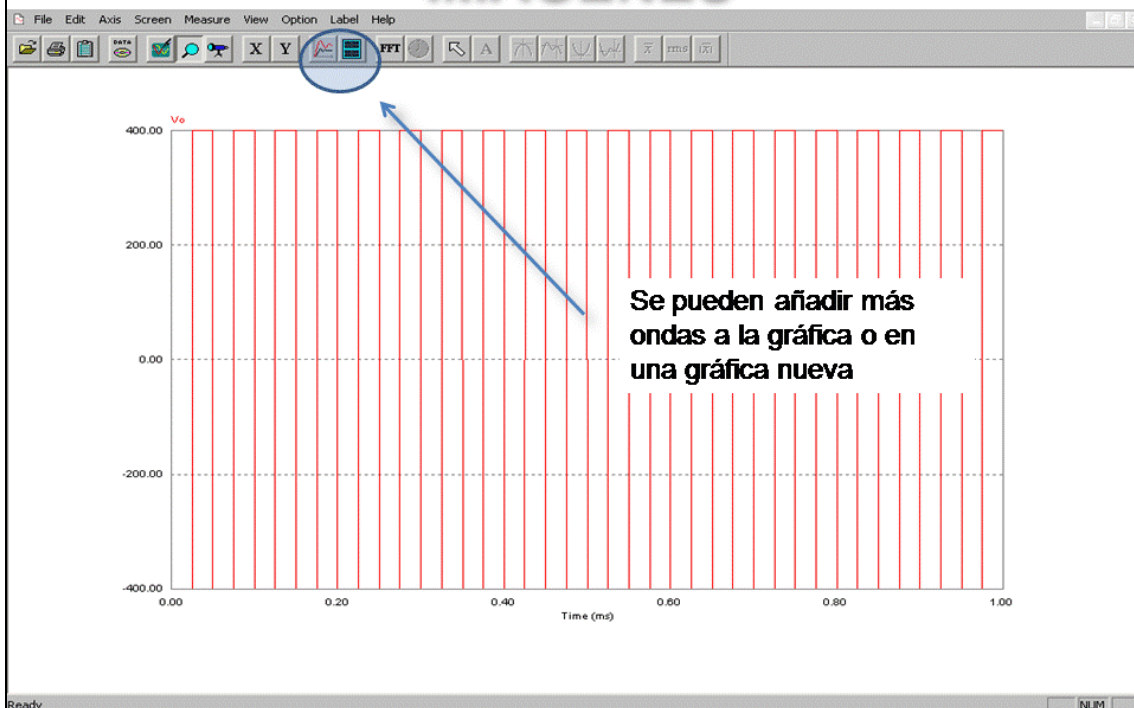
ESQUEMÁTICO



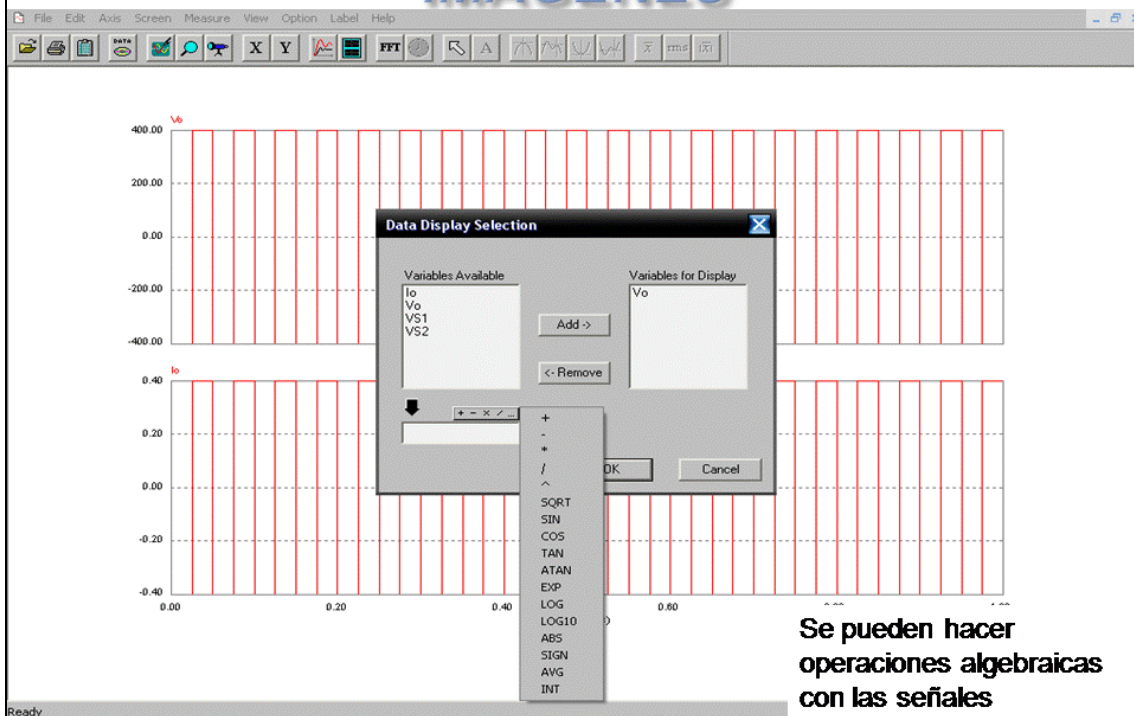
ESQUEMÁTICO



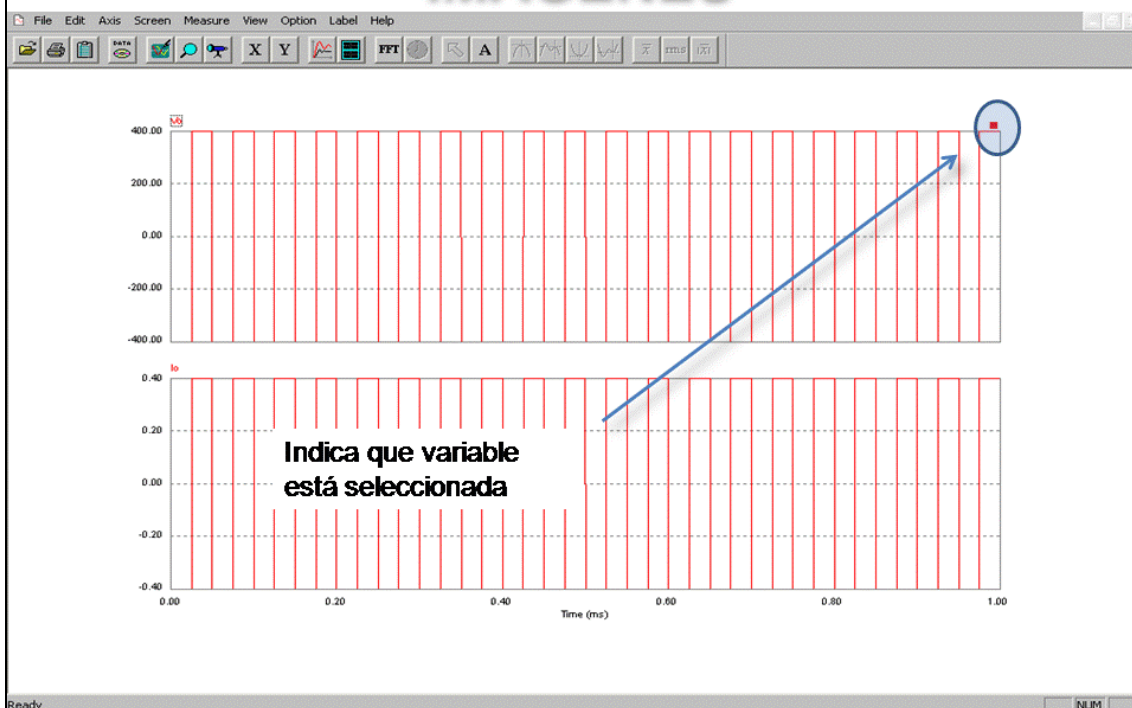
SIMVIEW: POST-PROCESADOR DE IMÁGENES



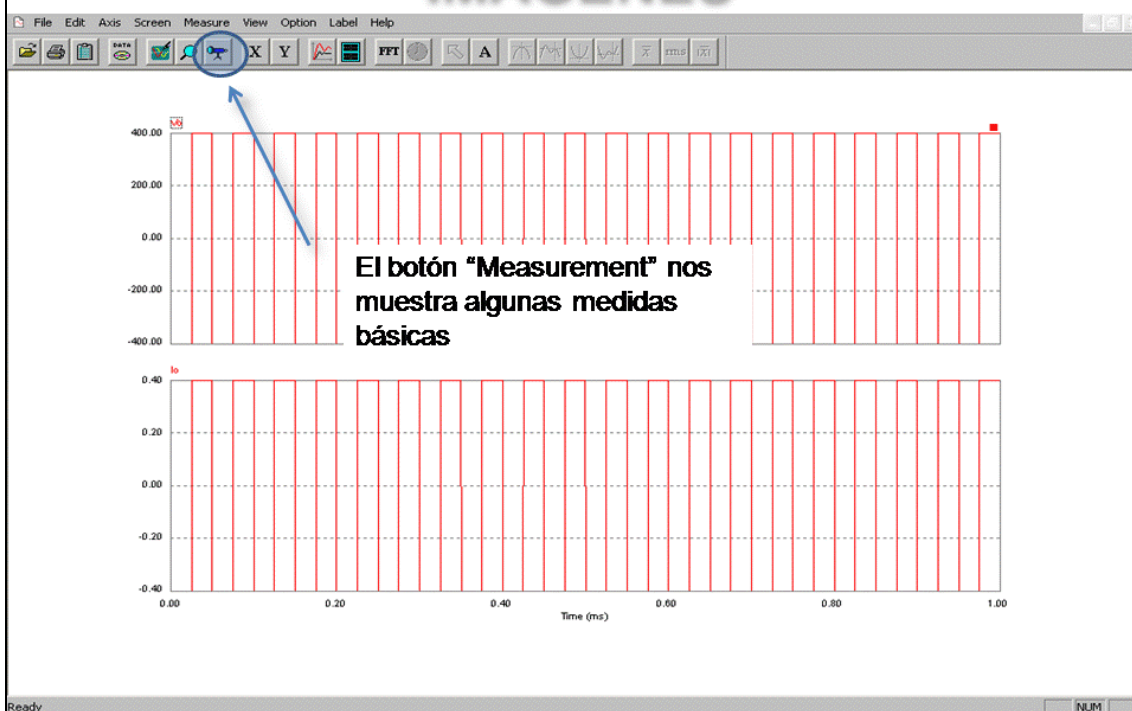
SIMVIEW: POST-PROCESADOR DE IMÁGENES



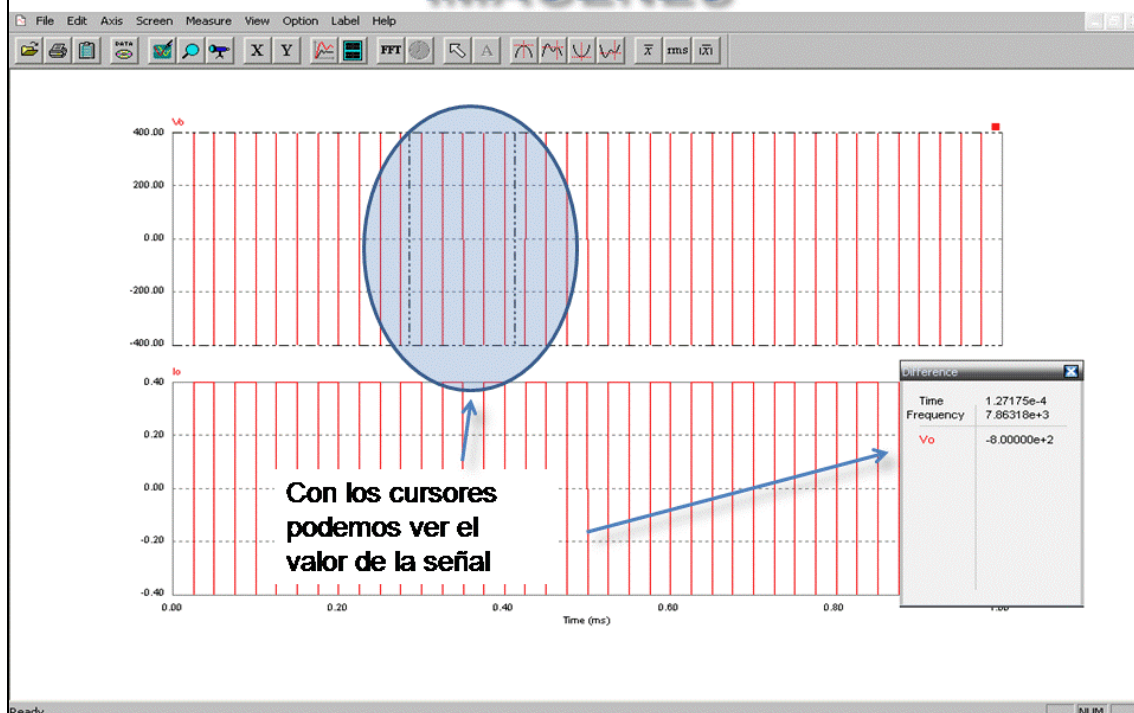
SIMVIEW: POST-PROCESADOR DE IMÁGENES



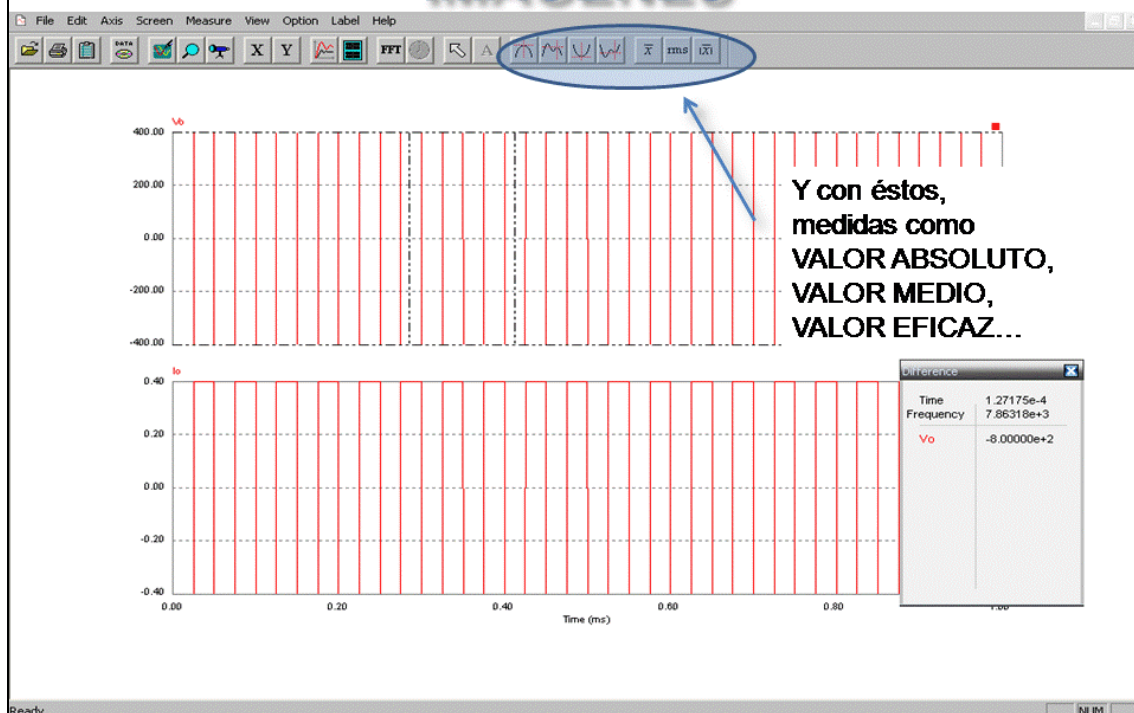
SIMVIEW: POST-PROCESADOR DE IMÁGENES



SIMVIEW: POST-PROCESADOR DE IMÁGENES



SIMVIEW: POST-PROCESADOR DE IMÁGENES



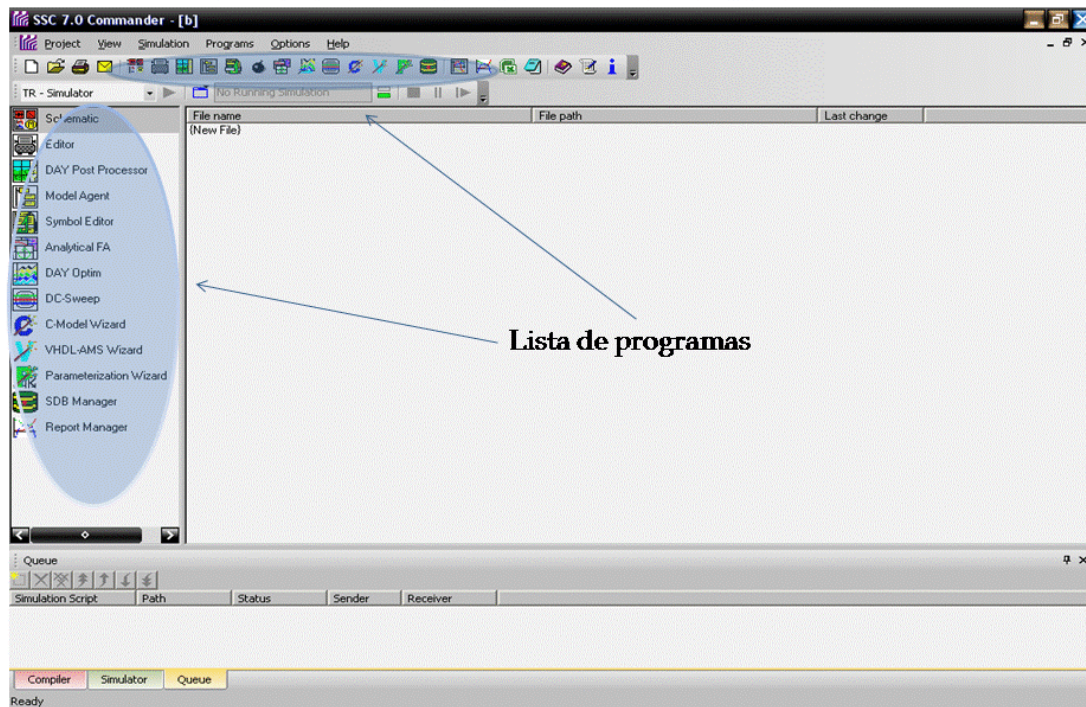
Manual 4.- SIMPLORER

MANUAL BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE SIMPLORER

SIMPLORER



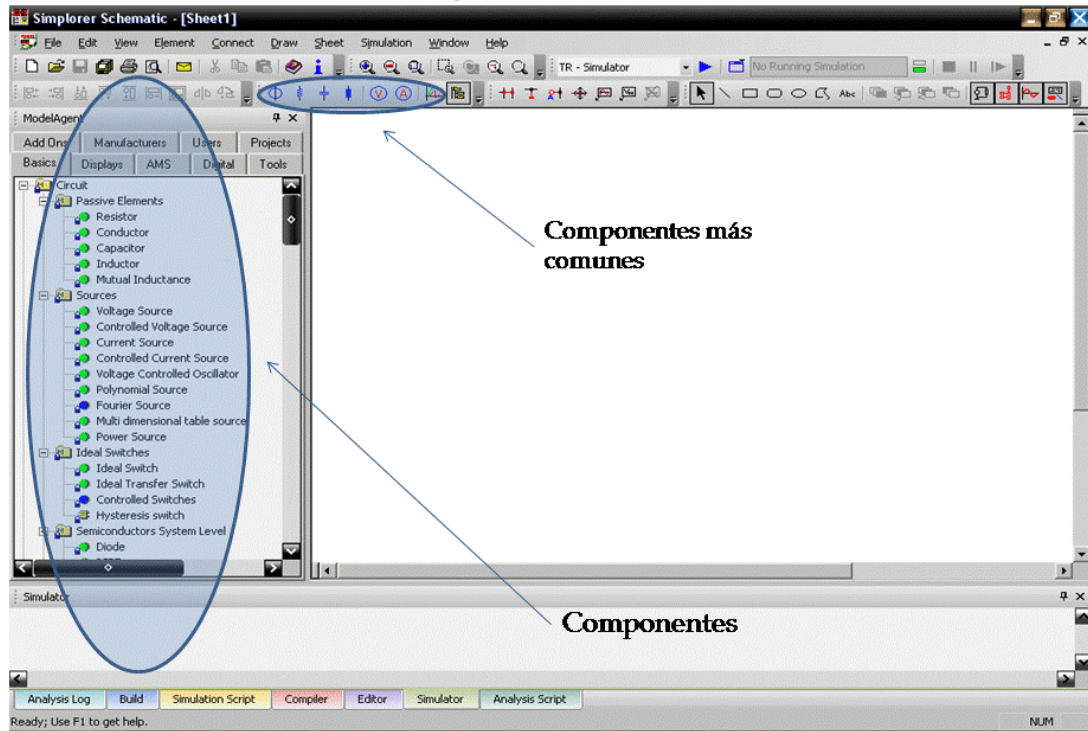
INICIO DE PROYECTO



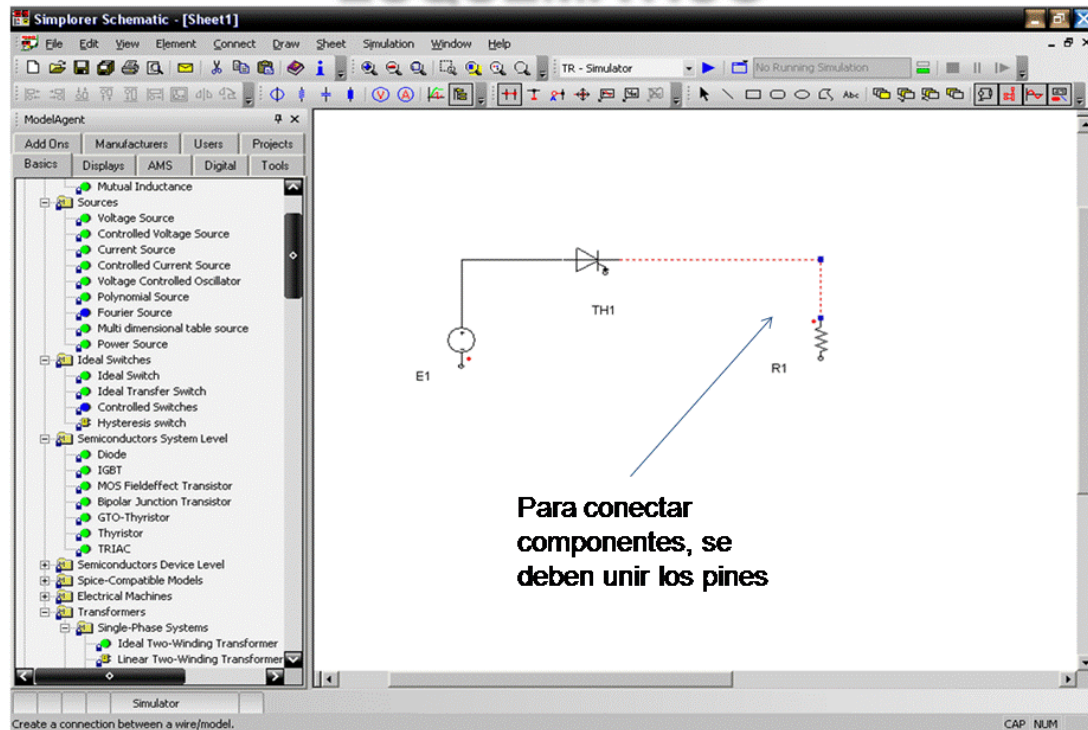
LISTA DE APLICACIONES

	Schematic <i>(esquema gráfico para crear modelos de simulación)</i>
	Editor <i>(editor de texto utilizado para crear modelos en lenguaje SIMPLORER)</i>
	DAY Post Processor <i>(post-procesador para analizar y procesar las simulaciones)</i>
	Model Agent <i>(gestiona las bibliotecas y macros)</i>
	Symbol Editor <i>(editor de símbolos utilizados en los esquemáticos)</i>
	Analytical FA <i>(análisis en frecuencia)</i>
	DAY Optim <i>(post-procesador que optimiza los resultados de las simulaciones)</i>
	DC Sweep <i>(herramienta utilizada para análisis en DC)</i>
	C-Model Wizard <i>(herramienta para ver la descripción del modelo en C)</i>
	VHDL-AMS Wizard <i>(herramienta para ver la descripción del modelo en VHDL)</i>
	Parameterization Wizard <i>(herramienta para ver los parámetros de los componentes)</i>
	SDB Manager <i>(muestra los resultados de la base de datos)</i>
	Report Manager <i>(almacena los informes de resultados)</i>

ESQUEMÁTICO



ESQUEMÁTICO



ESQUEMÁTICO

The screenshot shows the Simpler Schematic interface. On the left, a circuit diagram includes a voltage source E1, a pulse generator PULSE1, a diode TH1, and a resistor R1. A blue circle highlights the PULSE1 component. An arrow points from the text below to this circle. On the right, the 'Properties - PULSE1 - Pulse Wave' dialog is open, showing the 'Parameters' tab. The 'Name' field is set to 'PULSE1'. The 'Amplitude' is 0.326k, 'Frequency' is 50 Hz, 'Phase' is 0 deg, 'Period' is 20m s, 'Offset' is 0, 'Delay' is 0 s, and 'Periodical' is Yes. The 'Default Outputs' section has 'Pulse Wave' checked. The 'Graphic' section has a 'Show' button. At the bottom are 'Aceptar', 'Cancelar', 'Aplicar', and 'Ayuda' buttons.

Haciendo doble clic en un componente, modificamos sus parámetros

ESQUEMÁTICO

This screenshot shows the same circuit diagram as the previous one. The 'Properties - PULSE1 - Pulse Wave' dialog is open, but the 'Output / Display' tab is selected. This tab contains a table for configuring simulation outputs. The table has columns for 'Description', 'Name', 'Pin', 'Show', 'Nature', and 'Nature'. The following table represents the data in this tab:

Description	Name	Pin	Show	Nature	Nature
10 Value	VAL	✓	No display	✓	real
10 Derivative of Value	dVAL	✓	No display	✓	real
10 Frequency [Hz]	FREQ	✓	No display	✓	real
10 Period [s]	TPERIO	✓	No display	✓	real
10 Amplitude	AMPL	✓	No display	✓	real
10 Phase [deg]	PHASE	✓	No display	✓	real
10 Periodical	PERIO	✓	No display	✓	real
10 Offset	OFF	✓	No display	✓	real
10 Initial Delay [s]	TDELAY	✓	No display	✓	real

En la pestaña "Output/Display", podemos decidir que variables y nombres se mostrarán, así como que variables queremos que se simulen

SIMULACIÓN

The screenshot shows the Simpler Schematic interface with a circuit diagram. The circuit includes a pulse source (PULSE1), a diode (TH1), a resistor (R1), and two voltmeters (VM1, VM2). A blue circle highlights the 'Properties - R1 - Resistor' dialog box, specifically the 'Output / Display' tab. This tab contains a table with columns: Description, Name, Pin, Show, and a checkbox for 'I'. The table lists various parameters for the resistor, including Voltage [V], Current [A], Derivative of Voltage [V/s], Derivative of Current [A/s], Resistance [Ohm], and Node1/Node2. The 'Show' column has checkboxes for each parameter, and the 'I' column has checkboxes for current-related parameters.

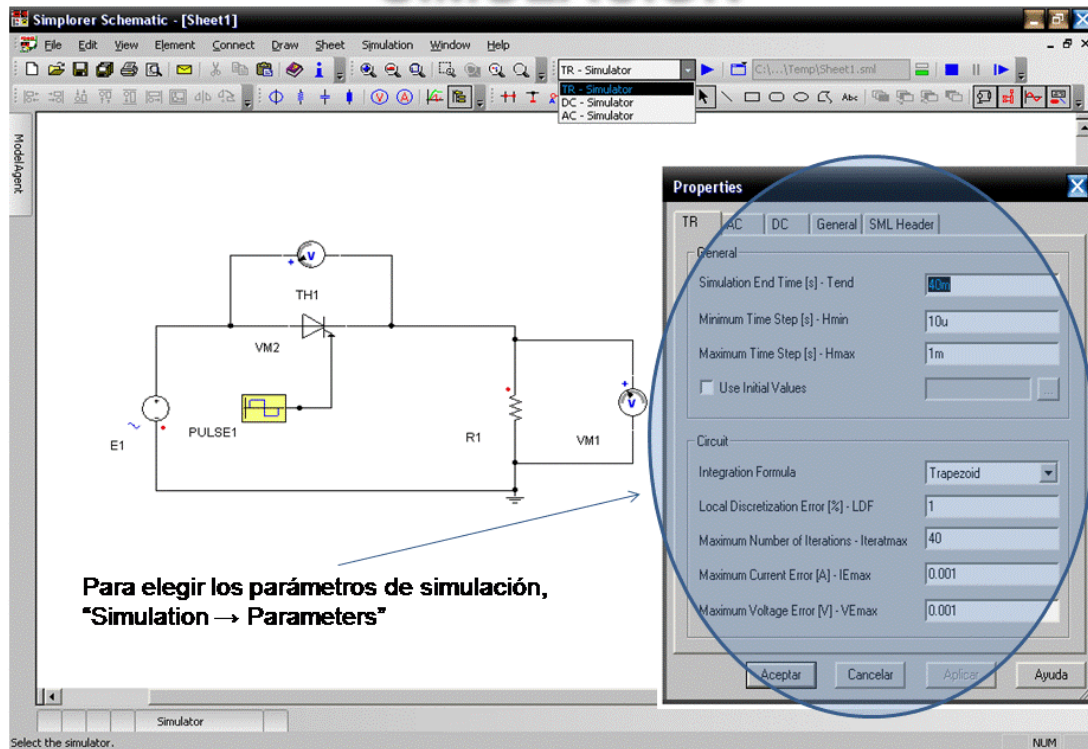
Para las medidas se pueden colocar elementos de medida, como voltímetros, aunque no es necesario ya que cada componente tiene la posibilidad de muestrear las señales por si solas

SIMULACIÓN

The screenshot shows the same circuit diagram as the previous one. A blue circle highlights the simulation type dropdown menu in the top toolbar. The dropdown menu is open, showing three options: 'TR - Simulator', 'DC - Simulator', and 'AC - Simulator'. The text 'Tipos de simulación' is written next to the dropdown menu.

Tipos de simulación

SIMULACIÓN

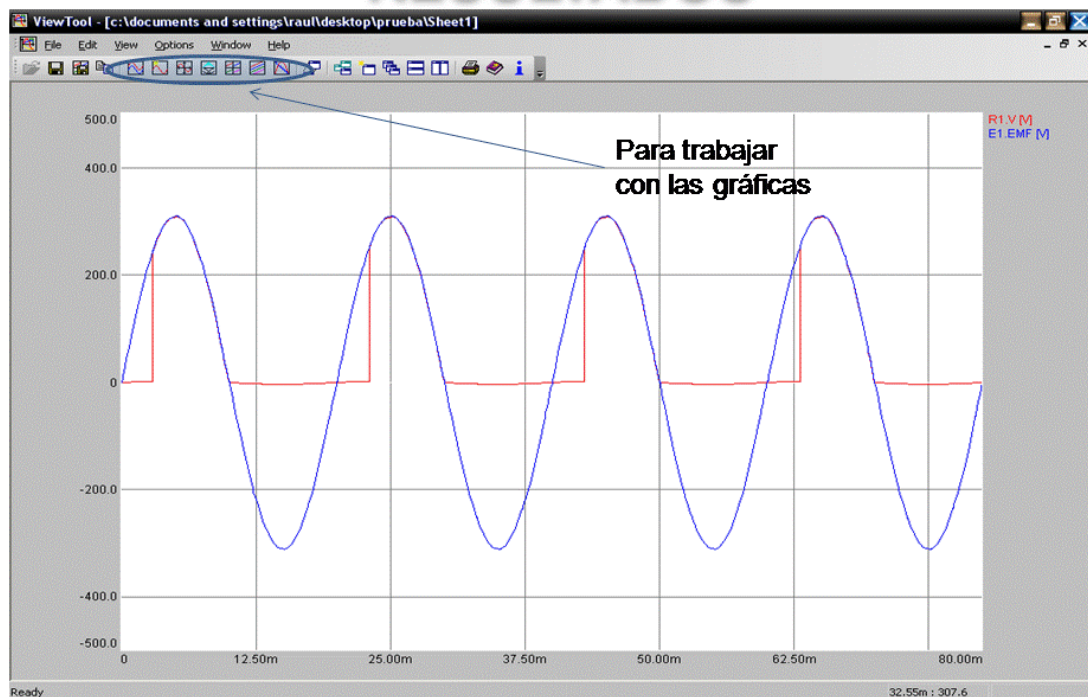


The screenshot shows the Simpler Schematic interface. The main window displays a circuit diagram with components: a pulse source E1, a diode TH1, a capacitor VM2, a resistor R1, and a voltmeter VM1. A blue circle highlights the 'Properties' dialog box, which is open to the 'General' tab. The dialog box contains the following settings:

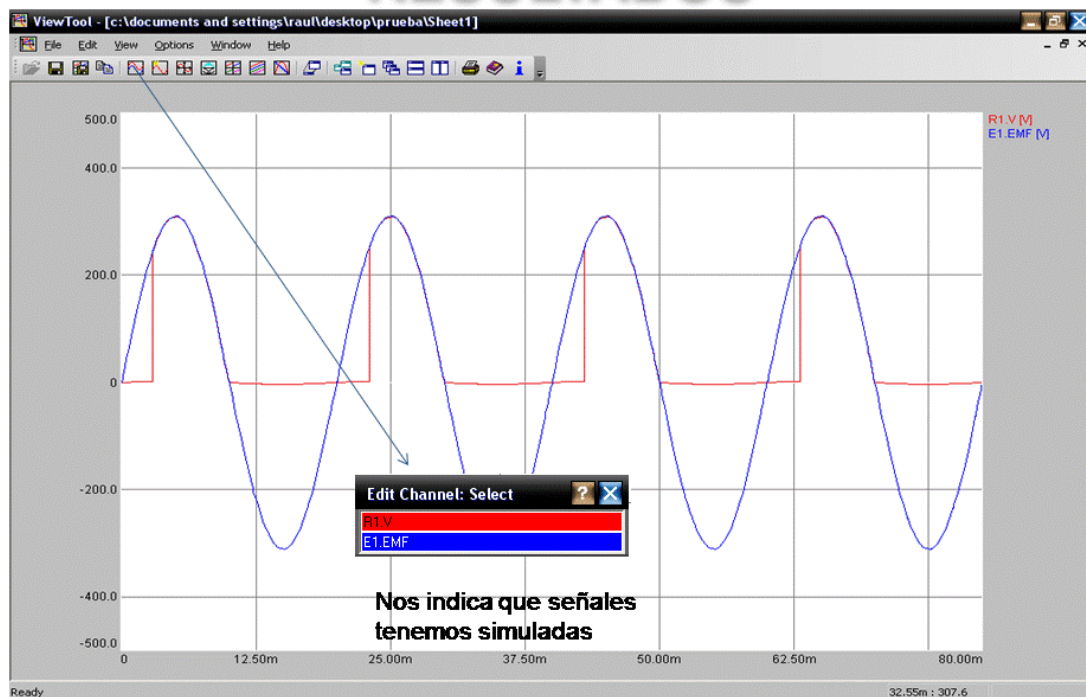
Parameter	Value
Simulation End Time [s] - Tend	40m
Minimum Time Step [s] - Hmin	10u
Maximum Time Step [s] - Hmax	1m
Use Initial Values	<input type="checkbox"/>
Integration Formula	Trapezoid
Local Discretization Error [%] - LDF	1
Maximum Number of Iterations - Iteratmax	40
Maximum Current Error [A] - IEmax	0.001
Maximum Voltage Error [V] - VEmax	0.001

Para elegir los parámetros de simulación, "Simulation → Parameters"

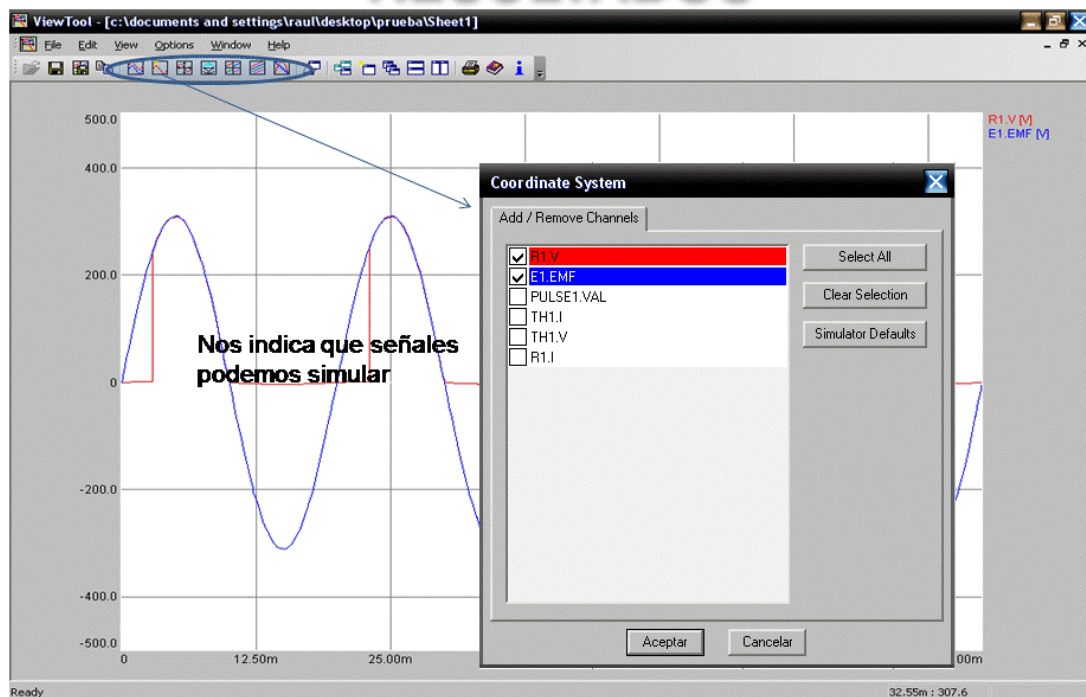
VIEWTOOL: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS



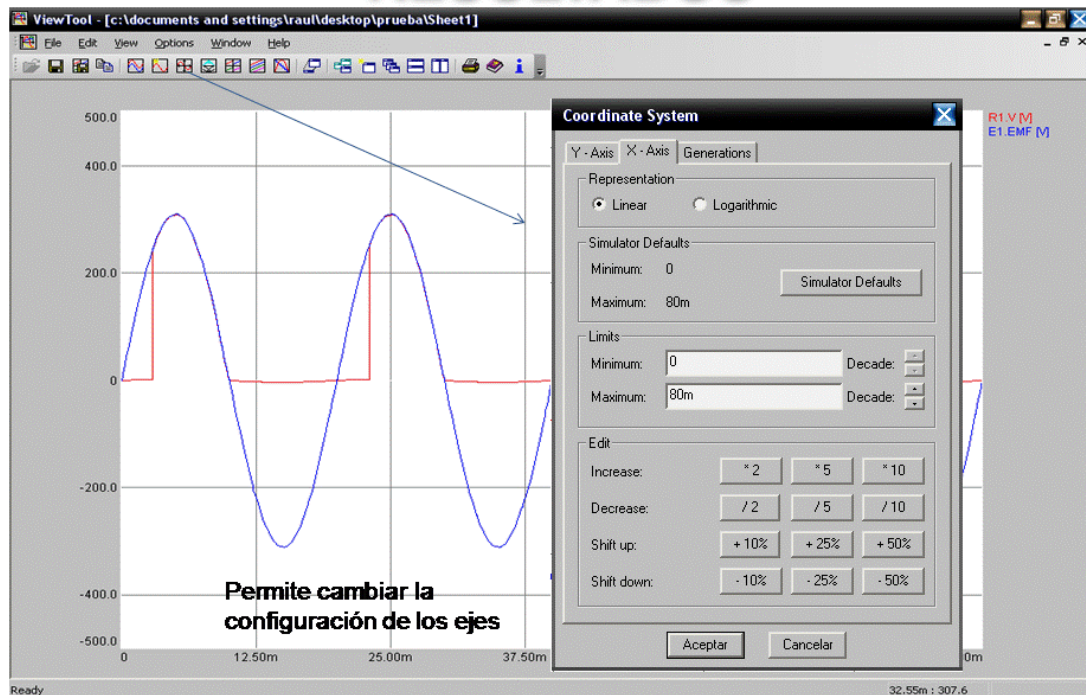
VIEWTOOL: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS



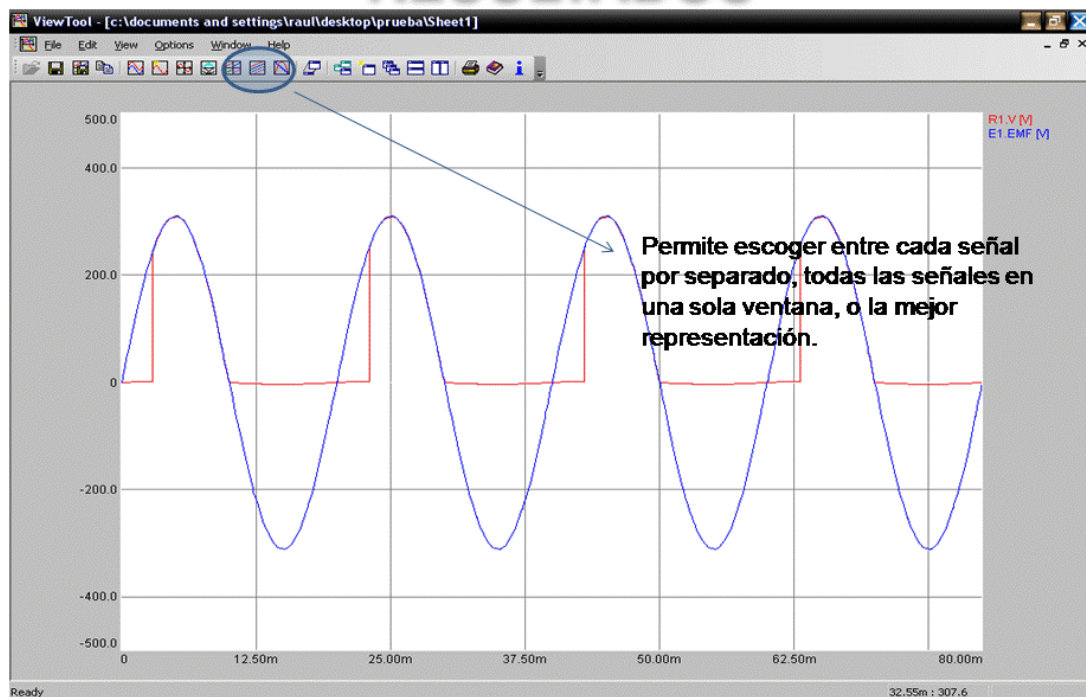
VIEWTOOL: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS



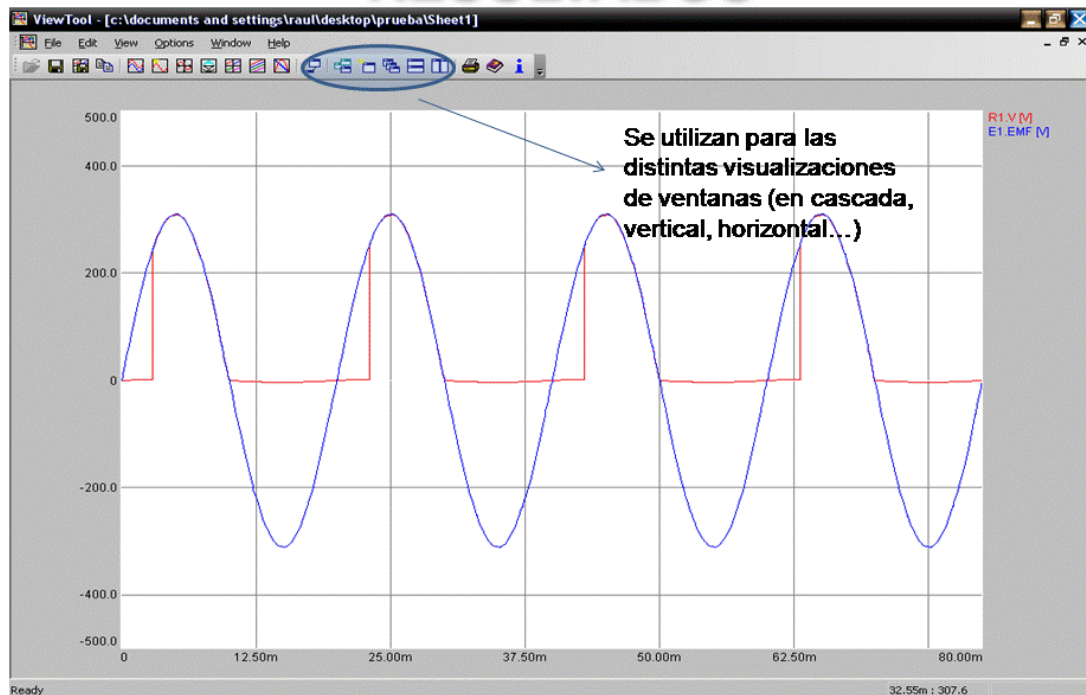
VIEWTOOL: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS



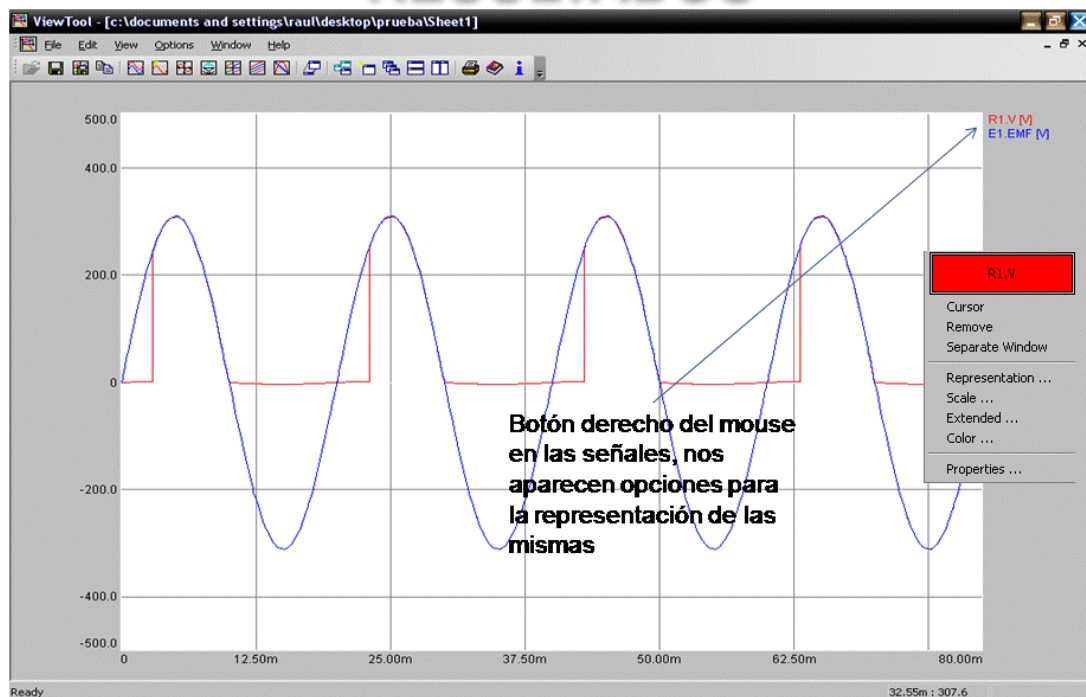
VIEWTOOL: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS



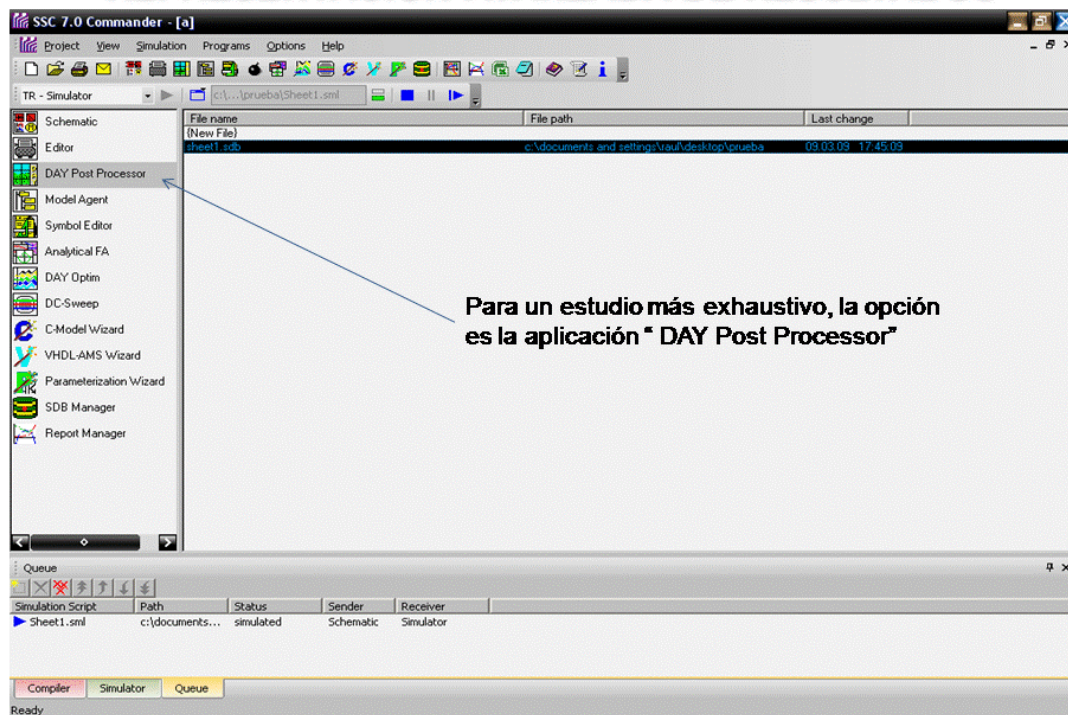
VIEWTOOL: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS



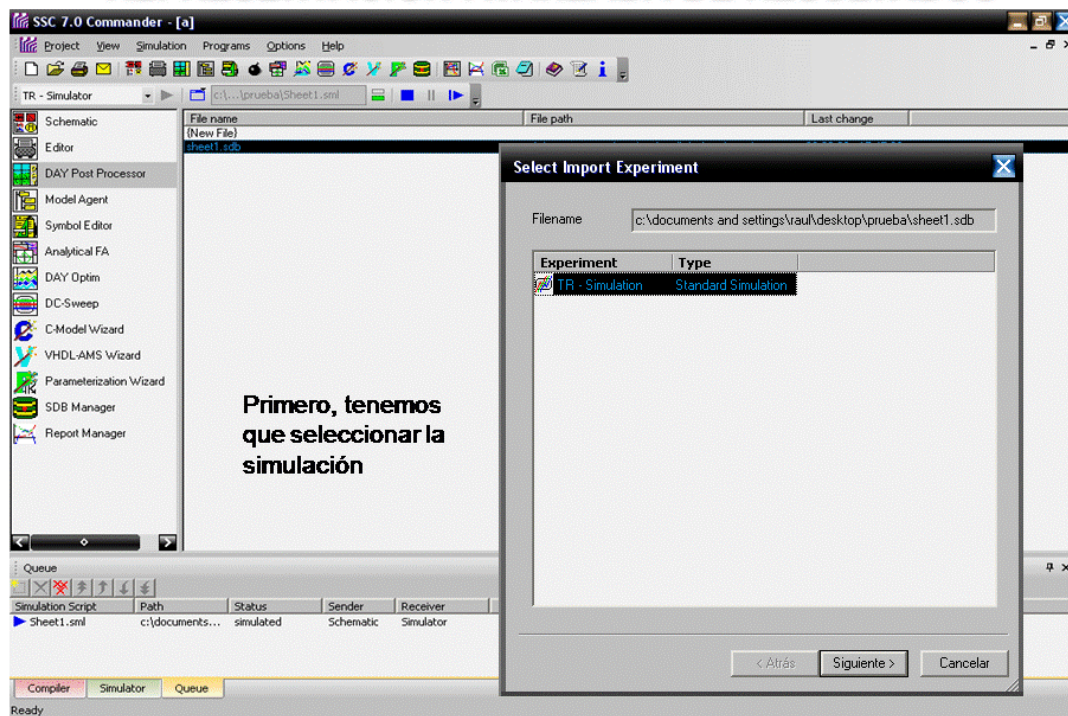
VIEWTOOL: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS



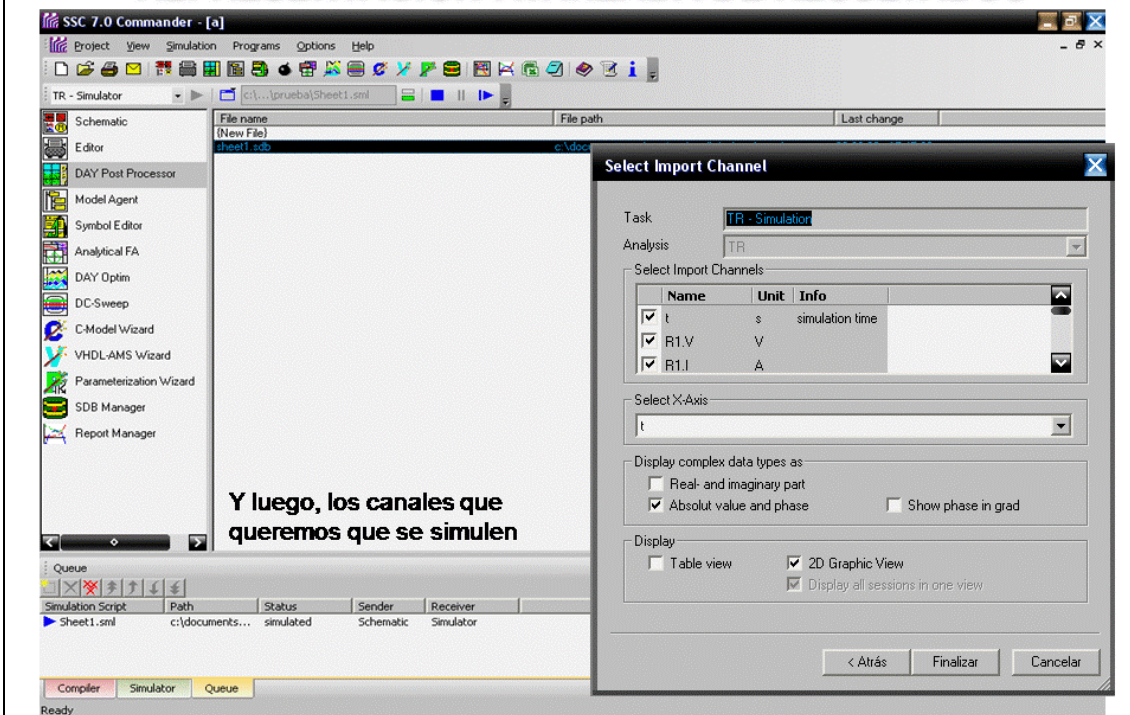
DAY POST PROCESSOR: REPRESENTACIÓN AVANZADA DE RESULTADOS



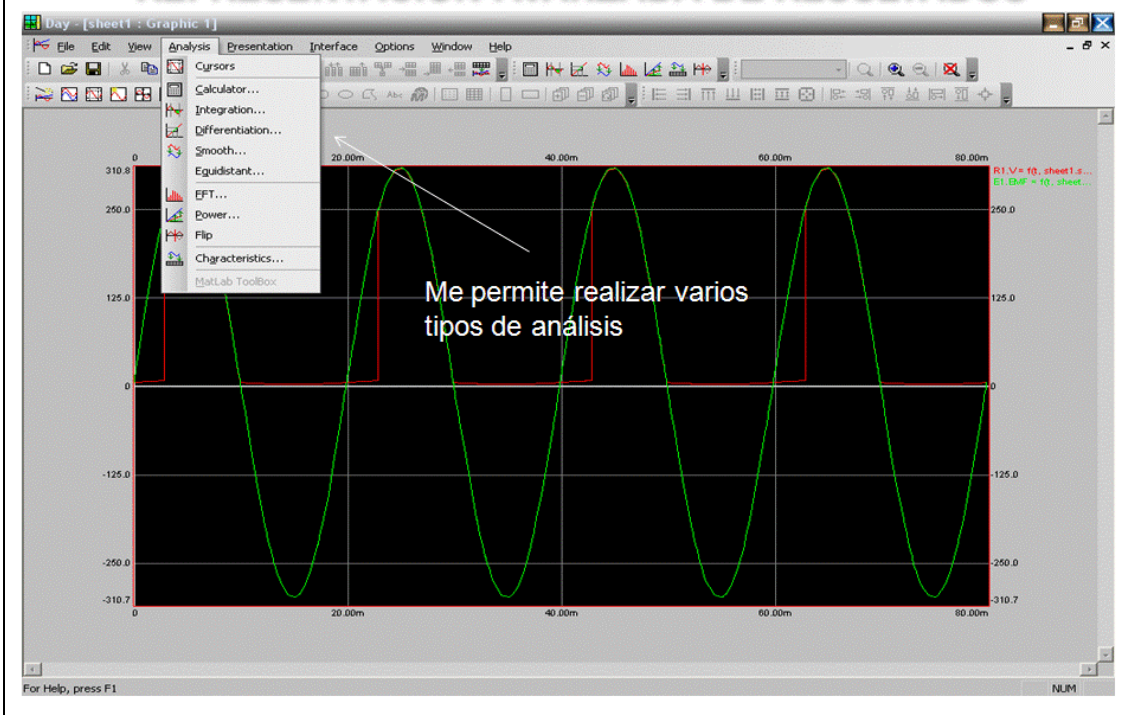
DAY POST PROCESSOR: REPRESENTACIÓN AVANZADA DE RESULTADOS



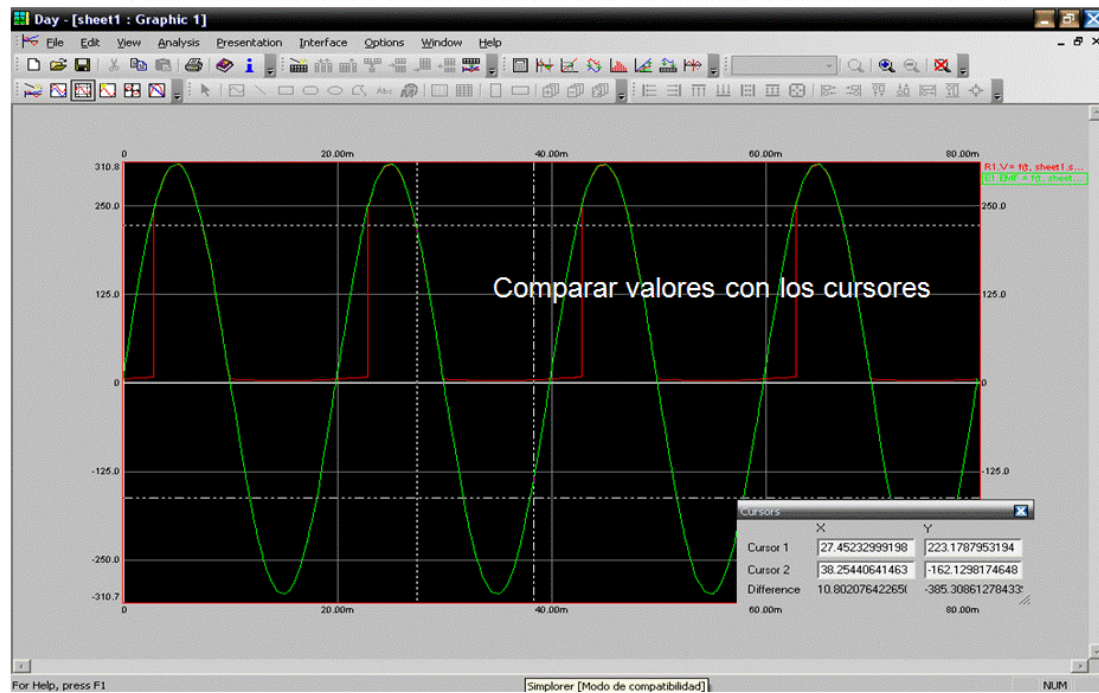
DAY POST PROCESSOR: REPRESENTACIÓN AVANZADA DE RESULTADOS



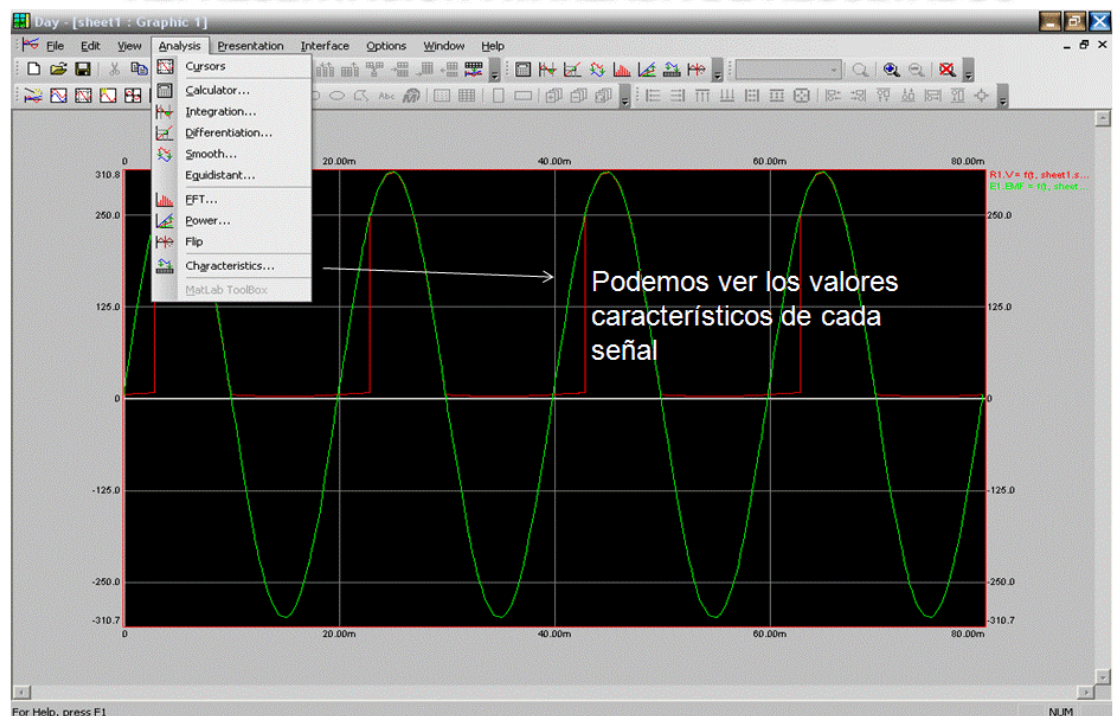
DAY POST PROCESSOR: REPRESENTACIÓN AVANZADA DE RESULTADOS



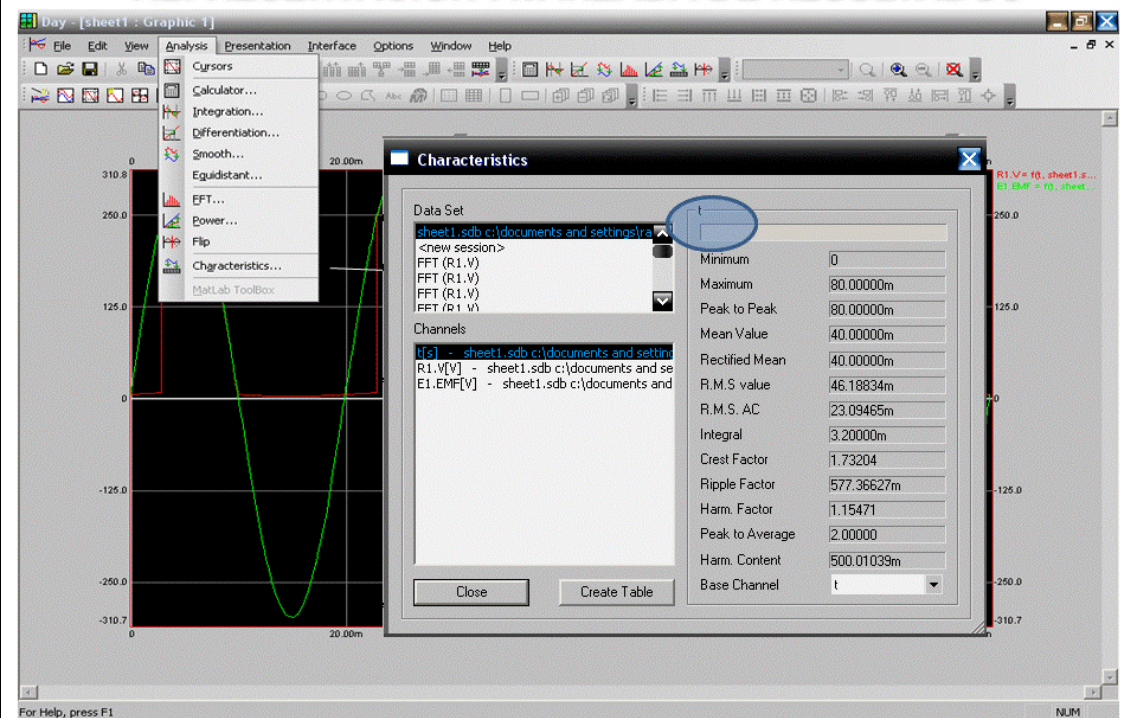
DAY POST PROCESSOR: REPRESENTACIÓN AVANZADA DE RESULTADOS



DAY POST PROCESSOR: REPRESENTACIÓN AVANZADA DE RESULTADOS



DAY POST PROCESSOR: REPRESENTACIÓN AVANZADA DE RESULTADOS



DAY POST PROCESSOR: REPRESENTACIÓN AVANZADA DE RESULTADOS

