

Universidad de Alcalá
Departamento de Electrónica
Escuela Politécnica Superior

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA



Trabajo Fin de Master

Análisis de las prestaciones de simuladores para estudio de pérdidas y modelado térmico de convertidores de potencia

Autor: Mihaela Ivanova Stoilkova

Director/es: Jesús Ureña Ureña

2021

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

MÁSTER EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA



Trabajo Fin de Máster

“ANÁLISIS DE LAS PRESTACIONES DE SIMULADORES PARA ESTUDIO
DE PÉRDIDAS Y MODELADO TÉRMICO DE CONVERTIDORES DE
POTENCIA”

Mihaela Ivanova Stoilkova

2021

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Electrónica

Máster Universitario en Ingeniería Electrónica

Trabajo Fin de Máster

**ANÁLISIS DE LAS PRESTACIONES DE SIMULADORES PARA
ESTUDIO DE PÉRDIDAS Y MODELADO TÉRMICO DE
CONVERTIDORES DE POTENCIA**

Autor: Mihaela Ivanova Stoilkova

Director/es: Jesús Ureña Ureña

Comisión Evaluadora:

Presidente: Javier Macías Guarasa

Vocal 1º: José M. Villadangos Carrizo

Vocal 2º: Francisco Huerta Sánchez

Fecha 20/07/2021

Me gustaría agradecer la oportunidad de realizar este Trabajo Fin de Máster a mi tutor Jesús Ureña, por darme la oportunidad de profundizar en un tema tan interesante como este. A mi madre, sin la cual no estaría aquí y, por último, a David y a mis amigas por apoyarme siempre.

Índice general

Índice de figuras	11
Índice de tablas	13
Resumen.....	15
Conceptos clave	15
Abstract	17
Key concepts	17
Resumen extendido	19
1. Introducción	21
1.1. Motivación	21
1.2. Objetivos	21
1.3. Estructura de la memoria.....	21
2. Conceptos teóricos.....	22
2.1. Comportamiento básico de un inversor.....	22
2.1.1. Funcionamiento	22
2.1.2. Cálculo de potencia del inversor	25
2.2. Pérdidas en semiconductores.....	27
2.2.1. Pérdidas por conducción.....	28
2.2.2. Pérdidas por conmutación	29
2.3. Análisis y modelados térmicos.....	31
2.3.1. Modelo Cauer.....	32
2.3.2. Modelo Foster	33
2.3.3. Disipador térmico.....	34
2.4. Software para simulación disponibles y sus prestaciones	36
2.4.1. PLECS	36
2.4.2. Matlab Simulink.....	40
2.4.3. SEMIS ABB	42
3. Simulaciones.....	45
3.1. PLECS	48
3.1.1. Variación del disipador térmico	52
3.1.2. Variación del índice de modulación de frecuencia	55
3.2. Matlab Simulink.....	57
3.2.1. Variando el disipador térmico.....	61
3.2.2. Variación de la frecuencia de conmutación	63
3.3. SEMIS de ABB	65
3.3.1. Variación del disipador térmico	66

3.3.2.	Variando la frecuencia de conmutación	69
3.4.	Variación de la carga del inversor	71
3.5.	Comparativa de paquetes de simulación	74
3.5.1.	Facilidad de configuración.....	74
3.5.2.	Resultados	75
3.5.3.	Tiempo que tarda en simular	76
4.	Conclusiones generales y trabajos futuros	78
4.1.	Conclusiones generales.....	78
4.2.	Trabajos futuros	79
5.	Presupuesto	80
	Bibliografía	81
6.	Anexos.....	83
	Anexo I: Manual de usuario	83
	Anexo II: Ficha técnica del módulo de IGBT+Diodo	87

Índice de figuras

Figura 2.1 Inversor trifásico [1]	22
Figura 2.2 Modulación SPWM [1]	23
Figura 2.3 Zona de funcionamiento [1]	24
Figura 2.4 Localización de los armónicos [1]	24
Figura 2.5 Formas de onda de la tensión con modulación DPWM [1]	25
Figura 2.6 Forma de onda de la tensión de fase en zona de modulación lineal [1]	25
Figura 2.7 Circuito básico de conmutación [1]	27
Figura 2.8 Formas de onda en conmutación y potencias instantáneas disipadas [1]	27
Figura 2.9 Relación de la temperatura con la caída de tensión del IGBT [4]	28
Figura 2.10 Relación de la temperatura con la tensión forward del diodo [4]	28
Figura 2.11 Formas de onda de tensión y corriente en el encendido del IGBT [1]	29
Figura 2.12 Recuperación inversa del diodo	30
Figura 2.13 Circuito equivalente estático [6]	31
Figura 2.14 Sistema térmico simple [6]	32
Figura 2.15 Modelo equivalente eléctrico [6]	32
Figura 2.16 Red RC tipo Cauer [8]	32
Figura 2.17 Curva de impedancia térmica, Z_{th} , según modelo Cauer [8]	33
Figura 2.18 Red RC tipo Foster [8]	33
Figura 2.19 Conexión en serie modelo Foster [9]	34
Figura 2.20 Optimización para varios flujos de aire convección forzada y natural [10]	34
Figura 2.21 Resistencia térmica vs tasa de flujo [11]	35
Figura 2.22 Interfaz de usuario PLECS	36
Figura 2.23 Configuración de pérdidas de un semiconductor en PLECS	37
Figura 2.24 Modelado térmico de un semiconductor en PLECS	38
Figura 2.25 Librería térmica PLECS	39
Figura 2.26 Concepto de disipador térmico en PLECS [13]	40
Figura 2.27 Interfaz de usuario Simulink, librería Simscape	40
Figura 2.28 Modelado térmico de un semiconductor en Simulink	41
Figura 2.29 Sección transversal de IGBT HiPak de ABB [15]	42
Figura 2.30 Campo de aplicaciones disponibles para distintas simulaciones con SEMIS	43
Figura 2.31 Interfaz de usuario para simulación de un inversor trifásico [17]	44
Figura 3.1 Características estado de ON del IGBT	45
Figura 3.2 Energías de conmutación típicas por pulso frente a corriente de colector	46
Figura 3.3 Características típicas de recuperación inversa frente a corriente directa	46
Figura 3.4 Características típicas de forward del diodo	47
Figura 3.5 Impedancia térmica transitoria	47
Figura 3.6 Resistencia térmica y constantes de tiempo	48
Figura 3.7 Circuito inversor en PLECS	48
Figura 3.8 Circuito térmico en PLECS	49
Figura 3.9 Pérdidas del IGBT y diodo en onda cuadrada en PLECS	49
Figura 3.10 Tensión de salida (V) y corriente de salida (A) en PLECS	50
Figura 3.11 Modulación SPWM en PLECS	50
Figura 3.12 Cálculo de parámetros de salida en PLECS	51
Figura 3.13 Parámetros térmicos y de pérdidas obtenidos, simulación base, en PLECS	51
Figura 3.14 Régimen permanente de la simulación base en PLECS	52
Figura 3.15 Circuito inversor en Simulink	57

Figura 3.16 Circuito térmico en Simulink	57
Figura 3.17 Pérdidas del IGBT y diodo en onda cuadrada en Simulink.....	58
Figura 3.18 Modulación DPWM en Simulink	58
Figura 3.19 Señales moduladoras DPWM en Simulink	59
Figura 3.20 Formas de onda de la temperatura y pérdidas, modulación DPWM, en Simulink..	59
Figura 3.21 Formas de onda de tensión y corriente de salida del inversor	60
Figura 3.22 Modulación PWM en Simulink.....	60
Figura 3.23 Resultados de simulación en régimen transitorio, simulación base, en Simulink ...	61
Figura 3.24 Resultados en régimen permanente, simulación base, en Simulink	61
Figura 3.25 Resultados de simulación, simulación base, en SEMIS	65
Figura 3.26 Resistencia térmica y longitud del disipador [19]	72
Figura 3.27 Disipador térmico de ABL 180AB1500B [20].....	72
Figura 3.28 Resultados de la variación de carga en PLECS.....	73
Figura 3.29 Resultados de la variación de carga en Simulink	73
Figura 3.30 Comparativa de los resultados de Simulink, PLECS y SEMIS	74
Figura 3.31 Configuración de parámetros PELCS.....	75
Figura 3.32 Configuración de parámetros Simulink.....	75
Figura 3.33 Configuración del análisis en régimen permanente PLECS.....	77
Figura 6.1 Interfaz de Matlab, script con datos base.....	83
Figura 6.2 Simulación de inversor trifásico en Simulink.....	85
Figura 6.3 Carpeta de simulaciones PLECS.....	86
Figura 6.4 Configuración térmica de los semiconductores.....	86
Figura 6.5 HiPak 5SNA 1600N170100 [4].....	87
Figura 6.6 Características del IGBT [4]	88
Figura 6.7 Características del diodo [4].....	88
Figura 6.8 Características térmicas [4].....	89

Índice de tablas

Tabla 2.1 Parámetros de la conmutación de semiconductores [1]	28
Tabla 2.2 Equivalencia circuito térmico y circuito eléctrico.....	31
Tabla 3.1 Parámetros base para la simulación.....	45
Tabla 3.2 Resultados variación Rth con PLECS.....	54
Tabla 3.3 Resultados variación fs con PLECS.....	56
Tabla 3.4 Resultados variación Rth con Simulink.....	63
Tabla 3.5 Resultados variación fs con Simulink.....	64
Tabla 3.6 Resultados variación Rth con SEMIS ABB	69
Tabla 3.7 Resultados variación fs con SEMIS ABB.....	71
Tabla 3.8 Resumen de los resultados de temperatura obtenidos variando Rth	75
Tabla 3.9 Resumen de los resultados de temperatura obtenidos variando fs	76
Tabla 5.1 Costes de material hardware	80
Tabla 5.2 Costes de material software [22], [23]	80
Tabla 5.3 Costes de personal.....	80
Tabla 5.4 Costes de ejecución totales	80
Tabla 6.1 Simulaciones realizadas en Matlab	85
Tabla 6.2 Simulaciones realizadas en PLECS	86

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo la simulación y comparativa de modelado térmico de dispositivos de potencia empleando distintas herramientas informáticas como Simulink, PLECS y el software online propio del fabricante ABB.

El trabajo se estructura a partir de distintas simulaciones, variando una serie de parámetros que alteran el comportamiento de un inversor trifásico, analizando los datos obtenidos de pérdidas y temperatura de los semiconductores que forman el convertidor. Por último, se realiza una comparativa entre las distintas prestaciones que ofrecen los distintos paquetes de software utilizados.

Conceptos clave

Inversor trifásico, modelado y simulación térmicos, semiconductores de potencia

Abstract

This project deals with the simulation and comparative of the thermal modelling using different software tools such as Simulink, PLECS and the ABB manufacturer's own online software.

The work is structured from different simulations, varying a series of parameters that alter the behavior of a three-phase inverter, analyzing the data obtained on losses and temperature evolution of the power semiconductors that make up the circuit. Finally, a comparison is made between the features offered by the different software tools used.

Key concepts

Three-phase inverter, thermal modelling and simulation, power semiconductors

Resumen extendido

Los componentes semiconductores de potencia cada vez se fabrican más pequeños y con mayor densidad de potencia, además de funcionar a frecuencias de conmutación también más altas. Esto hace que el estudio térmico del componente y sistema de refrigeración asociado sea de capital importancia para garantizar que la temperatura interna no supere el valor máximo permitido. Por ello cobra importancia el análisis previo, en simulación, de los convertidores, para poder realizar un estudio completo del sistema antes de la implementación en hardware. Este proyecto se centrará en este análisis térmico enfocado en una aplicación de inversor trifásico.

La primera parte de este trabajo sirve de introducción a los conceptos clave de los que tratará el proyecto, realizando un estudio teórico básico del funcionamiento del inversor trifásico, así como de las distintas modulaciones que se emplearán posteriormente en el trabajo. También se verá la parte teórica correspondiente a los modelados térmicos disponibles, analizando los disipadores térmicos y sus correspondientes valores de resistencia térmica.

Se emplean tres softwares para la realización de este trabajo, el primero, PLECS, se centra en la simulación de convertidores de potencia, el segundo, Simulink, tiene una variedad de aplicaciones muy amplia, aunque en este trabajo se utilizará una librería enfocada a la electrónica de potencia y, por último, SEMIS es un software propio del fabricante de semiconductores de ABB, el cual posee limitaciones de aplicaciones.

En la primera parte del trabajo se realizan algunas simulaciones para visualizar las pérdidas y comportamiento del circuito frente a distintas situaciones, como una modulación distinta a la SPWM, utilizada en la mayor parte del trabajo, y la zona lineal de funcionamiento. En esta parte se podrá comprobar que los niveles de pérdidas son menores en función de las distintas configuraciones del sistema. Se fijan unos parámetros base, de los cuales algunos se varían posteriormente para poder realizar un análisis completo del sistema y de la temperatura de los semiconductores en régimen permanente, variando la resistencia térmica del disipador empleado y la frecuencia de conmutación del sistema.

Después se realizará una simulación fijando un disipador térmico comercial, con el objetivo de determinar la potencia máxima que sería capaz de entregar el inversor en unas condiciones determinadas. En esta simulación se podrán comparar las diferencias entre PLECS, Simulink y SEMIS a la hora de hacer dicho estudio.

Por último, se realizará una comparativa comparando las prestaciones que posee cada programa utilizado. Se confrontarán las características de cada software, teniendo en cuenta la facilidad de configuración, el tiempo de simulación, así como las aplicaciones que ofrece cada uno.

1. Introducción

En este capítulo se expone brevemente el contenido del presente Trabajo Fin de Máster (TFM), además de la motivación y objetivos propuestos para la realización del proyecto. Por último, se reflejará la estructura de la memoria.

1.1. Motivación

Durante el desarrollo del Máster, en la asignatura de Electrónica de Potencia Avanzada, se ha realizado un proyecto relacionado con la simulación térmica y estudio de pérdidas en Simulink, trabajando únicamente con el circuito equivalente térmico del convertidor. De ese trabajo ha surgido el interés por las prestaciones que ofrecen distintos paquetes software que permiten al usuario elaborar una simulación completa y detallada del funcionamiento térmico de un convertidor de potencia. Este tema es crítico a la hora de implementar un circuito de potencia, puesto que se necesita un análisis previo para poder determinar las condiciones en las que trabajará el sistema, evaluando los posibles riesgos de temperaturas altas de los componentes, por tanto, el riesgo de ruptura de los distintos elementos.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es realizar una comparativa entre distintas herramientas informáticas disponibles para simulación de convertidores de potencia, enfocando el trabajo en un caso práctico, como es el inversor trifásico. Se enumeran a continuación una serie de objetivos parciales a cumplir a lo largo del trabajo:

- Estudio teórico de los inversores, así como de los modelos térmicos de convertidores y disipadores térmicos.
- Selección de un módulo comercial de semiconductores, así como un modelo práctico para simular.
- Configuración de características térmicas del circuito elegido en PLECS, Simulink y aplicación de fabricante (ABB) a partir de los datos proporcionados por el fabricante de los dispositivos elegidos.
- Simulaciones variando distintos parámetros del sistema.
- Realización de la comparativa entre las distintas funcionalidades de cada software, destacando los puntos fuertes de cada uno.

1.3. Estructura de la memoria

La memoria constará de cuatro capítulos, este primero con una breve introducción de la motivación para la realización del proyecto y sus objetivos, el segundo capítulo recogerá la parte teórica necesaria para abordar el proyecto, el tercero tratará de la parte práctica del trabajo, incluyendo las simulaciones realizadas; y, por último, se incluirá un capítulo final que resume los aspectos más destacados del trabajo realizado, así como posibles trabajos futuros y mejoras a este proyecto.

2. Conceptos teóricos

En este capítulo se incluyen aquellos aspectos teóricos más importantes a conocer previo a la realización de la selección de componentes y simulaciones requeridas posteriormente en este TFM.

2.1. Comportamiento básico de un inversor

Para el análisis térmico de un inversor trifásico se requiere conocer las tensiones y corrientes instantáneas por los dispositivos de potencia que lo componen. El inversor podrá transmitir potencia en modo bidireccional, aunque en este trabajo se considerará, preferentemente, la transferencia de potencia del lado DC al lado AC, la carga. En este apartado se detallará el funcionamiento del inversor para obtener dichas corrientes y tensiones.

2.1.1. Funcionamiento

El inversor trifásico a considerar presenta la topología mostrada en la Figura 2.1. Cada una de las tres ramas está formada por dos IGBTs y diodos en antiparalelo.

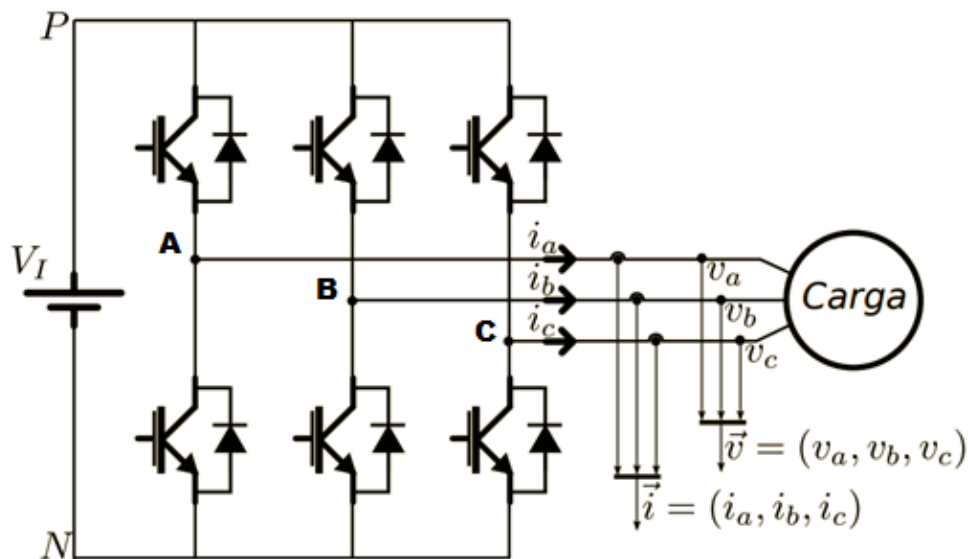


Figura 2.1 Inversor trifásico [1]

En modulación SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*), la cual será la modulación que se empleará en la mayor parte de este trabajo, las aperturas y cierres de los IGBTs de cada rama se controlan a través de dos señales, moduladora (señal sinusoidal) y portadora (señal triangular), de acuerdo con la siguiente gráfica:

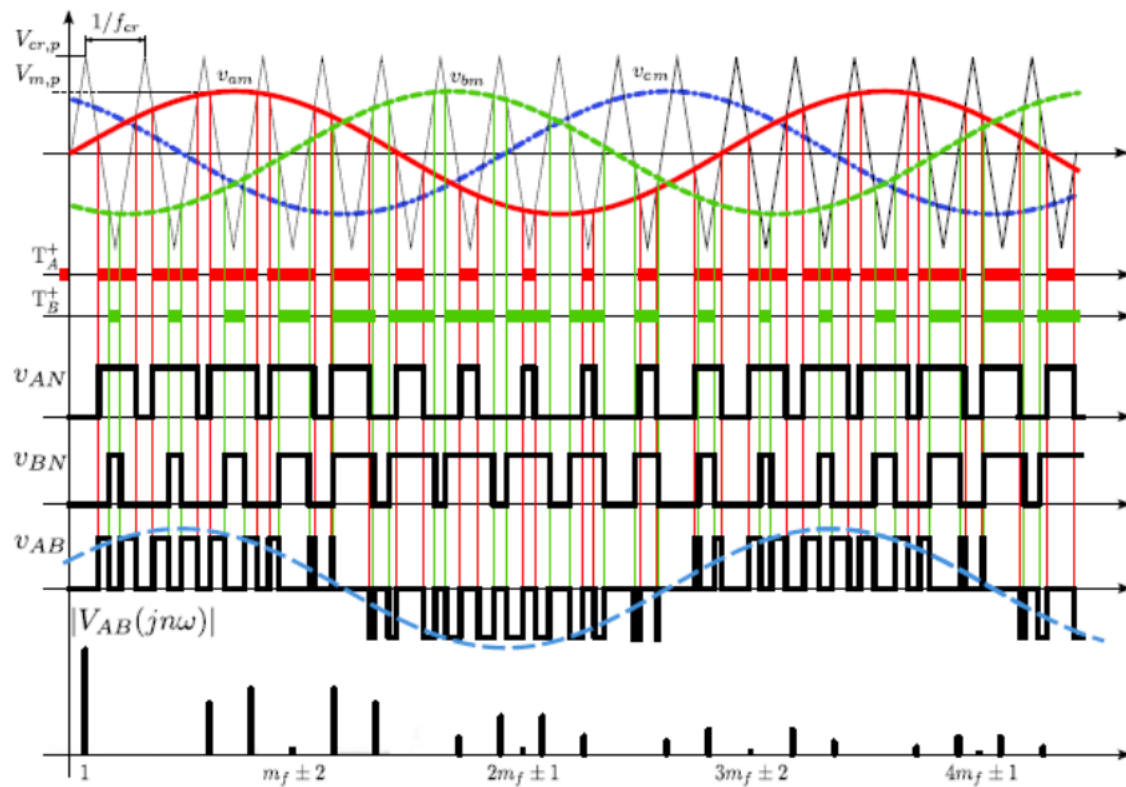


Figura 2.2 Modulación SPWM [1]

En primer lugar, se observan las señales modificadoras de cada rama, y también la señal portadora. El cociente entre la amplitud de la señal modificadoras ($V_{m,p}$) y la señal portadora ($V_{cr,p}$) se conoce como índice de modulación de amplitud, m_a .

$$m_a = \frac{V_{m,p}}{V_{cr,p}} \quad (1)$$

La frecuencia de las señales modificadoras es la frecuencia fundamental, que se va a considerar en este trabajo de 50 Hz, puesto que la carga podrá ser una red trifásica a dicha frecuencia, mientras que la frecuencia de la señal triangular es la de conmutación. El cociente entre la frecuencia de conmutación (f_{sw}) y la frecuencia fundamental (f_1) representa el índice de modulación de frecuencia, m_f .

$$m_f = \frac{f_{sw}}{f_1} \quad (2)$$

En función de estas señales se generan las señales de control TA^+ , TB^+ y TC^+ las cuales se implementan en el inversor y, a partir de las cuales, se generan las tensiones a la salida del mismo.

En función del valor de m_a se puede trabajar en zona lineal ($m_a \leq 1$), sobremodulación ($m_a > 1$) u onda cuadrada (m_a elevadas), como se puede observar en la Figura 2.2. Si se trabaja en zona lineal la tensión de salida se calcula de la siguiente manera:

$$V_{AN,1} = m_a \cdot \frac{V_I}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad (3)$$

$$V_{AB,1} = m_a \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot V_I}{2 \cdot \sqrt{2}} \tag{4}$$

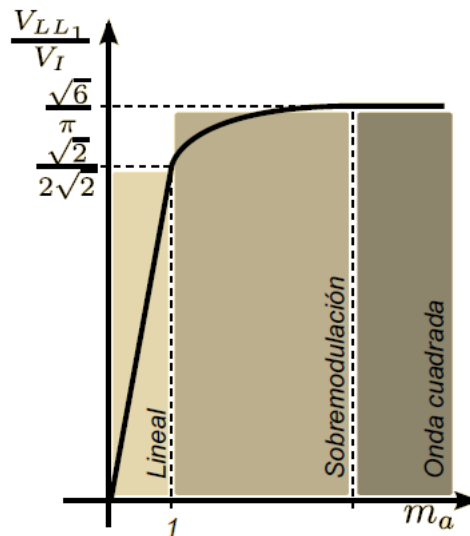


Figura 2.3 Zona de funcionamiento [1]

El contenido armónico de la tensión de línea a la salida del inversor se localiza alrededor de los múltiplos de m_f , de acuerdo con la Figura 2.3.

$h \backslash m_a$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1	0.122	0.245	0.367	0.490	0.612
$m_f \pm 2$	0.010	0.037	0.080	0.135	0.195
$m_f \pm 4$				0.005	0.011
$2m_f \pm 1$	0.116	0.200	0.227	0.192	0.111
$2m_f \pm 5$				0.008	0.020
$3m_f \pm 2$	0.027	0.085	0.124	0.108	0.038
$3m_f \pm 4$		0.007	0.029	0.064	0.096
$4m_f \pm 1$	0.100	0.096	0.005	0.064	0.042
$4m_f \pm 5$			0.021	0.051	0.073
$4m_f \pm 7$				0.010	0.030

Note: $(V_{LL})_h/V_d$ are tabulated as a function of m_a where $(V_{LL})_h$ are the rms values of the harmonic voltages.

Figura 2.4 Localización de los armónicos [1]

Se realizará una simulación empleando una modulación distinta a la SPWM, empleando un tipo de modulación discontinua (*Discontinuous Pulse Width Modulation - DPWM*). Esta técnica minimiza las pérdidas por conmutación, puesto que la señal no conmuta durante 1/3 del periodo de conmutación. Las formas de onda esperadas tienen el aspecto dado en la Figura 2.5.

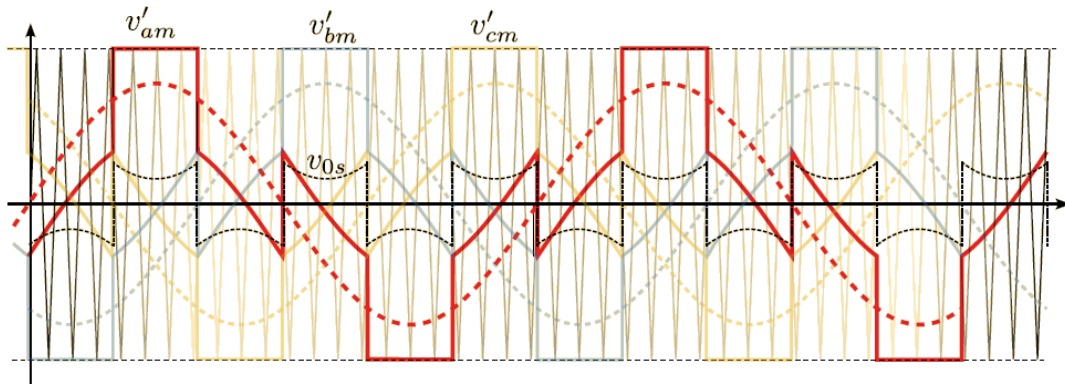


Figura 2.5 Formas de onda de la tensión con modulación DPWM [1]

Para la obtención de las formas de onda de la tensión deseadas se implementarán en simulación las Expresiones 5-9 [2], [3].

$$\xi = \begin{cases} 1 & |V_{0s_top}| > |V_{0s_bottom}| \\ 0 & |V_{0s_top}| < |V_{0s_bottom}| \end{cases} \quad (5)$$

$$V_{max} = \max(V_{am}, V_{bm}, V_{cm}) \quad (6)$$

$$V_{min} = \min(V_{am}, V_{bm}, V_{cm}) \quad (7)$$

$$V_{0s_top} = \begin{cases} V_{dc}/2 & V_{max} < 0 \\ V_{dc}/2 - V_{max} & elsewhere \end{cases} \quad (8)$$

$$V_{0s_bottom} = \begin{cases} -V_{dc}/2 & V_{min} > 0 \\ -V_{dc}/2 - V_{min} & elsewhere \end{cases} \quad (9)$$

Las ecuaciones expresan el proceso de cálculo de la tensión de offset, V_{0s} , la cual se añadirá a las señales moduladoras originales, así como el cálculo de los parámetros necesarios para obtener dicha tensión.

2.1.2. Cálculo de potencia del inversor

En la Figura 2.6, se muestran las formas de onda de la tensión de fase V_{An} (siendo n el neutro de la carga, que se considera flotante respecto al bus DC, existiendo por tanto una tensión v_{nN}) cuando se trabaja en zona de modulación lineal.

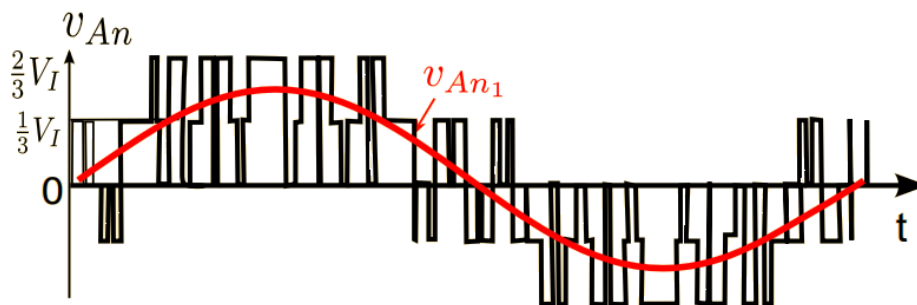


Figura 2.6 Forma de onda de la tensión de fase en zona de modulación lineal [1]

$$V_{An} = V_{AN} - V_{nN} = \frac{2}{3} \cdot V_{AN} - \frac{1}{3} \cdot (V_{BN} + V_{CN}) \quad (10)$$

Se emplea la siguiente expresión para calcular la potencia en la carga, suponiendo que está equilibrada:

$$P = 3 \cdot V_{An} \cdot I_A \cdot \cos(\phi) \quad (11)$$

$$I_A = \frac{V_{An}}{|Z|} \quad (12)$$

Siendo $|Z|$ el módulo de la impedancia de la carga del inversor, para el caso en que la carga sea pasiva.

2.2. Pérdidas en semiconductores

Idealmente, los transistores funcionarían como un interruptor, sin pérdidas, pero en la realidad las pérdidas no son nulas, tanto el IGBT como el diodo en antiparalelo tienen una serie de pérdidas que se estudiarán de forma teórica a continuación. Se analizarán las pérdidas por conducción y por conmutación de los semiconductores para un caso general en el que la carga es inductiva, dado el circuito básico de conmutación en la Figura 2.7.

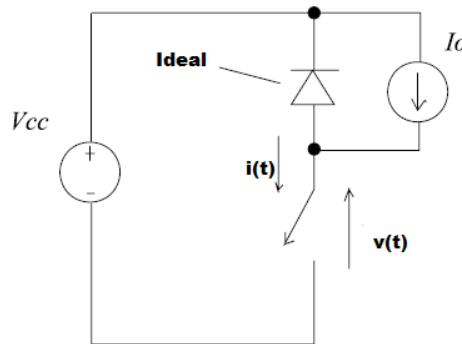


Figura 2.7 Circuito básico de conmutación [1]

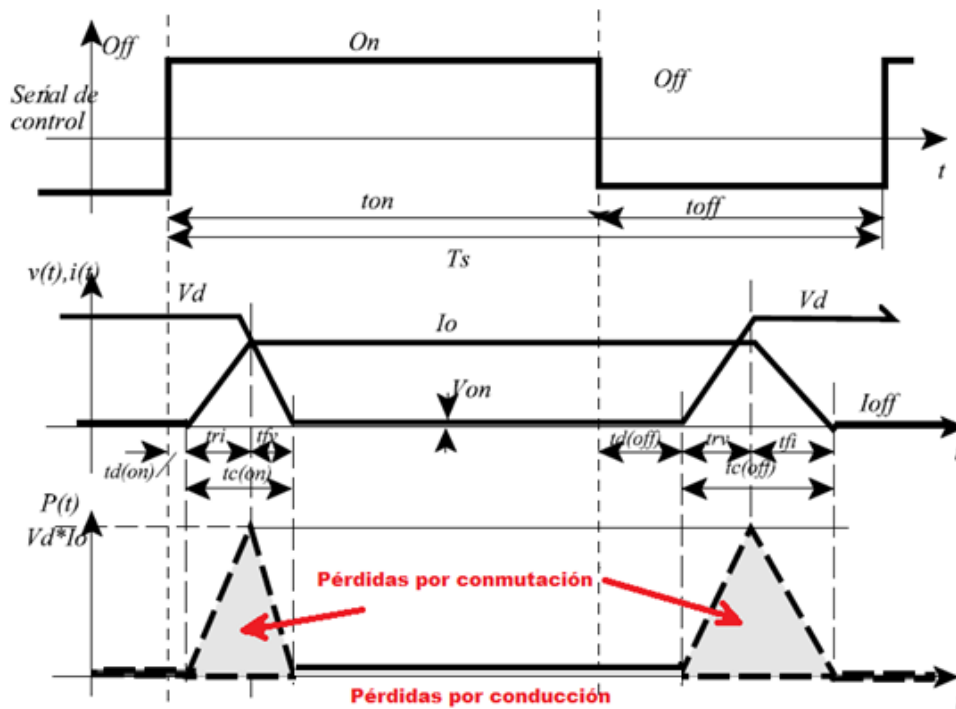


Figura 2.8 Formas de onda en conmutación y potencias instantáneas disipadas [1]

En la Tabla 2.1 se especifican los parámetros mostrados en la Figura 2.8:

Nomenclatura	Significado
t_{on}	Tiempo que conduce el dispositivo.
t_{off}	Tiempo que está cortado el dispositivo.
$t_{d(on)}$	Tiempo de retardo en conducción.
$t_{d(off)}$	Tiempo de retardo en corte.

t_{ri}	Tiempo de subida de la corriente en conducción.
t_{fv}	Tiempo de bajada de tensión en conducción.
t_{fi}	Tiempo de bajada de la corriente en corte.
t_{rv}	Tiempo de subida de tensión en corte.
$t_{c(on)}$	Tiempo de conmutación en conducción.
$t_{c(off)}$	Tiempo de conmutación en corte.
V_d	Tensión en corte.
V_{on}	Caída de tensión en conducción.
I_o	Corriente en conducción.
I_{off}	Corriente en corte.

Tabla 2.1 Parámetros de la conmutación de semiconductores [1]

2.2.1. Pérdidas por conducción

El interruptor estará en conducción durante el periodo t_{on} . Durante este intervalo se produce una disipación de energía, debido a la tensión V_{on} .

Para el IGBT se puede calcular las pérdidas de energía (en Julios) de conducción como el producto de la potencia instantánea, corriente de conducción instantánea por la caída de tensión instantánea, por el tiempo en estado ON.

$$W_{ON_IGBT} = V_{on} \cdot I_o \cdot t_{on} \quad (13)$$

En el diodo se calculan las pérdidas de la misma manera que para el IGBT.

$$W_{ON_Diode} = V_f \cdot I_f \cdot t_{on} \quad (14)$$

Se ha supuesto que $t_{on} \gg t_{c(on)}$. En estas fórmulas no se ha tenido en cuenta la variación de los parámetros, como la caída de tensión del IGBT y diodo, con la temperatura del semiconductor. Esta variación está dada por la ficha técnica del fabricante de los dispositivos y se tendrá en cuenta en las simulaciones.

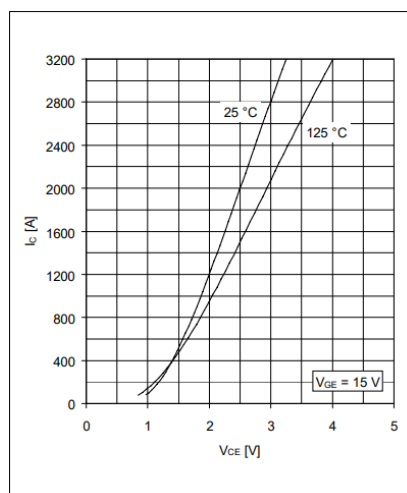


Figura 2.9 Relación de la temperatura con la caída de tensión del IGBT [4]

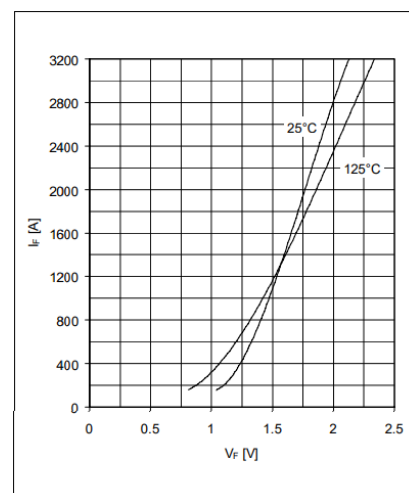


Figura 2.10 Relación de la temperatura con la tensión forward del diodo [4]

Se puede observar que el fabricante proporciona gráficas como las dadas en las Figuras 2.9-2.10 que relacionan la variación de los parámetros comentados, como la tensión y corriente en

estado de conducción de los semiconductores, con la temperatura del dispositivo. Se puede observar que la tensión en estado ON del dispositivo aumenta a medida que la temperatura y la corriente crecen.

2.2.2. Pérdidas por conmutación

Estas pérdidas se producen al encender o apagar un componente, puesto que la conmutación no se produce de manera instantánea, sino que se sigue una secuencia determinada, como se puede observar en la Figura 2.11. En la gráfica se muestra la trayectoria que seguiría un IGBT en el paso a estado de ON.

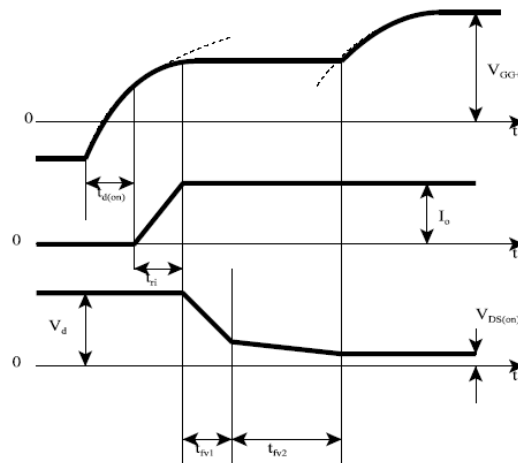


Figura 2.11 Formas de onda de tensión y corriente en el encendido del IGBT [1]

Como se puede ver en la Figura 2.8, se disipa energía en el encendido ($W_{c(t_{on})}$) y en el apagado ($W_{c(t_{off})}$), dada por las siguientes ecuaciones para el IGBT.

Entrada en conducción:

$$W_{c(t_{on})} = \frac{1}{2} \cdot V_d \cdot I_o \cdot t_{c(on)} \quad (15)$$

Entrada en corte:

$$W_{c(t_{off})} = \frac{1}{2} \cdot V_d \cdot I_o \cdot t_{c(off)} \quad (16)$$

Se producen un número de f_s transiciones por segundo, por tanto, la potencia media disipada por la conmutación se define por:

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot V_d \cdot I_o \cdot f_s \cdot (t_{c(on)} + t_{c(off)}) \quad (17)$$

Según esta expresión, a mayor frecuencia de conmutación, mayores pérdidas habrá en el circuito.

Para el diodo se desprecia la energía de encendido, definiendo las pérdidas por apagado, también llamadas pérdidas de recuperación inversa, en la Figura 2.12, donde se muestran las formas de onda del diodo en el apagado.

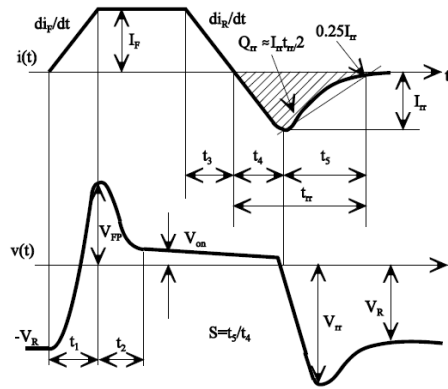


Figura 2.12 Recuperación inversa del diodo

Encendido del diodo:

Durante los tiempos t_1 y t_2 se produce el arranque del diodo, aumentando la corriente a una velocidad de $\frac{di_F}{dt}$, produciéndose un pico en la tensión como resultado del efecto óhmico que se da en los diodos. Existe una relación entre el aumento de las pérdidas en directo que se producen en el diodo y la rapidez de conmutación.

Apagado del diodo:

Se da el apagado del diodo durante los tiempos t_3 , t_4 y t_5 . Durante t_3 la corriente pasa de su valor nominal I_F a 0, donde comienza la recuperación inversa del diodo. Este fenómeno se da en el tiempo t_{rr} como se puede ver en la Figura 2.12. En este tiempo parte de la carga almacenada en el diodo (Q_{rr}) provoca un sobreimpulso de corriente negativo de valor:

$$I_{RR} = \frac{di_R}{dt} \cdot t_{rr} \tag{18}$$

2.3. Análisis y modelados térmicos

Debido a la alta densidad de potencia a la que trabajan los convertidores, y en este caso concreto el inversor trifásico, es importante analizar las prestaciones térmicas de las que se dispone. Los ciclos térmicos dentro de los dispositivos pueden causar importantes fatigas como el despegue del alambre de unión, grietas/ huecos en la capa de soldadura [5].

Para elaborar un modelo térmico preciso, se usará el modelado térmico de los IGBT proporcionado por los fabricantes de los semiconductores. Existe una analogía entre un circuito térmico y un circuito eléctrico (red RC), mostrada en la Tabla 2.2.

Magnitud térmica	Magnitud eléctrica
Potencia (W)	Corriente (A)
Temperatura (°C)	Diferencia de potencial (V)
Resistencia térmica (K/W)	Resistencia eléctrica (Ω)
Capacidad térmica (J/K)	Capacidad eléctrica (F)

Tabla 2.2 Equivalencia circuito térmico y circuito eléctrico

En función de los elementos del modelo térmico se pueden clasificar los modelos en estáticos y dinámicos. Los modelos estáticos son aquellos que únicamente están formados por resistencias térmicas, las cuales representan la capacidad del material con la que se opone al flujo de temperatura. Estos modelos estáticos, como el dado en la Figura 2.13, no son exactos, puesto que únicamente estudian el comportamiento del dispositivo en situaciones estacionarias. Las resistencias térmicas varían dependiendo de factores como la temperatura, efectos transitorios y el montaje [6].

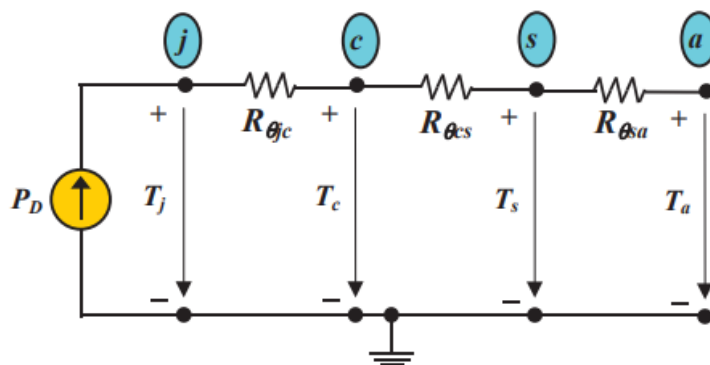


Figura 2.13 Circuito equivalente estático [6]

Las resistencias térmicas de la figura representan la resistencia térmica entre encapsulado y el material del semiconductor, la resistencia entre encapsulado y disipador y la resistencia entre el disipador y el ambiente, en orden de izquierda a derecha.

El comportamiento térmico dinámico es de gran interés en muchas aplicaciones: para considerar los efectos del arranque del sistema, en los que la temperatura crece hasta alcanzar el régimen permanente, o casos de funcionamiento con cargas pulsantes. Estos circuitos dinámicos están formados por impedancias térmicas, definiendo estas como resistencia eléctrica dependiente del tiempo y siendo la impedancia igual que la resistencia térmica en régimen permanente. En las Figuras 2.14-2.15 se muestra un ejemplo de circuito dinámico formado por resistencias y condensadores.

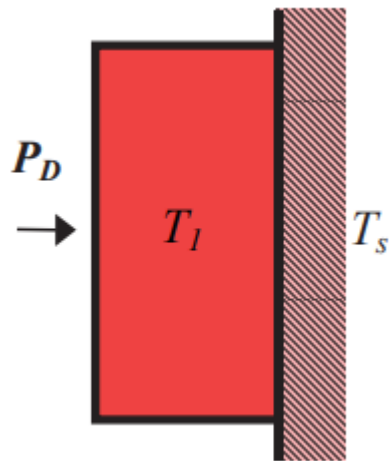


Figura 2.14 Sistema térmico simple [6]

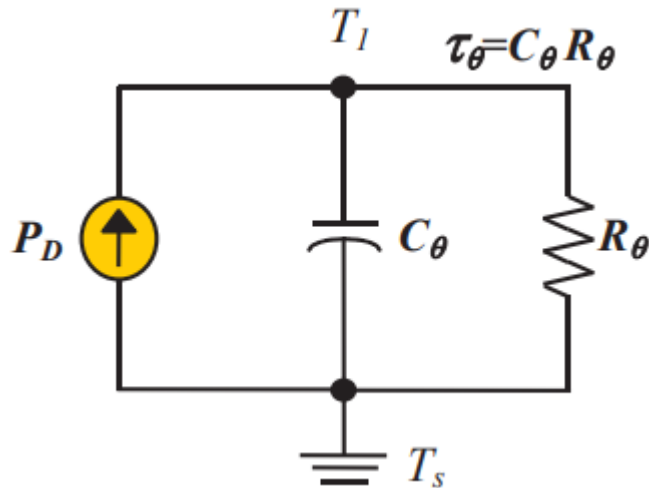


Figura 2.15 Modelo equivalente eléctrico [6]

Se observa en la Figura 2.14 el sistema formado por una masa con temperatura inicial T_s , al cual se aplica un escalón de potencia P_D y alcanza una temperatura final de T_1 . Se utiliza el modelo dinámico de la Figura 2.15 con el objetivo de visualizar el comportamiento transitorio del sistema.

A continuación, se explicará de forma teórica en qué consisten los modelos térmicos existentes, basados en redes RC, y las diferencias que presentan.

2.3.1. Modelo Cauer

El modelo Cauer incluye únicamente capacidades nodo-a-tierra, como se puede observar en la Figura 2.16, y representa la estructura física del semiconductor real. Este modelo se considera relativamente correcto para describir el comportamiento térmico de los dispositivos de potencia. Sin embargo, es complicado usar un modelo Cauer preciso debido a la geometría interna, los materiales y la ruta de calor efectiva del dispositivo, las cuales tienen que determinarse con la ayuda del método de elementos finitos (FEM) mediante simulación [7].

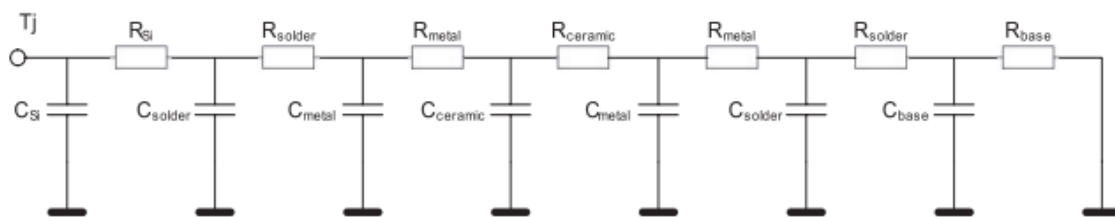


Figura 2.16 Red RC tipo Cauer [8]

Los elementos RC individuales se corresponden con las distintas capas del módulo (la unión, el encapsulado, soldadura etc.).

La Figura 2.17 muestra las limitaciones que presenta este modelo. Se observa que la gráfica azul, la cual representa el modelo Cauer, dado en la Figura 2.16, no se ajusta bien a los valores esperados, puesto que se necesitaría más precisión, al representarse cada capa del dispositivo únicamente con un elemento RC.

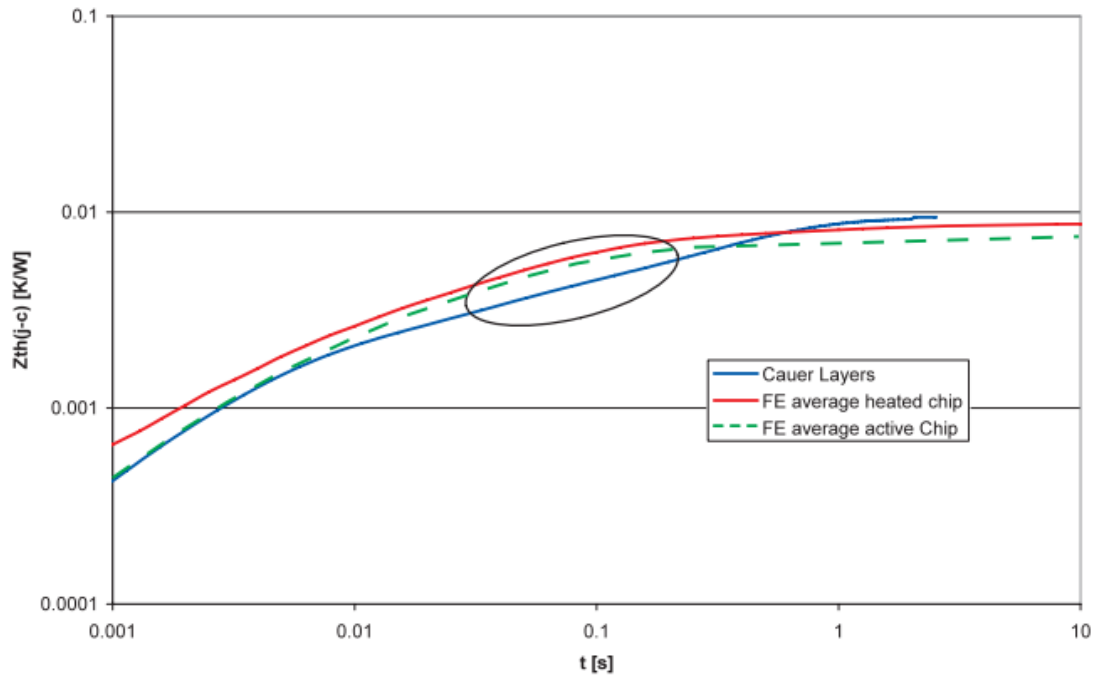


Figura 2.17 Curva de impedancia térmica, Z_{th} , según modelo Cauer [8]

2.3.2. Modelo Foster

Este modelo se usa más que el de tipo Cauer, puesto que está basado en la medición de la dinámica de la temperatura de los dispositivos, y, además, no depende de la estructura interna del dispositivo.

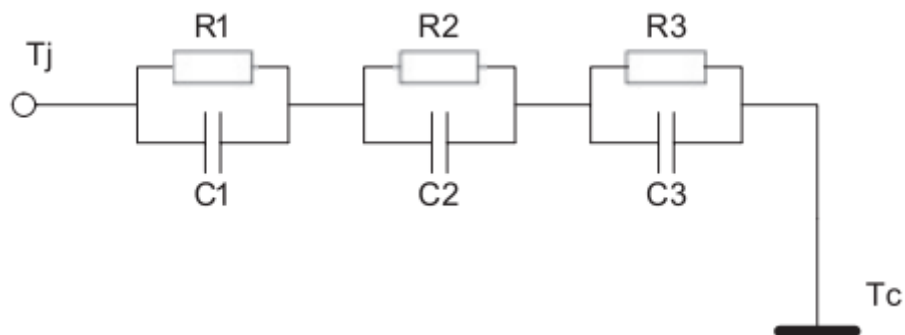


Figura 2.18 Red RC tipo Foster [8]

A diferencia del modelo Cauer, en el modelo Foster los elementos RC individuales no representan las distintas capas del dispositivo semiconductor. En este caso, los nodos no tienen ningún significado físico y puede haber tantos nodos como sea necesario para obtener un sistema preciso.

La expresión analítica usada para el cálculo de la impedancia térmica se puede expresar en función de R_i y τ_i .

$$\tau_i = R_i \cdot C_i \quad (19)$$

$$Z_{th(j-c)}(t) = \sum_{i=1}^n R_i \cdot (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (20)$$

2.3.3. Disipador térmico

En las aplicaciones reales, el módulo de potencia se conecta sobre un disipador térmico, con el objetivo de enfriar los posibles calentamientos de los dispositivos semiconductores. Por tanto, la impedancia térmica del dispositivo y el disipador están conectados en serie y habría que realizar el análisis teniendo en cuenta este dato.

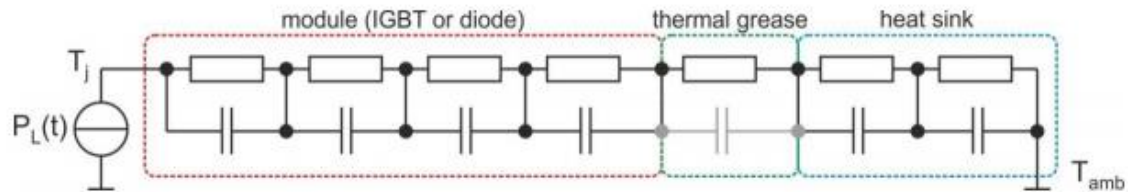


Figura 2.19 Conexión en serie modelo Foster [9]

Debido a las conexiones en serie, la potencia inducida en la unión, representada por corriente en el modelo, llega al disipador térmico sin retraso. Por tanto, desde un principio el modelo tiene en cuenta las características del disipador.

Mientras que un disipador de calor enfriado por aire da como resultado una amplia distribución del flujo de calor en el módulo, y, por lo tanto, conduce a una $R_{th}(j-c)$ más baja en la medición, la dispersión de calor limitada en un disipador de calor enfriado por agua da como resultado un valor de $R_{th}(j-c)$ comparativamente más alto en la medición [9].

A continuación, se presentarán algunos valores prácticos de resistencias térmicas propias de disipadores, los cuales se tendrán en cuenta para elegir los valores de disipadores usados en las simulaciones posteriores. En la Figura 2.20 se visualiza la gráfica de la resistencia térmica del disipador frente al número de aletas. Se muestra una gráfica, en azul, de convección natural y también distintas configuraciones para convección forzada, las cuales ofrecen valores menores de resistencias térmicas, gestionando mejor el flujo de temperatura.

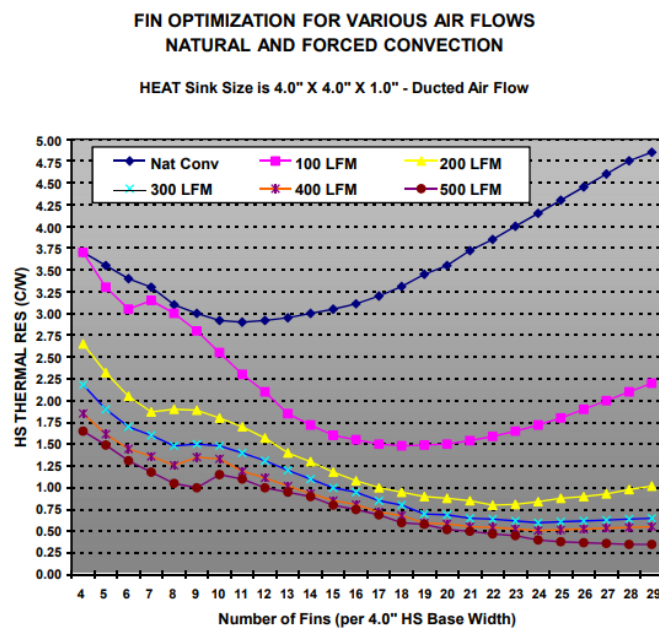


Figura 2.20 Optimización para varios flujos de aire convección forzada y natural [10]

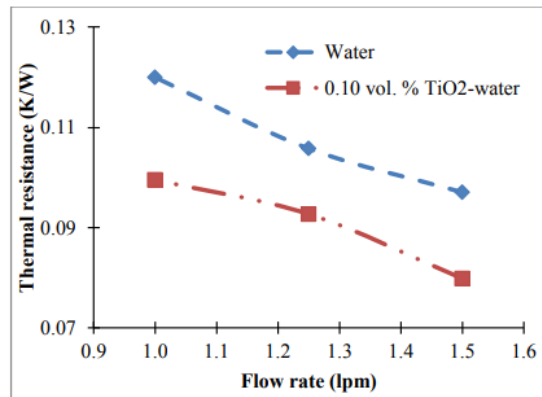


Figura 2.21 Resistencia térmica vs tasa de flujo [11]

La Figura 2.21 muestra los valores de resistencia térmica obtenidos en un estudio de disipador con refrigerante de concentración de volumen de 0.1% TiO₂ / nanofluido de agua.

Para aplicaciones prácticas se podría plantear el estudio del disipador térmico de dos posibles maneras:

- Estudiar el comportamiento térmico del circuito sin tener en cuenta el disipador. Tras este estudio se estima la temperatura máxima a la que llegan los componentes y en función de la temperatura máxima de funcionamiento de estos, proporcionada por el fabricante, se calcula el disipador térmico necesario para cumplir con el requisito de temperatura máxima.
- Realizar el estudio del comportamiento térmico del circuito teniendo en cuenta un disipador térmico dado desde el momento inicial. En este caso habría que comprobar que la temperatura de los dispositivos no supera la máxima proporcionada por el fabricante.

2.4. Software para simulación disponibles y sus prestaciones

Como se ha comentado anteriormente, el análisis térmico en dispositivos de electrónica de potencia es crítico, puesto que los módulos trabajan a alta densidad de potencia. Durante el funcionamiento los dispositivos generan grandes cantidades de calor, lo que conlleva aumentos significativos de temperatura. Por tanto, se necesitan realizar simulaciones especializadas centrándose en los aspectos electrotérmicos para elegir el mejor régimen de funcionamiento para cumplir con los requisitos térmicos y eléctricos del sistema.

Actualmente existen distintos softwares que permiten realizar dichas simulaciones térmicas. Este trabajo se centrará en tres alternativas de programas, analizando sus prestaciones y facilidad de implementación de convertidores de potencia. A continuación, se realizará una breve introducción de los tres programas que se van a utilizar en este trabajo: PLECS, Matlab Simscape y software del fabricante ABB.

2.4.1. PLECS

PLECS es un software de simulación especializado en aplicaciones de electrónica de potencia. Permite al usuario incluir el diseño térmico con el diseño eléctrico en una etapa temprana del proceso de diseño. Se muestra la interfaz de usuario del software en la Figura 2.22.

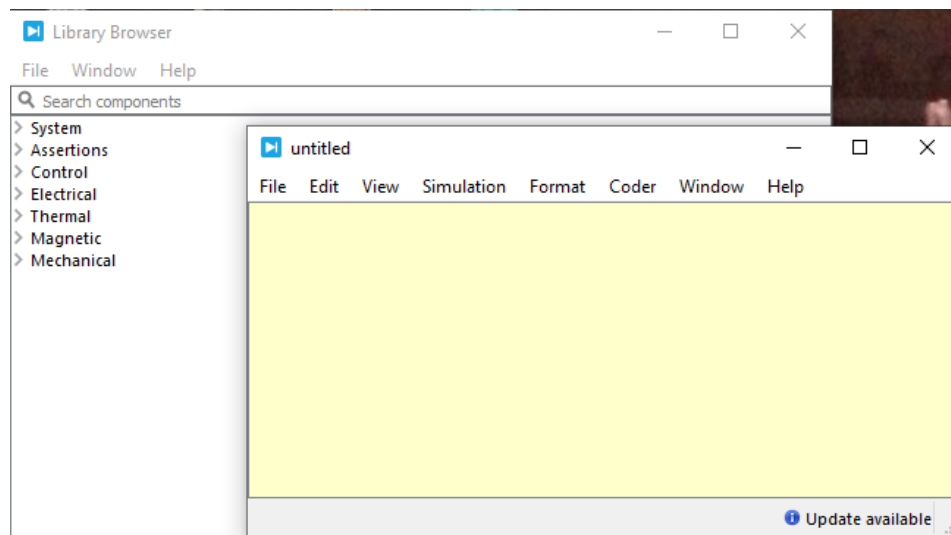


Figura 2.22 Interfaz de usuario PLECS

PLECS recopila la información del semiconductor antes y después de cada operación (corriente directa, voltaje de bloqueo, temperatura de unión), en lugar de calcular las pérdidas por conmutación empleando los transitorios de voltaje y corriente. Estos parámetros medidos se usan para calcular la energía disipada empleando una gráfica 3D, previamente introducida, con los parámetros del semiconductor.

Para cada modelo de semiconductor que se desee usar se pueden definir los parámetros de pérdidas, así como las gráficas del comportamiento del dispositivo en función de la temperatura, como se puede observar en la Figura 2.23. En este caso se muestra la configuración de las pérdidas por energía disipada en el encendido del dispositivo, en Julios. Se puede construir la tabla de parámetros a través de la introducción de una captura de la gráfica proporcionada por el fabricante, eligiendo posteriormente los puntos de interés de la gráfica y recopilando los valores en una 'lookup table', la cual se mostrará posteriormente en los ejes visualizados en la Figura 2.23. El software ofrece la posibilidad de introducir las pérdidas a través de una ecuación, en caso de no disponer de la gráfica realizada por el fabricante del semiconductor.

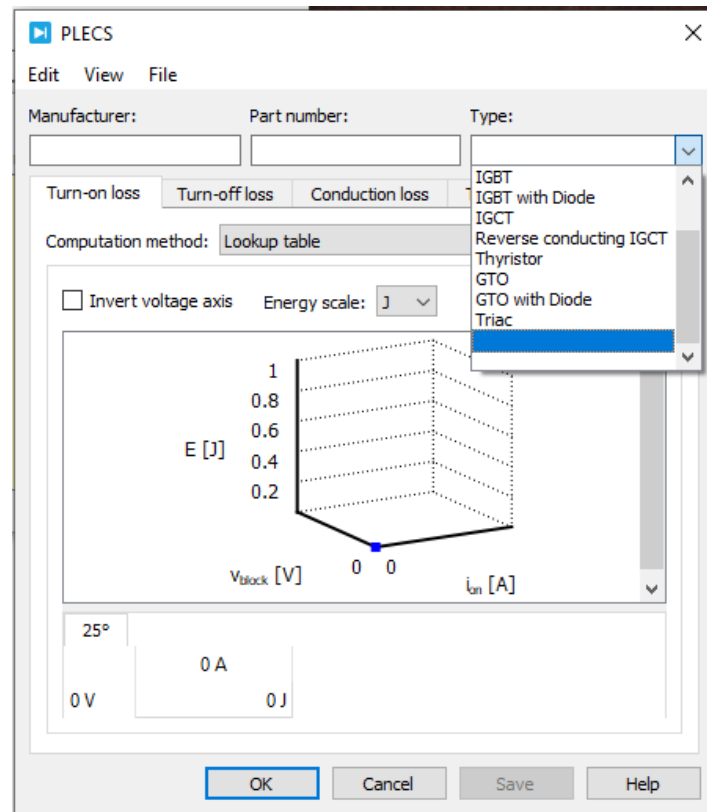


Figura 2.23 Configuración de pérdidas de un semiconductor en PLECS

En cuanto al modelo térmico del semiconductor, se puede definir la impedancia térmica, proporcionada por el fabricante del módulo. PLECS permite elegir entre el modelo Foster y el modelo Cauer, y también el número de elementos que contiene el modelo proporcionado, como se puede ver en la Figura 2.24. El modelo se elige a través del desplegable mostrado en la imagen. Posteriormente el usuario debe clicar en el icono de bolígrafo, rodeado en azul en la figura, para introducir los valores de resistencias y condensadores pertenecientes al circuito térmico.

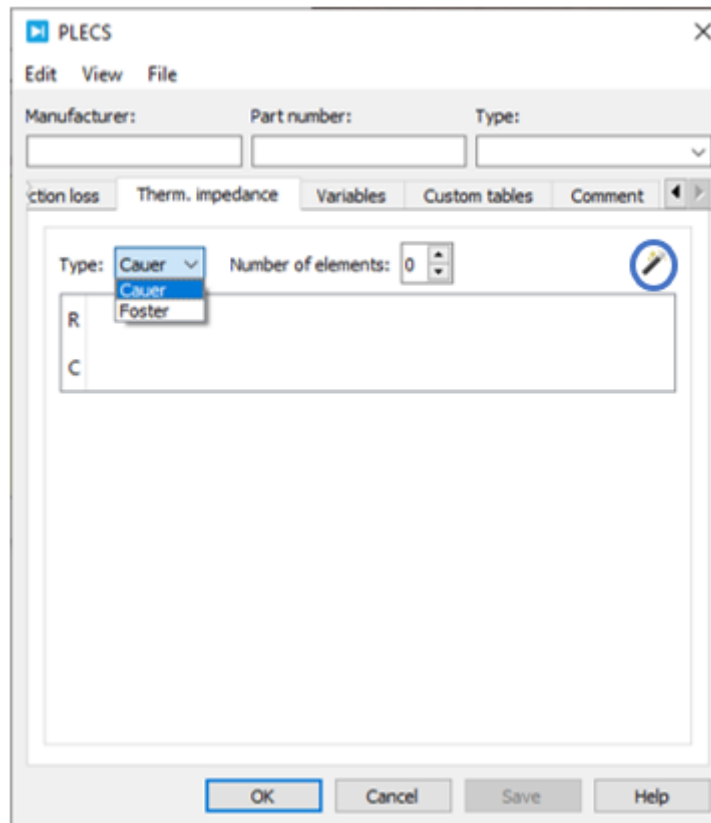


Figura 2.24 Modelado térmico de un semiconductor en PLECS

La librería térmica disponible, ver Figura 2.25, contiene todos los elementos necesarios para una simulación térmica completa. La librería incluye los bloques para el dominio térmico, abarcando los distintos elementos como resistencia térmica, condensadores, disipador térmico. Se incluyen también las fuentes necesarias para simular distintas temperaturas, como la temperatura ambiente, y sensores, necesarios para mediciones de flujo de energía y temperatura de los dispositivos. El último bloque de la librería permite la configuración de parámetros de un modelo térmico individual.

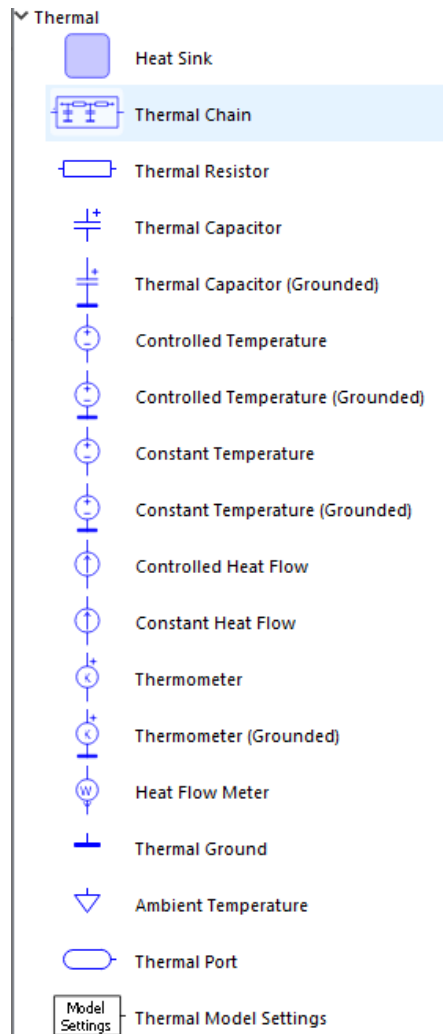


Figura 2.25 Librería térmica PLECS

Uno de los elementos clave del modelado térmico es el disipador térmico, en este caso proporcionado como una caja semitransparente que absorbe las pérdidas térmicas de los componentes a los que contiene, como se muestra en la Figura 2.26. En PLECS este bloque funciona absorbiendo las pérdidas térmicas disipadas por los componentes que se encuentran en su recuadro, creando un entorno en el que se propaga la temperatura a los componentes que encierra [12].

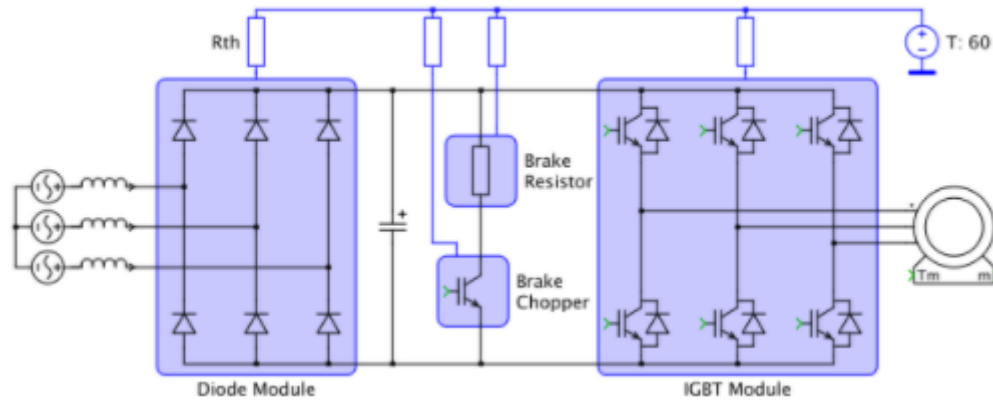


Figura 2.26 Concepto de disipador térmico en PLECS [13]

El flujo de calor entre distintos disipadores se modela con resistencias térmicas entre los disipadores en cuestión.

2.4.2. Matlab Simulink

Simulink es un entorno de programación visual que funciona sobre el entorno de simulación Matlab. En este trabajo nos centraremos en una librería de Simulink llamada Simscape. Esta herramienta permite la creación de sistemas físicos dentro del entorno de simulación de Simulink.

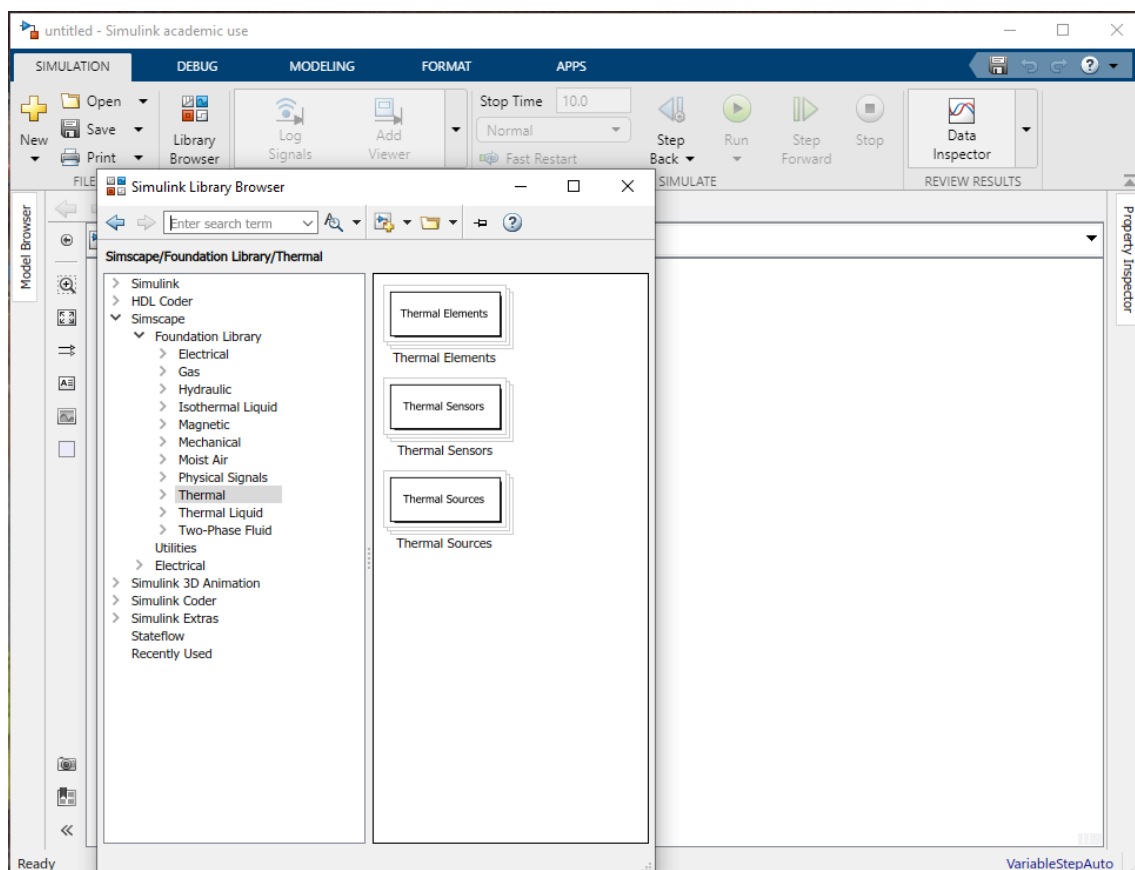


Figura 2.27 Interfaz de usuario Simulink, librería Simscape

Simscape ofrece la posibilidad de desarrollo de sistemas físicos basados en conexiones físicas integradas directamente con diagramas de bloques. La librería contiene una serie de elementos térmicos, que permiten realizar análisis térmico en profundidad de los sistemas. En los

elementos térmicos se incluyen los bloques como masa térmica, varios bloques de transferencia de calor y resistencia térmica. En la parte de sensores se incluyen el sensor de flujo de calor y el de temperatura para realizar mediciones, y en la sección de fuentes se ubican los bloques para modelar fuentes de flujo de calor o temperatura, para simular las temperaturas de distintas superficies [14].

Al emplear semiconductores de la librería eléctrica de Simscape, se puede activar el puerto térmico del dispositivo (en el menú que se despliega al clicar con botón derecho sobre el bloque), permitiendo al usuario introducir los parámetros de las pérdidas del semiconductor proporcionados por el fabricante, como se puede ver en la Figura 2.28. Se observa que se pueden incorporar una serie de datos de pérdidas de energía de encendido, apagado, así como el vector de temperatura correspondiente a las pérdidas introducidas, ofreciendo la posibilidad de elaborar un modelo detallado, con datos en numerosos puntos de temperatura y corriente, que permitirá una simulación más realista. Al puerto térmico habría que conectar el modelo térmico del dispositivo, para posteriormente poder medir la temperatura. Se realizará el modelado térmico según uno de los modelos explicados en el Apartado 2.3, y se conectará al bloque del semiconductor incorporando las impedancias térmicas correspondientes del disipador térmico. Esta conexión se visualizará para el caso concreto de este trabajo en el Apartado 3.2.

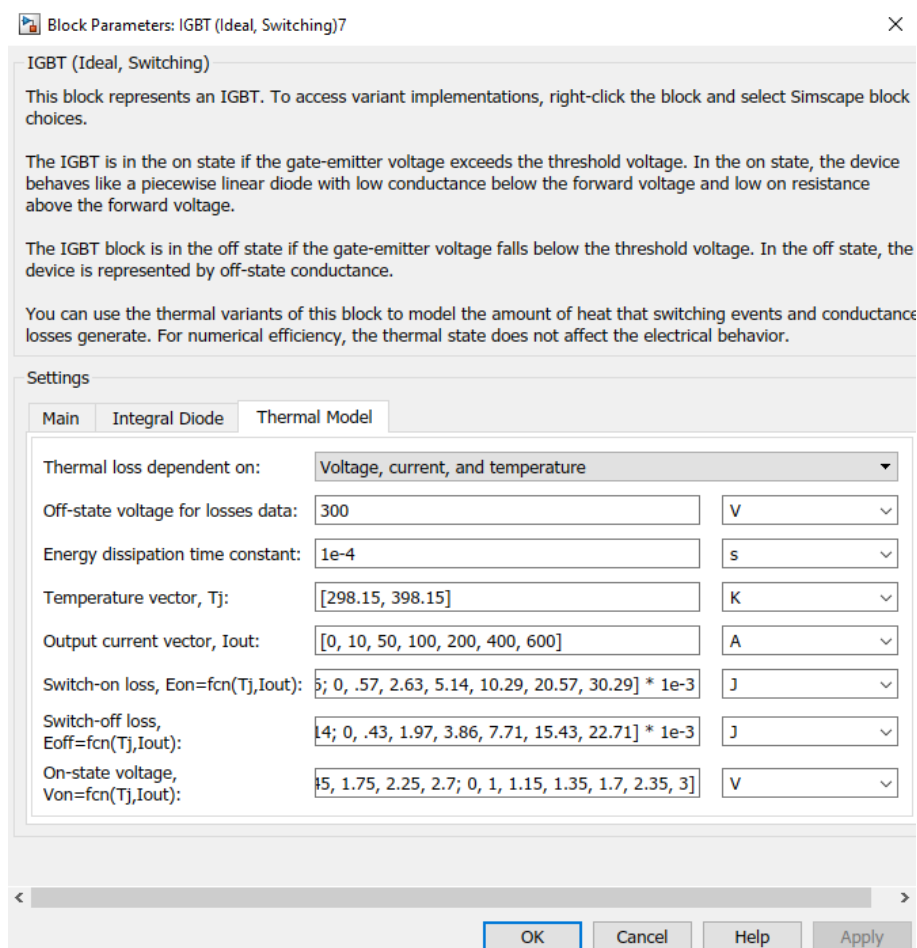


Figura 2.28 Modelado térmico de un semiconductor en Simulink

Para el modelado del disipador térmico se emplearía una resistencia térmica, del valor del disipador, puesto que no existe un elemento en la librería que sea un disipador térmico.

2.4.3. SEMIS ABB

ABB es uno de los mayores fabricantes de semiconductores de potencia con años de experiencia en el campo. En 1987 se fusionaron con la firma ASEA, fabricante de semiconductores, pasando a desarrollar una amplia gama de productos que tuvieron gran éxito en el mercado [15].

La serie de módulos HiPak de ABB está formada por IGBTs de alta potencia montados en carcasas según normas industriales. Pueden ser de IGBT único, doble, diodo doble y chopper. Estos módulos presentan distintas características, como:

- Proporcionan vía de circulación de la corriente desde la barra de bus al chip y retorno
- Contactos eléctricos aislados entre sí.
- Dispone de sistema de refrigeración activo para evitar sobrecalentamientos.
- Larga vida útil del módulo.

A continuación, en la Figura 2.29, se presenta la sección transversal del módulo.

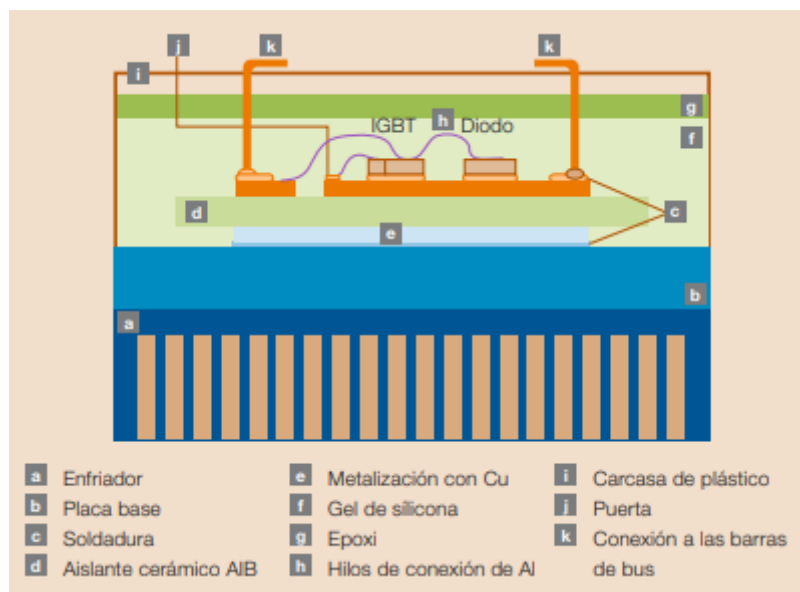


Figura 2.29 Sección transversal de IGBT HiPak de ABB [15]

ABB ha desarrollado un software online gratuito (SEMIS) para el análisis de las pérdidas en convertidores de potencia. Este programa permite la simulación de convertidores empleando los semiconductores de la familia HiPak.

SEMIS permite la simulación de una amplia variedad de circuitos para distintas aplicaciones, ver Figura 2.30, determinando los elementos críticos y las pérdidas en el circuito. Las simulaciones están basadas en PLECS. Los modelos de semiconductores emplean los valores dados en las fichas técnicas de los dispositivos. [16]

SEMIS

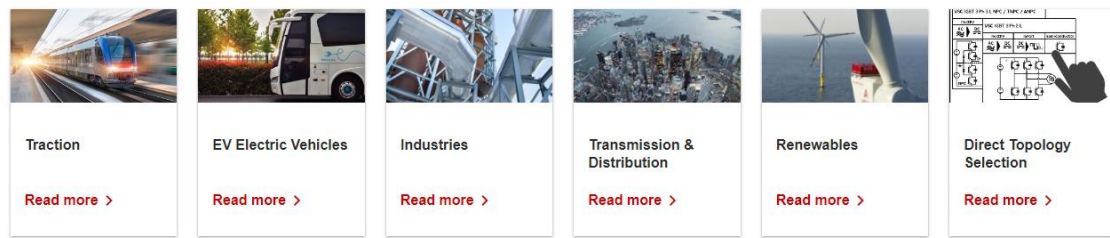


Figura 2.30 Campo de aplicaciones disponibles para distintas simulaciones con SEMIS

La interfaz que presenta el software es la mostrada en la Figura 2.31, donde se muestra la página de configuración para un inversor trifásico, aunque, como se ha comentado, existe la posibilidad de simular distintos tipos de convertidores dependiendo de la aplicación requerida.

3 Phase 2 Level VSC

IGBT based

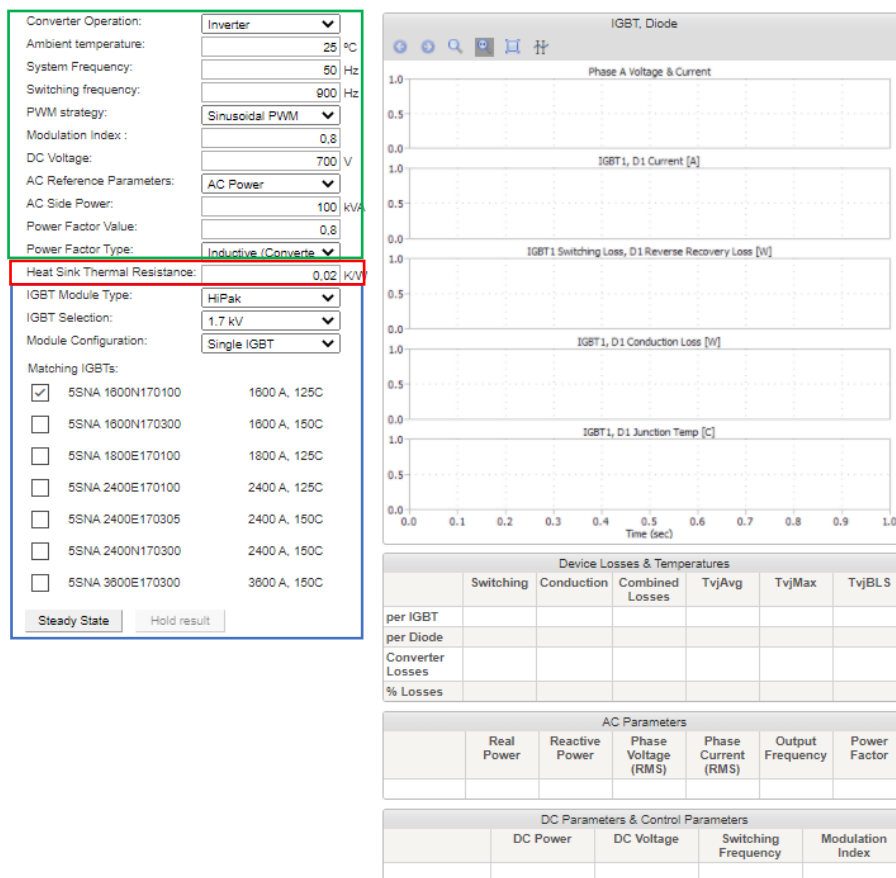
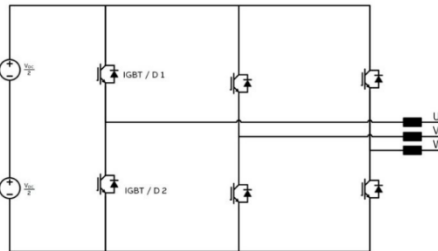


Figura 2.31 Interfaz de usuario para simulación de un inversor trifásico [17]

En la sección verde se configuran los parámetros relativos al inversor que se desea simular. Posteriormente, en la zona roja, se puede elegir el valor del disipador térmico implementado. Por último, en la parte azul se elige el modelo de IGBT, entre los disponibles en la familia HiPak. Las fichas técnicas de cada modelo están disponibles al pulsar sobre el nombre del dispositivo. Una vez introducidos los parámetros de la simulación, el programa procede a calcular los resultados, los cuales se mostrarán en las ventanas a la derecha.

Todos los tipos de pérdidas de semiconductores se calculan según el principio del software PLECS mediante la referencia de la tabla de consulta y la interpolación lineal de la corriente, el voltaje y la temperatura de unión reales del dispositivo.

Además de las pérdidas de los semiconductores, también se producen pérdidas en los componentes pasivos del sistema, las cuales no se consideran en esta simulación. [18]

3. Simulaciones

En primer lugar, se diseña el circuito del inversor, eligiendo unos parámetros de funcionamiento iniciales, los cuales se pueden variar posteriormente para estudiar el efecto de su variación sobre la temperatura de los semiconductores del circuito. Estos parámetros iniciales son los dados en la Tabla 3.1. También se realizará la comparativa entre PLECS, Simulink y Semis de ABB con el objetivo de analizar las prestaciones de cada software.

Parámetros			
Generales		Térmicos	
fs	3 kHz	Ta	25 °C
ma	0.8	Rth	0.1 K/W
mf	60	Cth	1 J/K
Vdc	500		
P	75 kW		
FP	0.74		

Tabla 3.1 Parámetros base para la simulación

El modelo de semiconductores que se utilizará es un encapsulado de IGBT+Diodo de la familia HiPak de ABB, en concreto, el 5SNA 1600N170100. Los parámetros relevantes a la simulación se extraerán de la ficha técnica del dispositivo [4]. A continuación, en las Figuras 3.1-3.6, se muestran las gráficas procedentes de la ficha técnica que se utilizarán para las simulaciones.

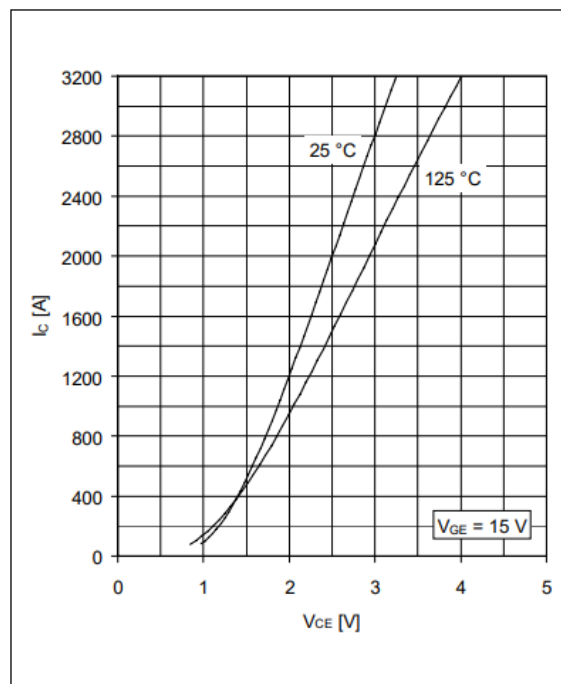


Figura 3.1 Características estado de ON del IGBT

En la Figura 3.1 se representan las características que posee el IGBT en estado de conducción, necesarias para modelar las pérdidas de conducción del dispositivo.

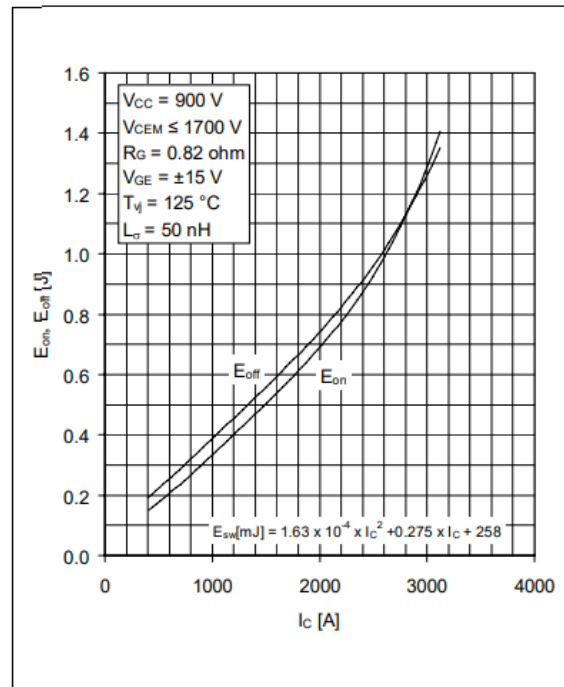


Figura 3.2 Energías de conmutación típicas por pulso frente a corriente de colector

A partir de los datos mostrados en la gráfica de la Figura 3.2 se obtienen los parámetros necesarios para el modelado de las pérdidas de conmutación del IGBT.

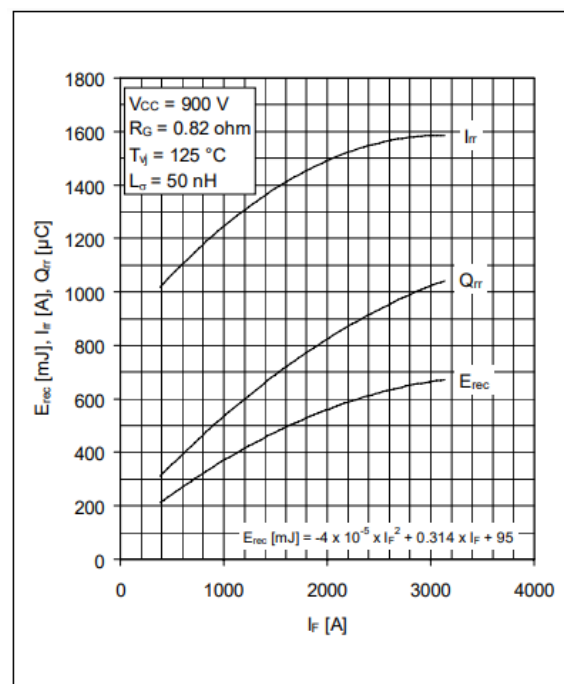


Figura 3.3 Características típicas de recuperación inversa frente a corriente directa

Puesto que las gráficas de energía de conmutación del IGBT y recuperación inversa del diodo se dan únicamente para una temperatura de unión de 125°C, se realiza una interpolación teniendo en cuenta los valores típicos de dichos parámetros para 25°C, dados en la ficha técnica del módulo, para caracterizar con más detalle el dispositivo en simulación.

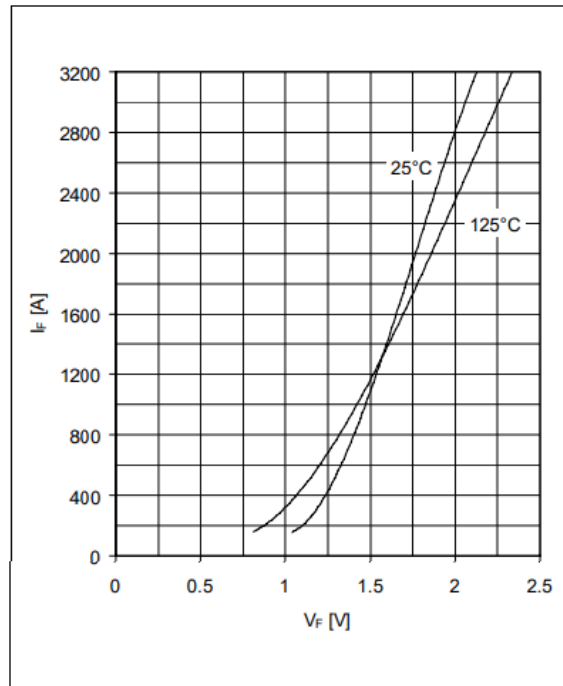


Figura 3.4 Características típicas de forward del diodo

Tras introducir estas gráficas en el software que se utilice, también se incorporan los datos del modelo térmico del IGBT y el diodo, proporcionados por ABB.

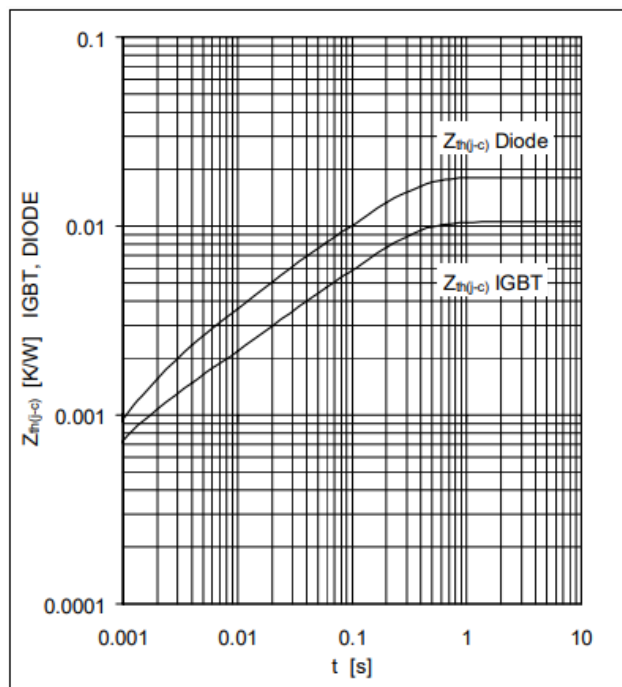


Figura 3.5 Impedancia térmica transitoria

	i	1	2	3	4	
IGBT	$R_i(K/kW)$	7.59	1.8	0.743	0.369	
	$\tau_i(ms)$	202	20.3	2.01	0.52	
DIODE	$R_i(K/kW)$	12.6	2.89	1.3	1.26	
	$\tau_i(ms)$	210	29.6	7.01	1.49	

Figura 3.6 Resistencia térmica y constantes de tiempo

El fabricante también proporciona los valores de las resistencias entre disipador y encapsulado del IGBT y el diodo, de valores 0.012 K/W y 0.024 K/W respectivamente.

3.1. PLECS

Se introducen los datos térmicos y de pérdidas dados en PLECS según se explica en el Apartado 2.4.1. A continuación, se realiza el montaje del inversor trifásico en PLECS, como se puede ver en la Figura 3.7.

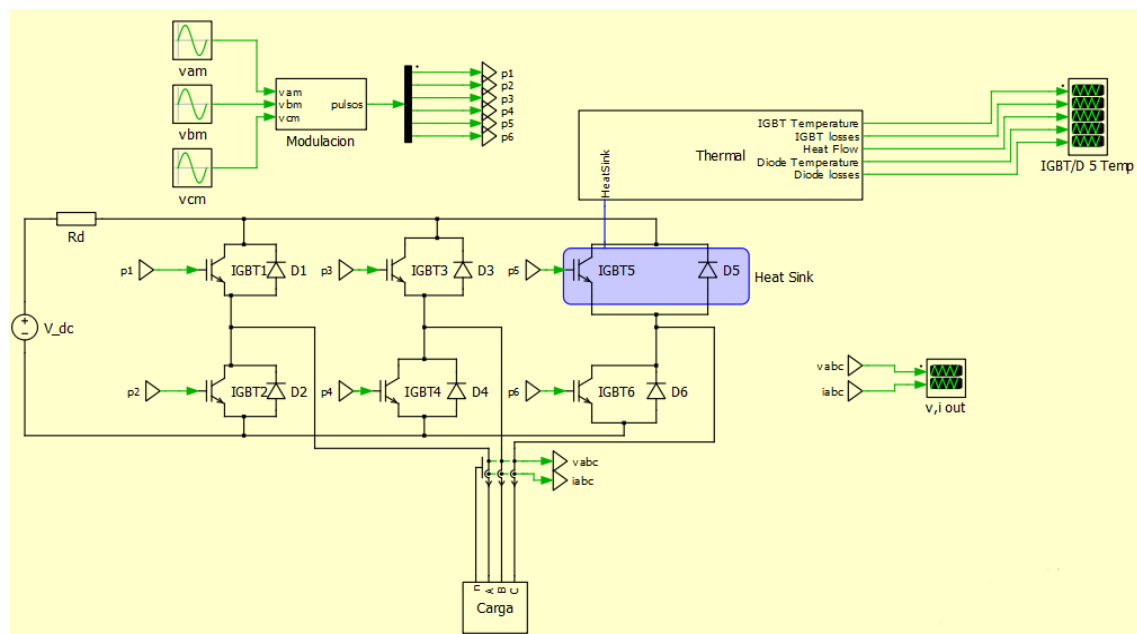


Figura 3.7 Circuito inversor en PLECS

Se observa el circuito montado, incluyendo la modulación SPWM correspondiente, como se ha explicado en el Apartado 2.1. En la última rama del inversor se ha incluido el disipador térmico, agrupando un módulo de IGBT + Diodo y montando el circuito térmico del disipador a continuación, para poder medir las pérdidas y temperatura de unión de los semiconductores. El modelo térmico del IGBT y del diodo están internamente introducidos en la configuración térmica de los semiconductores.

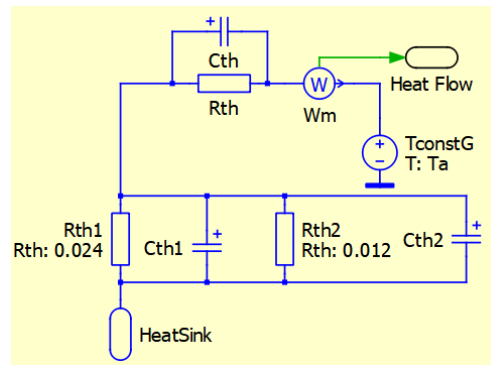


Figura 3.8 Circuito térmico en PLECS

En el bloque de disipador térmico se añaden las resistencias térmicas entre disipador y la cápsula, llamadas Rth1 y Rth2 en la Figura 3.8. A continuación, se incorpora el modelado del disipador, como Rth y Cth.

Se realizará una primera simulación con $m_a = 1.9$ con el objetivo de visualizar el comportamiento del sistema en una situación próxima a onda cuadrada. En régimen permanente se obtienen las formas de onda dadas en la Figura 3.9.

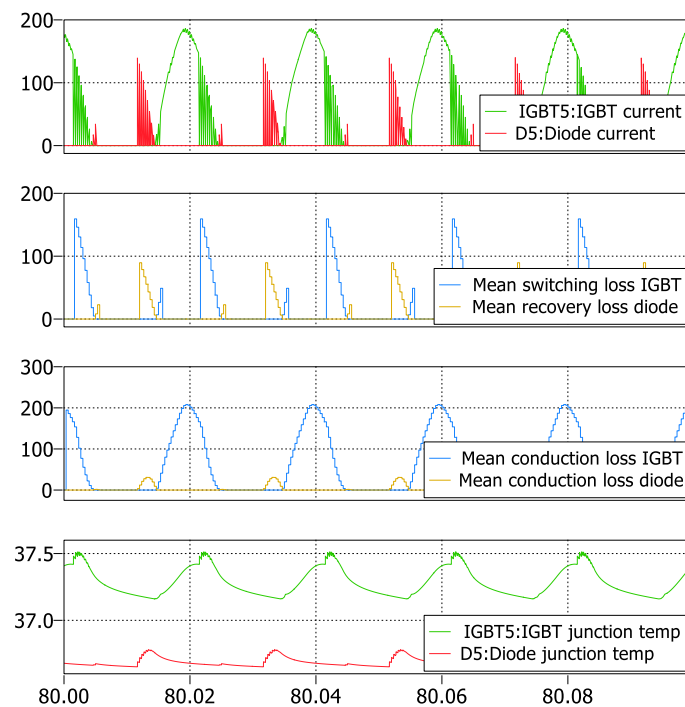


Figura 3.9 Pérdidas del IGBT y diodo en onda cuadrada en PLECS

Como se ve en la Figura 3.9, las pérdidas con índice de modulación de 1.9 son muy reducidas, teniendo, por tanto, una temperatura final reducida (37.2°C para el IGBT y 36.8°C para el diodo). Más tarde en este apartado se podrá comprobar que, trabajando en zona lineal, con una carga parecida a la que se ha utilizado para la zona cuadrada, las pérdidas y temperatura final son mayores.

Como se ha explicado en el Apartado 2.1.1, se puede usar la modulación DPWM, con la cual se esperarían unas pérdidas menores que en el caso de la modulación SPWM. Debido a la complejidad del bloque de C-Script en PLECS, el cual se tendría que emplear para poder

configurar esta técnica de modulación, no se realizará esta simulación en PLECS. Posteriormente se verán los resultados obtenidos en Simulink empleando dicha técnica.

A partir de este momento se empleará la modulación SPWM y se trabajará en zona lineal. Se obtienen las siguientes formas, ver Figura 3.9, de onda de corriente y tensiones a la salida del circuito, las cuales se corresponden con las esperadas para este tipo de circuito, como se ha podido ver en el Apartado 2.1.1.

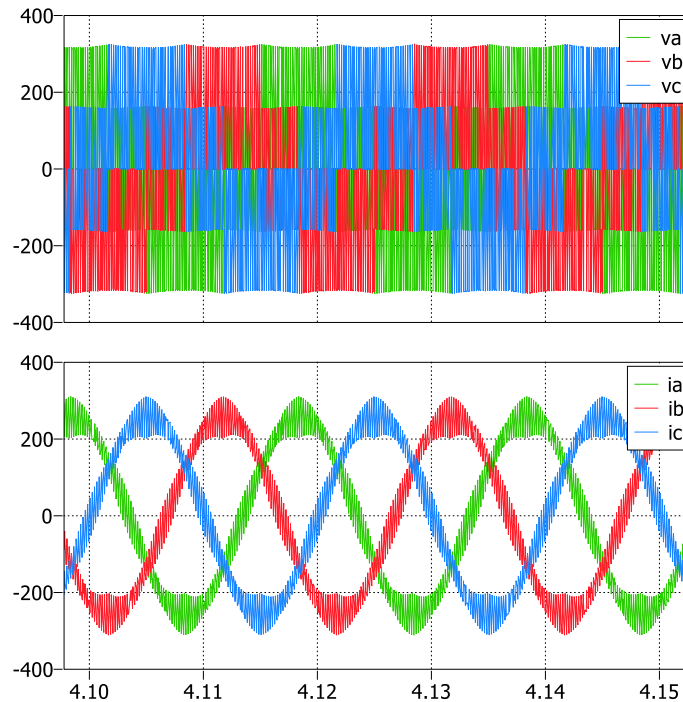


Figura 3.10 Tensión de salida (V) y corriente de salida (A) en PLECS

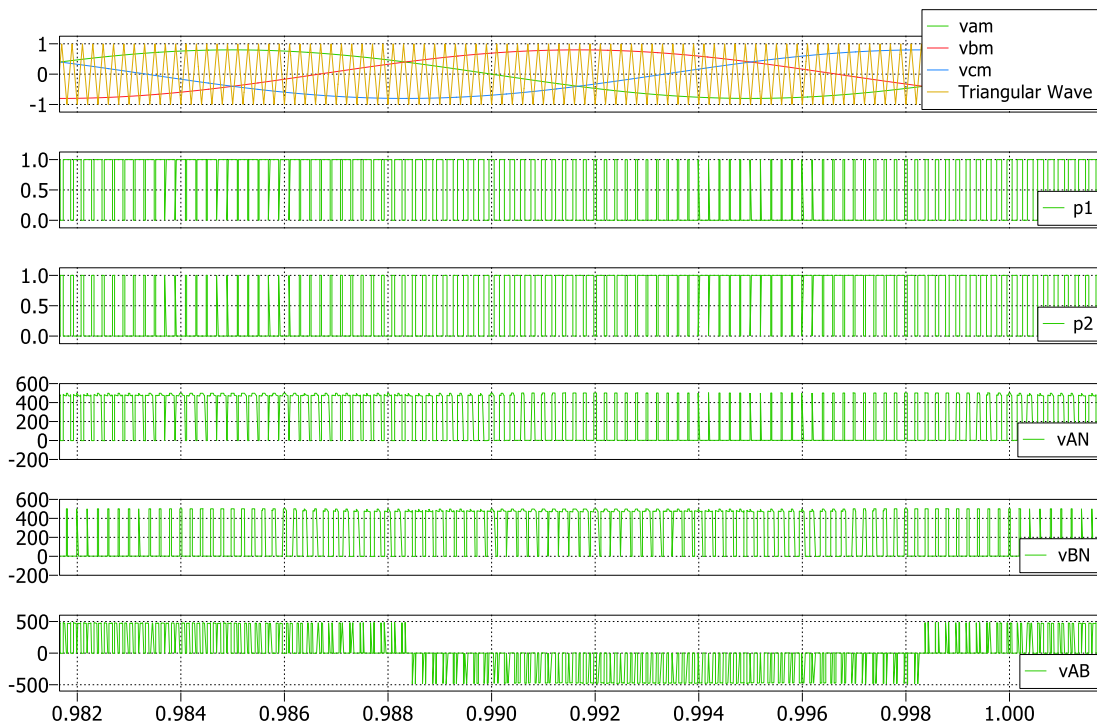


Figura 3.11 Modulación SPWM en PLECS

Se observa que la modulación es la que se ha estudiado en el Apartado 2.1.1, y se corresponde con la Figura 2.2 del mismo apartado.

Basándose en los parámetros iniciales elegidos, que se mostraron en la Tabla 3.1, se ha ajustado la carga para obtener una potencia activa a la salida del inversor de 74kW, con un factor de potencia de 0.74, como se puede ver en la Figura 3.12. Los datos del disipador térmico elegido son los mostrados en la citada Tabla 3.1; posteriormente se evaluará si es necesario cambiar este disipador. Con esta simulación inicial se obtiene el perfil de la temperatura dado en las Figuras 3.13-3.14 de los módulos de IGBT+Diodo. En estas figuras se observa tanto el régimen transitorio del sistema, como el permanente, donde se estabilizan los valores de temperatura y pérdidas.

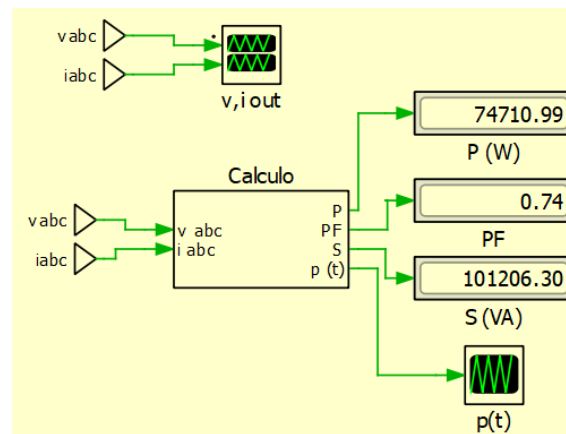


Figura 3.12 Cálculo de parámetros de salida en PLECS

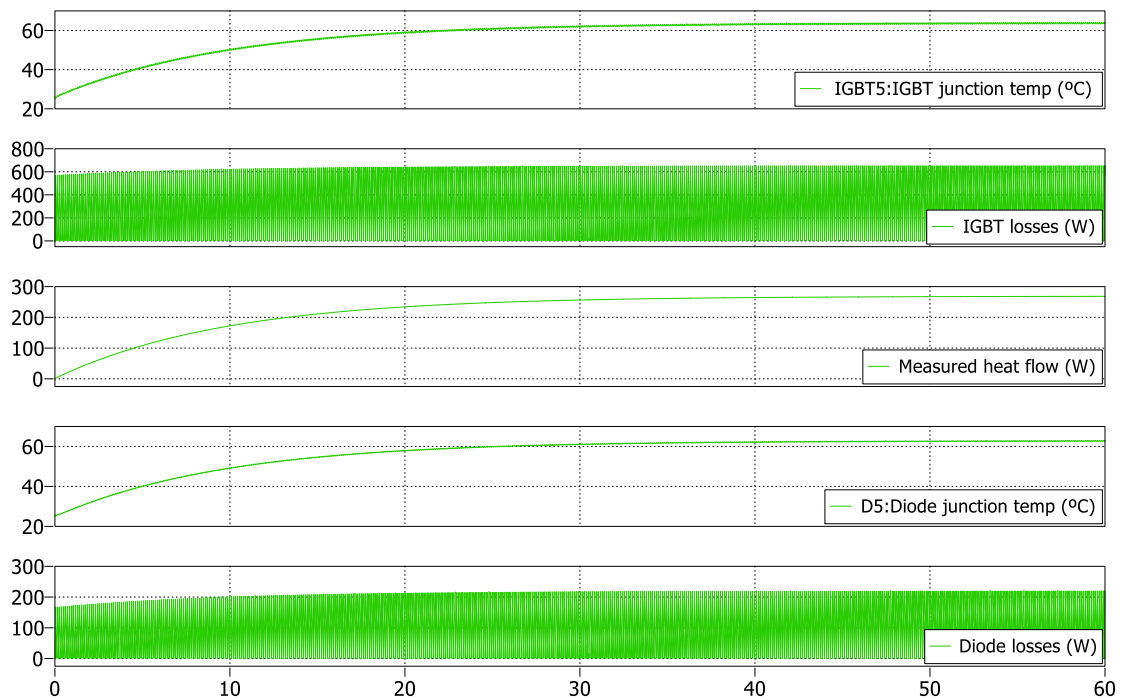


Figura 3.13 Parámetros térmicos y de pérdidas obtenidos, simulación base, en PLECS

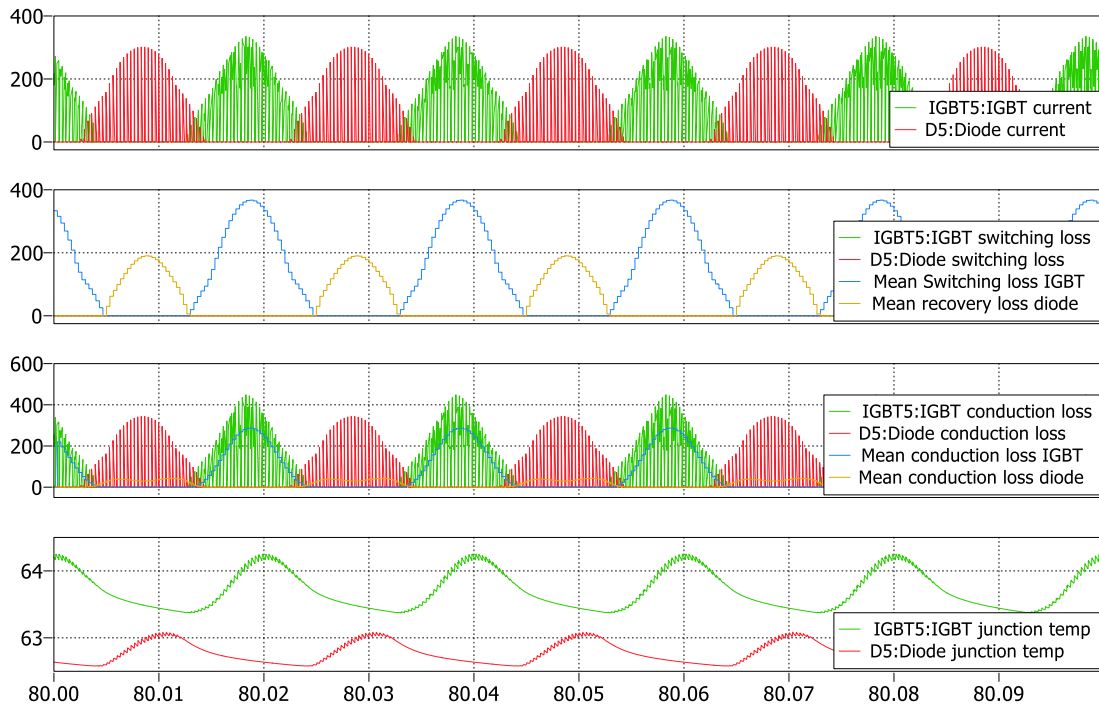


Figura 3.14 Régimen permanente de la simulación base en PLECS

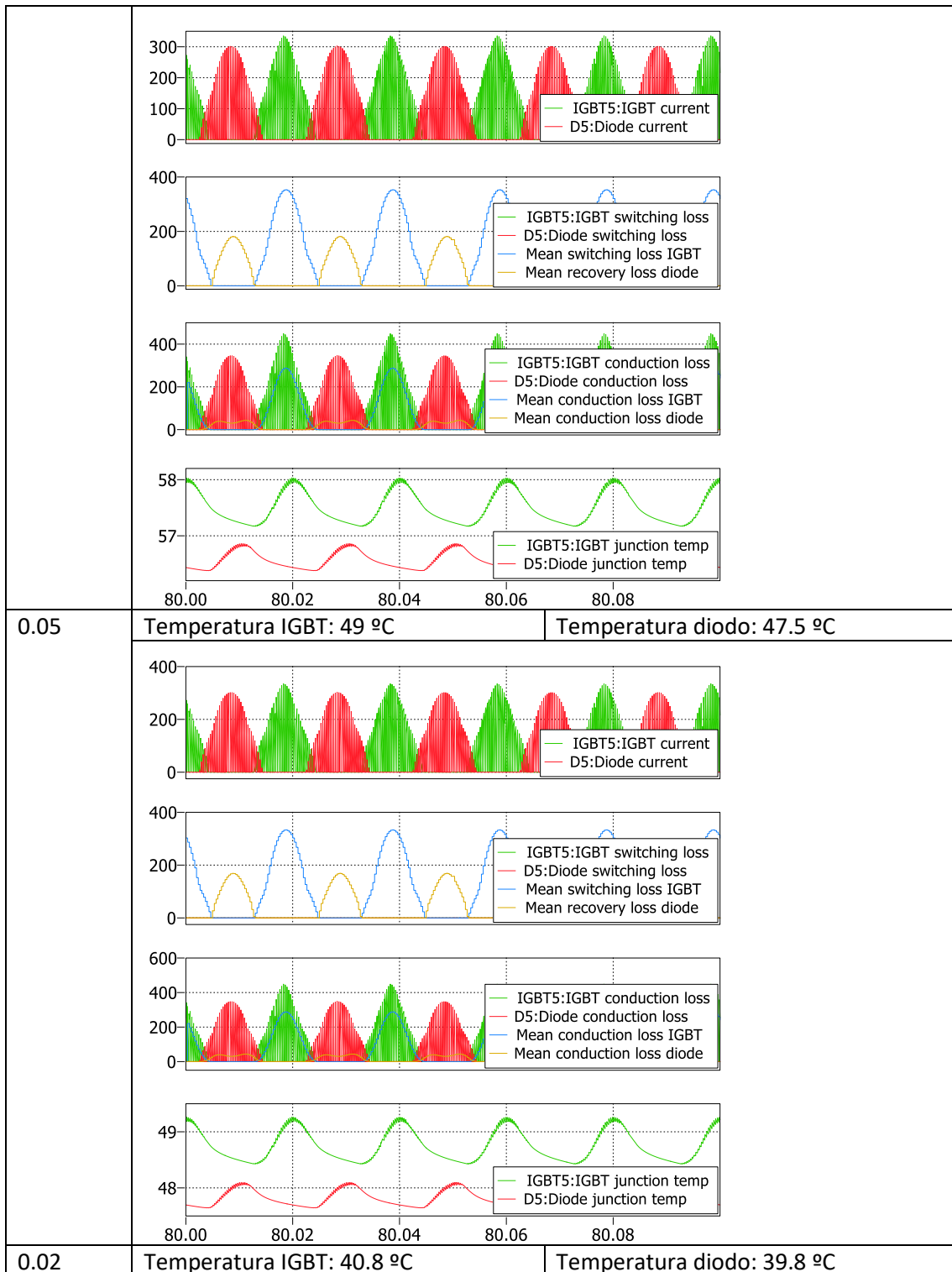
Se han representado, como se puede ver en las Figura 3.13-3.14, las pérdidas medias en el IGBT y el diodo, formadas por la suma de las pérdidas de conmutación y conducción de los dispositivos. Se puede observar la evolución en régimen transitorio del circuito hasta llegar a un punto en el que se estabiliza.

Se observa que la temperatura del IGBT y del diodo evoluciona de manera similar, llegando a establecerse en 64°C y 62.5°C, respectivamente, al final de la simulación. Este valor no excede el valor máximo de temperatura de unión, fijado en 125°C por ABB [4]. El nivel de la temperatura de unión puede llegar a 150°C si no está operando el circuito y a 125°C para un circuito en funcionamiento.

3.1.1. Variación del disipador térmico

Se evalúa la simulación base con distintas opciones de disipador térmico, partiendo de los valores iniciales dados en la Tabla 3.1. Los distintos valores de resistencia térmica que se van a estudiar son los mostrados a continuación en la Tabla 3.2:

Rth (K/W)	Resultados obtenidos	
0.08	Temperatura IGBT: 57.5 °C	Temperatura diodo: 56.5 °C



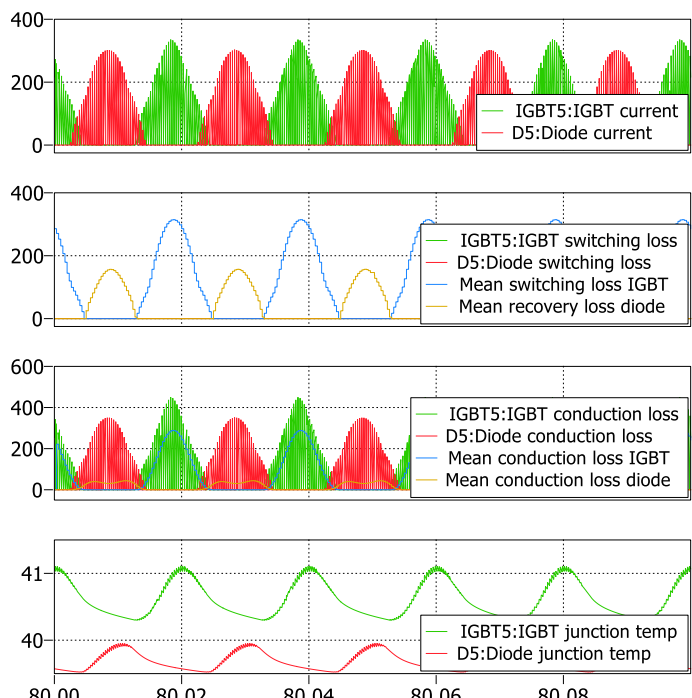
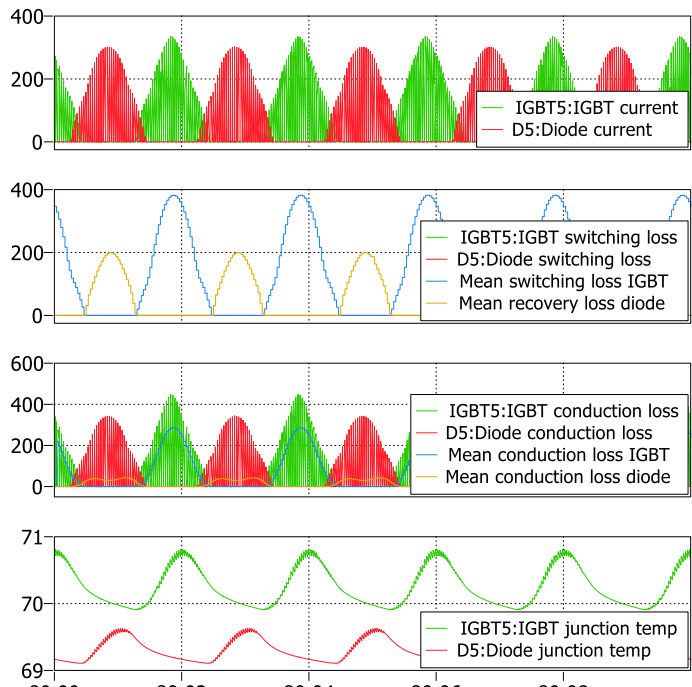
		
0.10	Simulación base (mostrada en Figura 3.14)	
0.12	Temperatura IGBT: 70.5 °C	Temperatura diodo: 69.5 °C
		

Tabla 3.2 Resultados variación Rth con PLECS

Como se esperaba, los resultados prácticos obtenidos muestran que, al aumentar la resistencia térmica del disipador, aumenta la temperatura a la que llegan los semiconductores. Por tanto, el disipador elegido debe cumplir con el requisito de temperatura máxima proporcionado por el fabricante. El estudio también indica que cuanto mayor es la resistencia del disipador térmico, más tiempo necesita el sistema en llegar a la temperatura máxima estable (mayor constante de tiempo térmica, lógicamente).

En ninguno de los casos estudiados se da la situación de superar la temperatura máxima de funcionamiento de los semiconductores especificada por ABB.

3.1.2. Variación del índice de modulación de frecuencia

Para esta serie de simulaciones se realizará la variación del parámetro de la frecuencia de conmutación de los semiconductores, estudiando su efecto sobre la temperatura a la que se someten los mismos. Únicamente varía el parámetro de la tabla de datos base (ver Tabla 3.3).

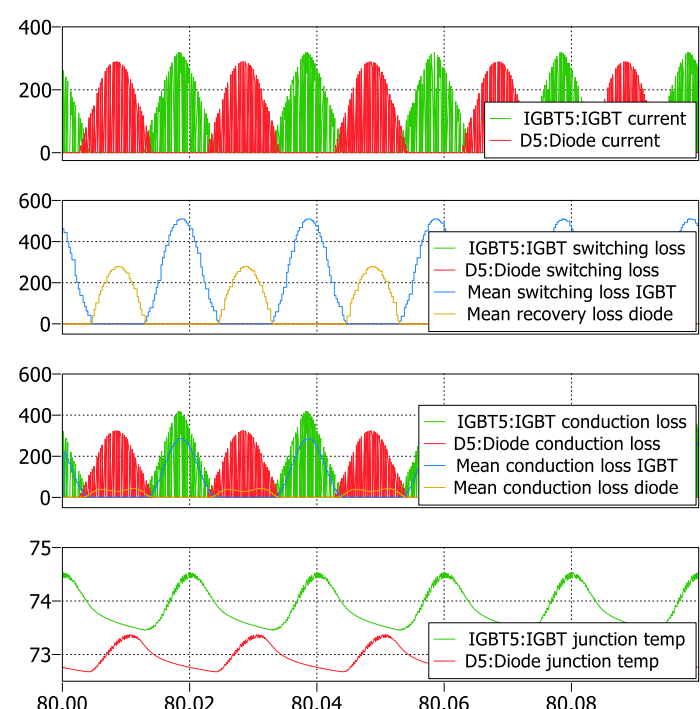
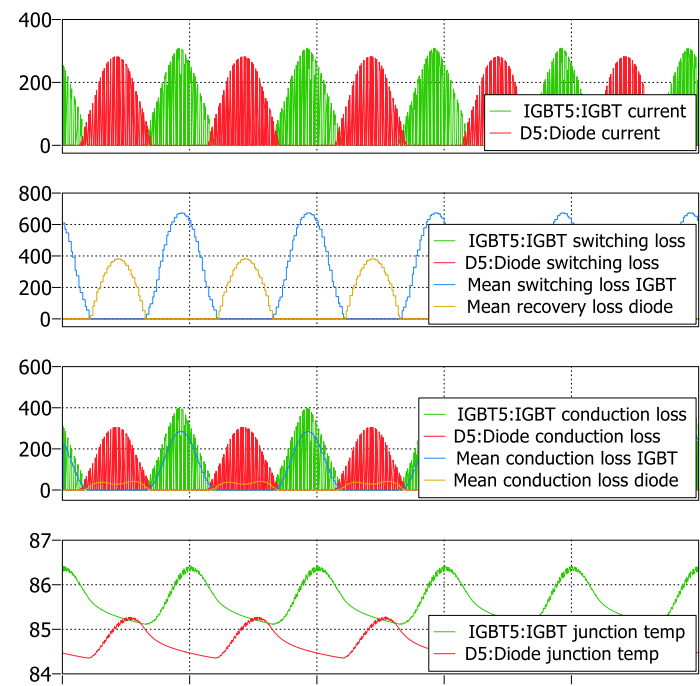
fs	Resultados obtenidos	
3kHz	Simulación base (mostrado en Figura 3.14)	
4kHz	Temperatura IGBT: 74 °C	Temperatura diodo: 73 °C
		
	<p>80.00 80.02 80.04 80.06 80.08</p>	
	<p>IGBT5:IGBT junction temp</p> <p>D5:Diode junction temp</p>	
	<p>80.00 80.02 80.04 80.06 80.08</p>	
5kHz	Temperatura IGBT: 86 °C	Temperatura diodo: 85 °C
		
	<p>80.00 80.02 80.04 80.06 80.08</p>	
	<p>IGBT5:IGBT junction temp</p> <p>D5:Diode junction temp</p>	
	<p>80.00 80.02 80.04 80.06 80.08</p>	

Tabla 3.3 Resultados variación f_s con PLECS

Se obtienen mayores pérdidas, por tanto, temperaturas de los semiconductores mayores a medida que se aumenta la frecuencia de conmutación, según se ha estudiado en el Apartado 2.2.

3.2. Matlab Simulink

Se realiza en Matlab-Simulink el montaje del inversor trifásico, Figura 3.15, con los mismos parámetros que el explicado en PLECS, ver Tabla 3.1. El puerto térmico se ha activado según se explica en el Apartado 2.4.2 y se ha conectado al modelo térmico del dispositivo.

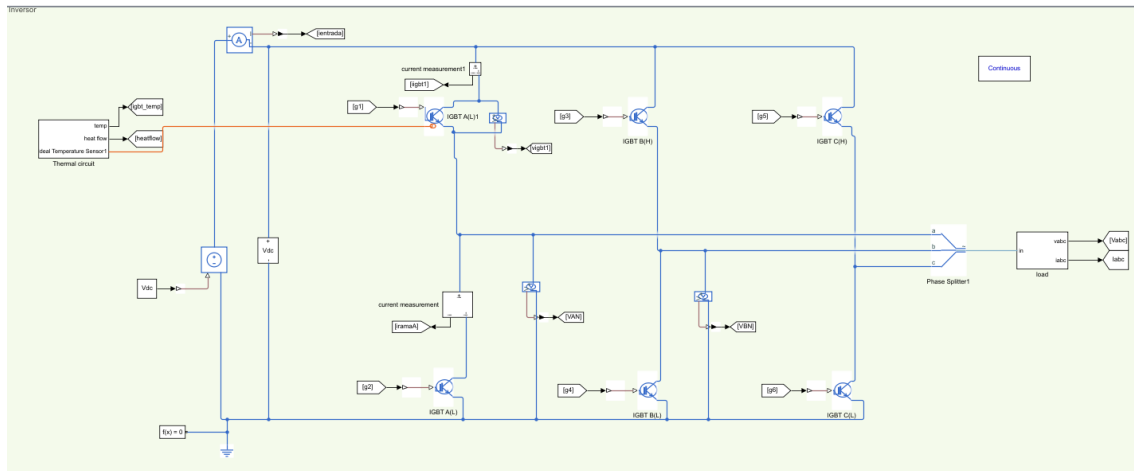


Figura 3.15 Circuito inversor en Simulink

En Simulink se utiliza un bloque que representa el conjunto de IGBT+Diodo en un único bloque en el que se introducirán los parámetros proporcionados por el fabricante del semiconductor. Como se puede ver en la Figura 3.16, representando el circuito térmico, se han incluido las impedancias propias del modelo térmico del IGBT+Diodo, después las impedancias entre el encapsulado del módulo y el disipador y, por último, la impedancia del disipador térmico.

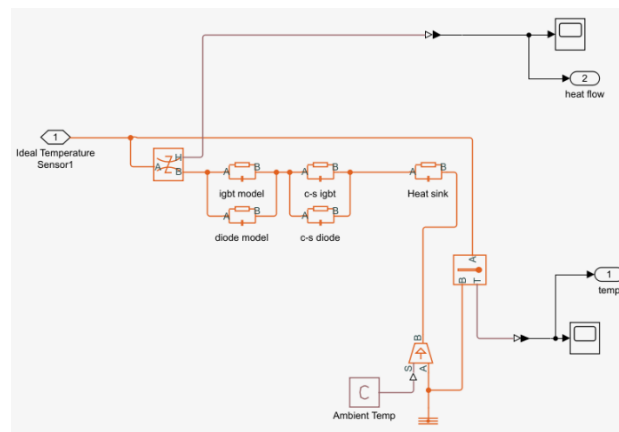


Figura 3.16 Circuito térmico en Simulink

Puesto que el bloque de IGBT+Diodo permite introducir los parámetros térmicos únicamente del IGBT internamente, se ha optado por utilizar el modelo térmico exterior, incorporando los parámetros dados en la Figura 3.6 de modelado térmico. También se han añadido las resistencias térmicas entre disipador y cápsula y la resistencia térmica propia del disipador que se va a usar. En este caso, se visualizará la temperatura del módulo de IGBT+Diodo, no siendo posible visualizar la temperatura de cada uno por separado.

Como se ha comentado anteriormente en el Apartado 3.1, se visualizará una simulación cercana a onda cuadrada, así como una simulación empleando la modulación DPWM, la cual únicamente se realizará en Simulink.

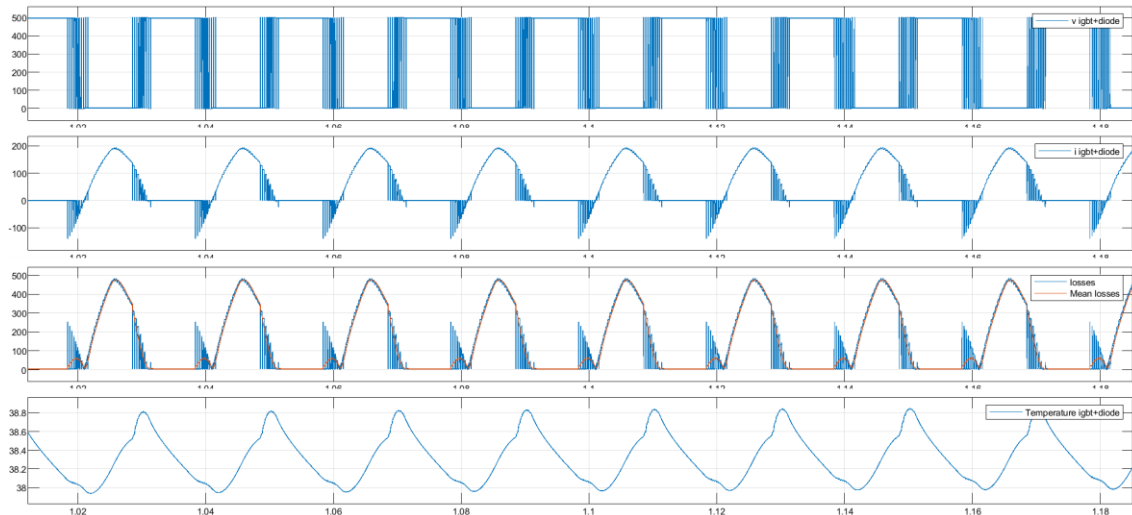


Figura 3.17 Pérdidas del IGBT y diodo en onda cuadrada en Simulink

En la Figura 3.17 se muestran los resultados obtenidos con un índice de modulación de amplitud de 1.9 y una carga muy parecida a la que se usará en las simulaciones posteriores. Los resultados de temperatura obtenidos son similares a los proporcionados por PLECS, siendo la temperatura del módulo de IGBT+diodo en Simulink de 38°C y de 37.5°C (IGBT) y 36.5°C (Diodo) en PLECS. Los niveles de pérdidas son menores que los que se verán en las simulaciones posteriores, en las que se trabajará en zona lineal, donde hay muchas más conmutaciones en cada período de señal moduladora.

Se realiza la configuración para emplear la modulación DPWM, según se ha explicado en el Apartado 2.1. Se muestra la configuración en la Figura 3.18, mientras que las señales mostradas en las Figuras 3.19-3.20 son las resultantes. En la Figura 3.19 se puede contemplar la señal moduladora modificada, a la cual se ha añadido el offset calculado según las ecuaciones explicadas, obteniendo las formas de onda esperadas de la Figura 2.5.

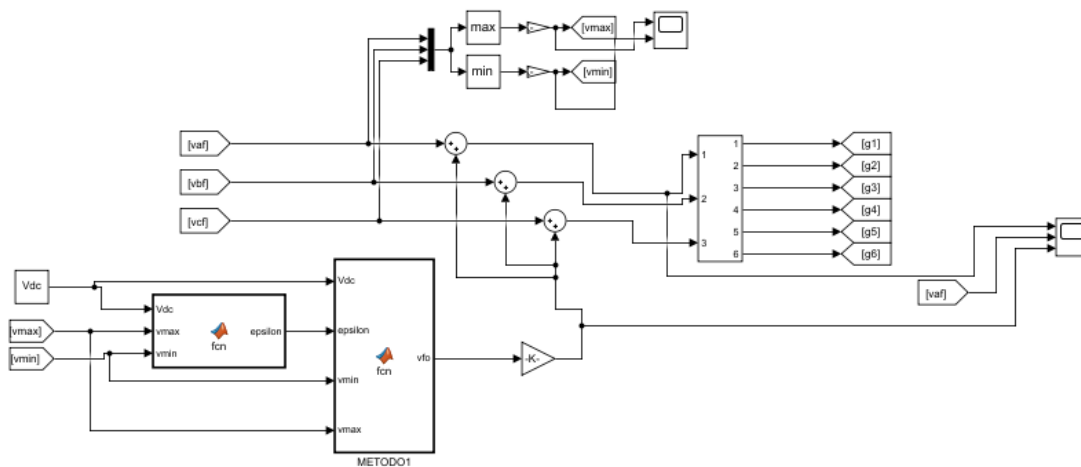


Figura 3.18 Modulación DPWM en Simulink

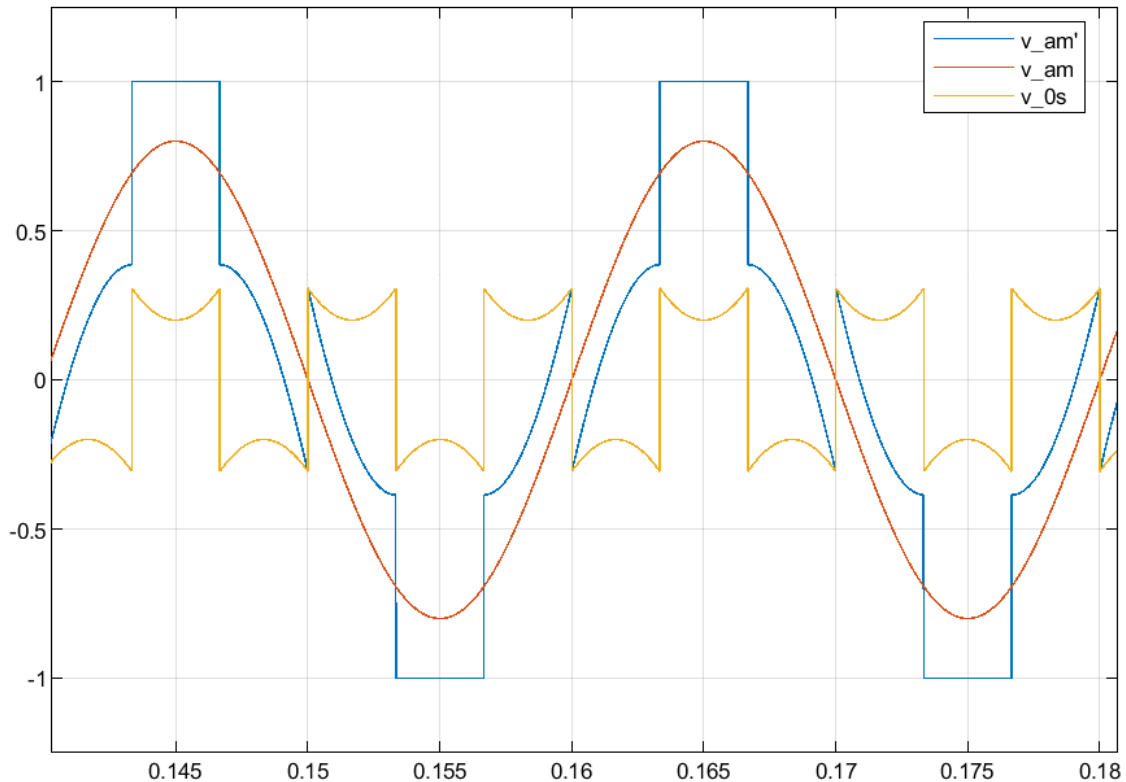


Figura 3.19 Señales moduladoras DPWM en Simulink

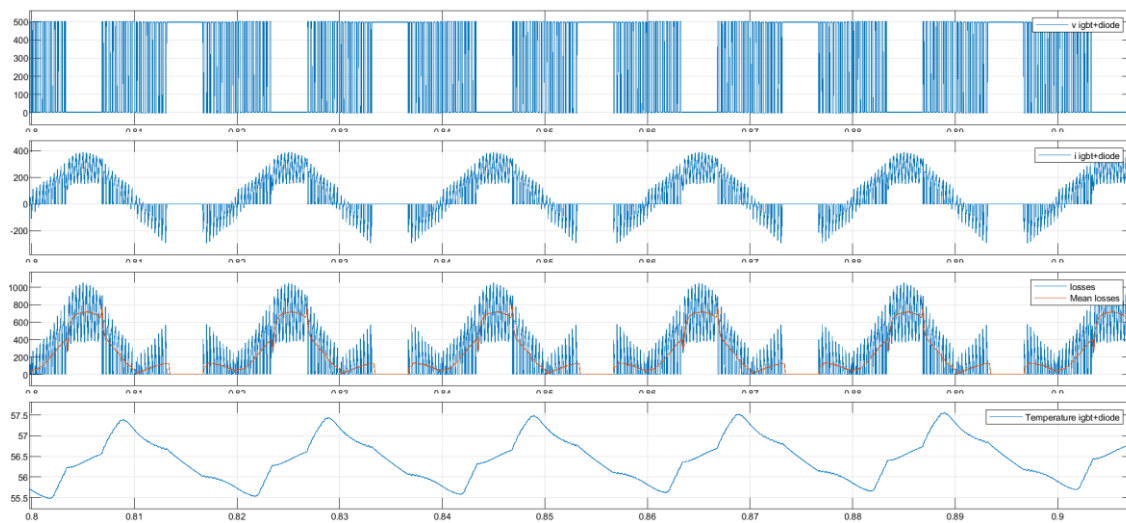


Figura 3.20 Formas de onda de la temperatura y pérdidas, modulación DPWM, en Simulink

Se aprecia en la Figura 3.20 que la temperatura media máxima obtenida es de 56.5°C , valor que, como se verá posteriormente en este apartado, es inferior al obtenido utilizando la modulación SPWM. Este hecho se debe a que las pérdidas en modulación DPWM son menores, puesto que la conmutación se realiza únicamente durante $2/3$ de cada periodo de conmutación, como se puede observar en la forma de onda de la tensión en la Figura 3.20, aunque el convertidor se mantiene en zona lineal.

A partir de este momento, se utilizará únicamente la modulación SPWM. Las formas de onda de tensión y corriente a la salida del inversor, así como la modulación SPWM empleada, se muestran en las Figuras 3.21-3.22.

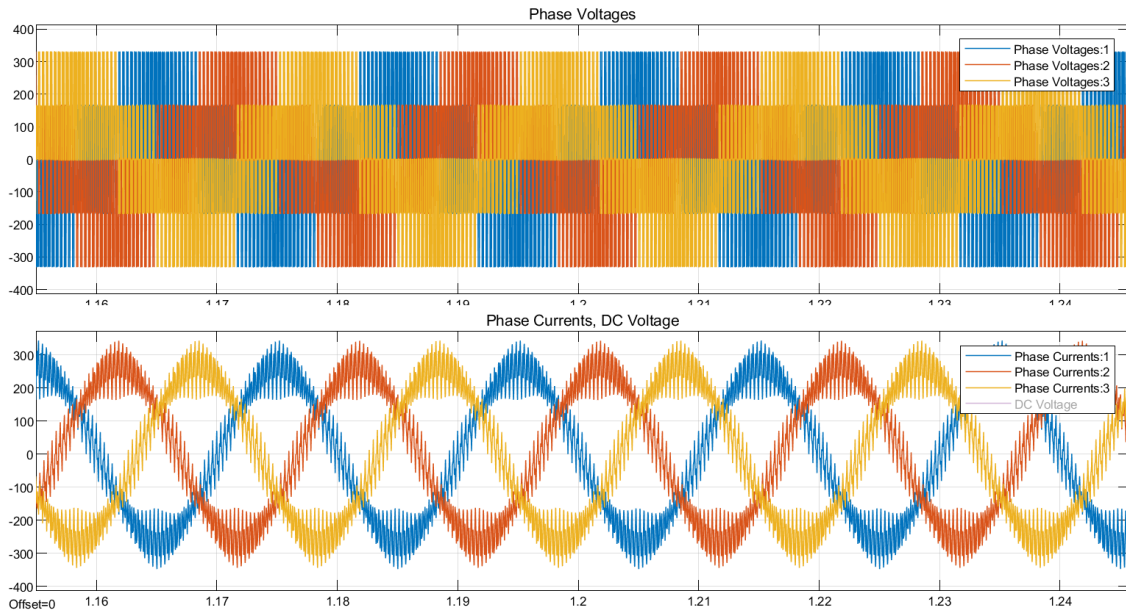


Figura 3.21 Formas de onda de tensión y corriente de salida del inversor

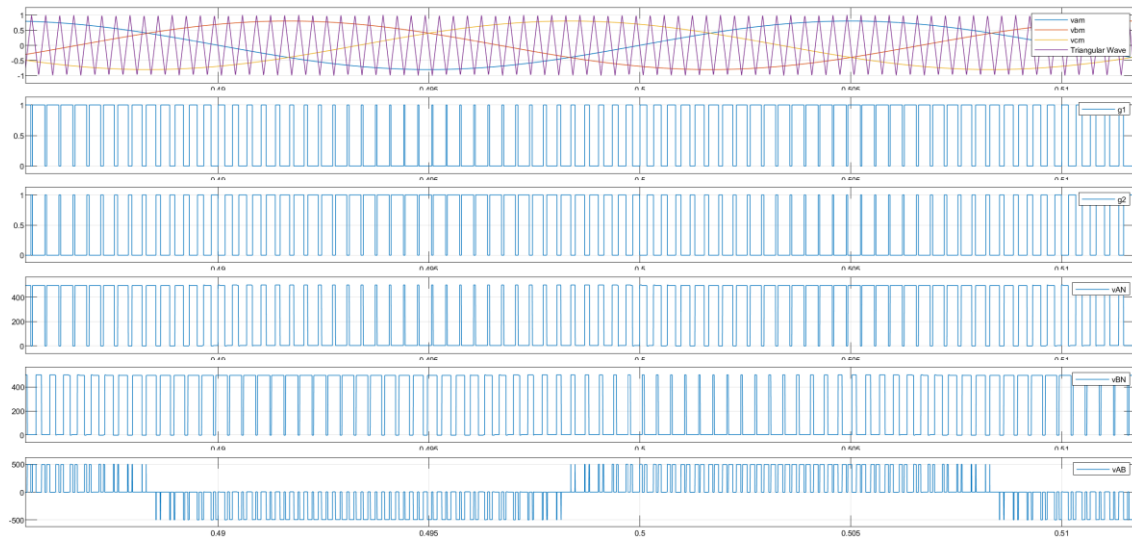


Figura 3.22 Modulación PWM en Simulink

Como se observa, la gráfica dada en la Figura 3.22 se corresponde con la teórica mostrada en la Figura 2.2.

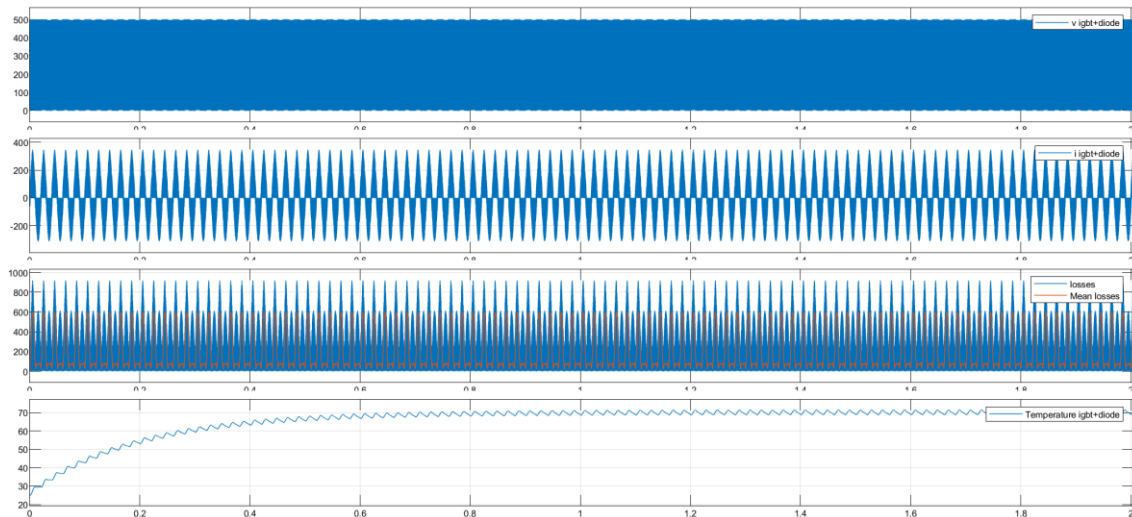


Figura 3.23 Resultados de simulación en régimen transitorio, simulación base, en Simulink

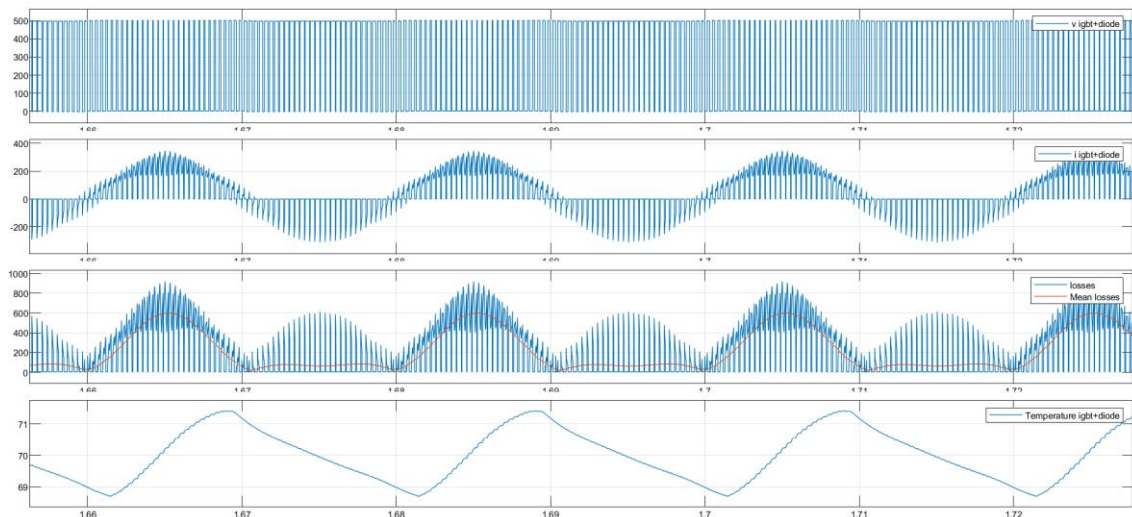
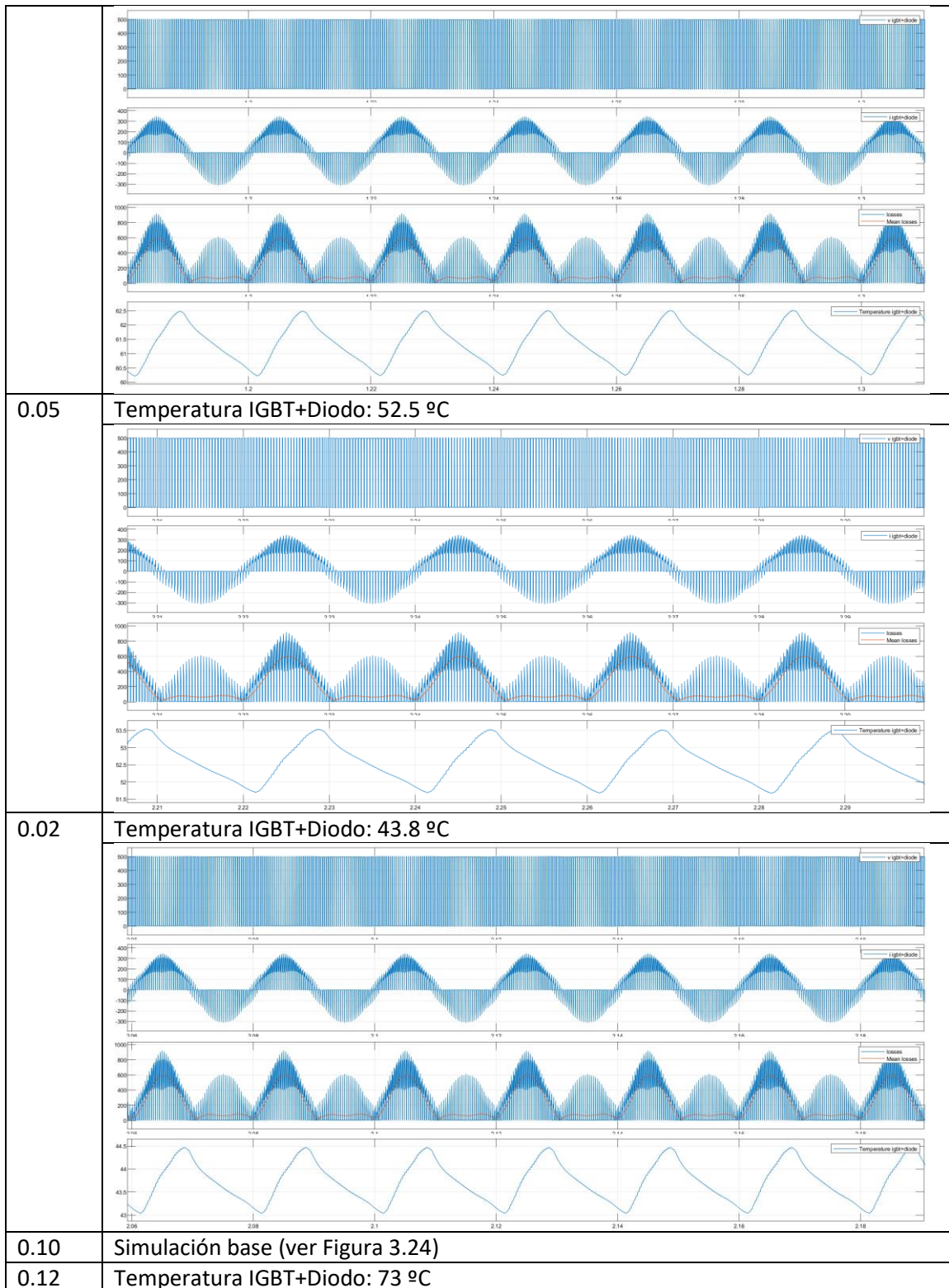


Figura 3.24 Resultados en régimen permanente, simulación base, en Simulink

Las Figuras 3.23-3.24 representan los resultados obtenidos para el caso base, donde se representa la situación en régimen transitorio, así como el régimen permanente del circuito. En estas gráficas se observa la temperatura máxima a la que llega el bloque de IGBT+Diodo, situada en 70°C, a la cual se llega tras un transitorio, como se muestra en las gráficas. Las pérdidas de conducción obtenidas se corresponden con las que se obtienen en PLECS, aunque las correspondientes al diodo deberían ser ligeramente mayores, al no tener la opción de parametrizar en el bloque de Simulink las pérdidas de energía de recuperación del diodo. En Simulink no es posible visualizar las pérdidas de conmutación del dispositivo, puesto que la conmutación se realiza únicamente en un paso de simulación, aunque estas pérdidas se tienen en cuenta al introducirlas en los parámetros de configuración del bloque en Simulink.

3.2.1. Variando el disipador térmico

Rth (K/W)	Resultados obtenidos
0.08	Temperatura IGBT+Diodo: 61.5 °C



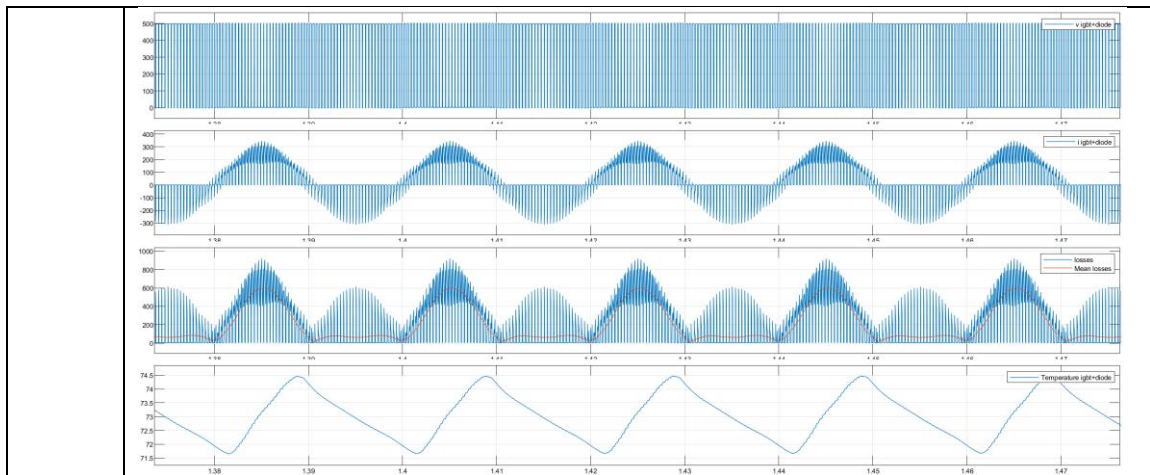
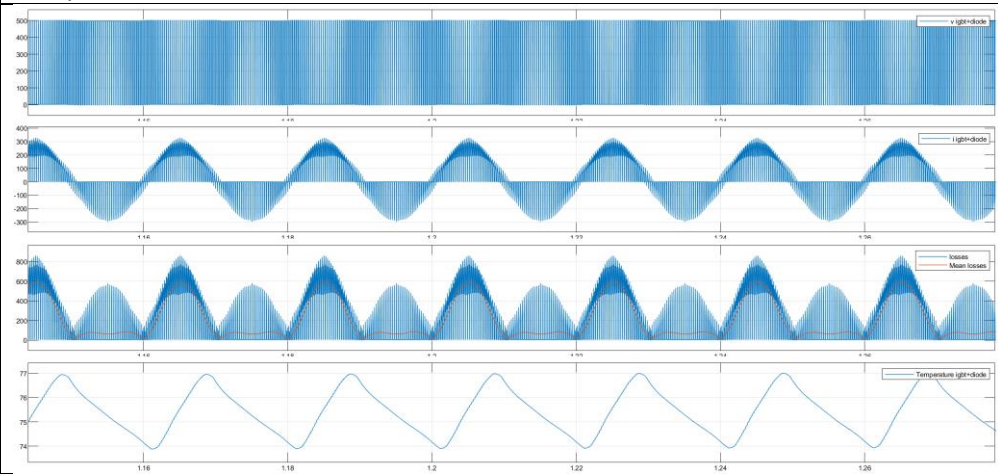
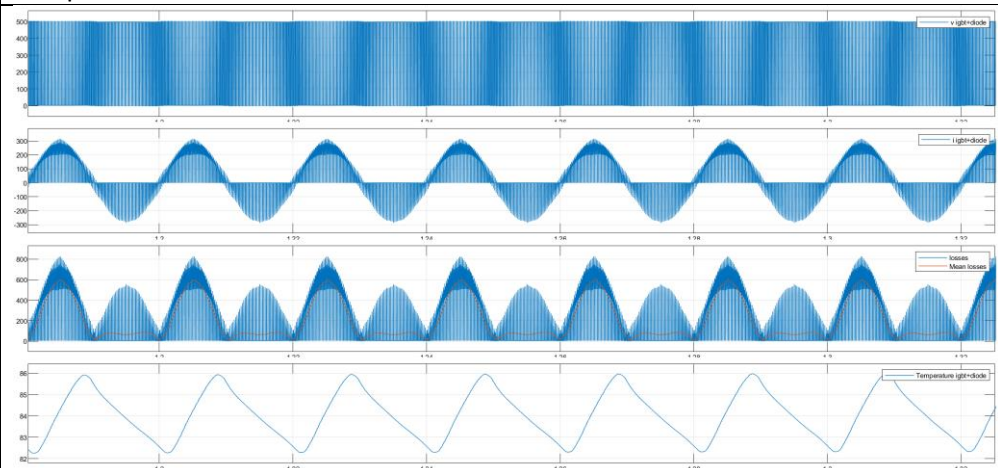


Tabla 3.4 Resultados variación Rth con Simulink

En Simulink se han obtenido unos resultados, dados en la Tabla 3.4, parecidos a los del Apartado 3.1.1 con PLECS. La temperatura varía, aumentando, con la resistencia térmica del disipador elegido. Posteriormente se verá un resumen comparativo entre los softwares utilizados para la simulación.

3.2.2. Variación de la frecuencia de conmutación

fs	Resultados obtenidos
3kHz	Simulación base (Figura 3.24)
4kHz	Temperatura IGBT+Diodo: 75 °C 
5kHz	Temperatura IGBT+Diodo: 84 °C 

--	--

Tabla 3.5 Resultados variación f_s con Simulink

De nuevo, los resultados obtenidos de estas simulaciones conforman que a mayor frecuencia de conmutación más pérdidas se producen en el inversor, llegando a temperaturas en régimen permanente más altas.

3.3. SEMIS de ABB

Como se ha explicado anteriormente, el software web de ABB nos permite la simulación de las pérdidas y temperatura de los semiconductores únicamente introduciendo los parámetros de operación del circuito, dados en la Tabla 3.1 para la simulación base. Todos los parámetros de pérdidas y modelado térmico son internos y no se pueden visualizar ni modificar utilizando esta herramienta.

En PLECS y Simulink se han realizado simulaciones empleando una modulación distinta a la SPWM, así como una simulación trabajando con m_a elevada para funcionar en onda cuadrada. SEMIS de ABB tiene una serie de limitaciones que no permiten realizar dichos experimentos, puesto que sólo se puede trabajar en zona lineal y modulación SPWM.

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas para la simulación base, donde se pueden ver las pérdidas por conducción y conmutación del IGBT y del diodo, así como sus temperaturas en régimen permanente.

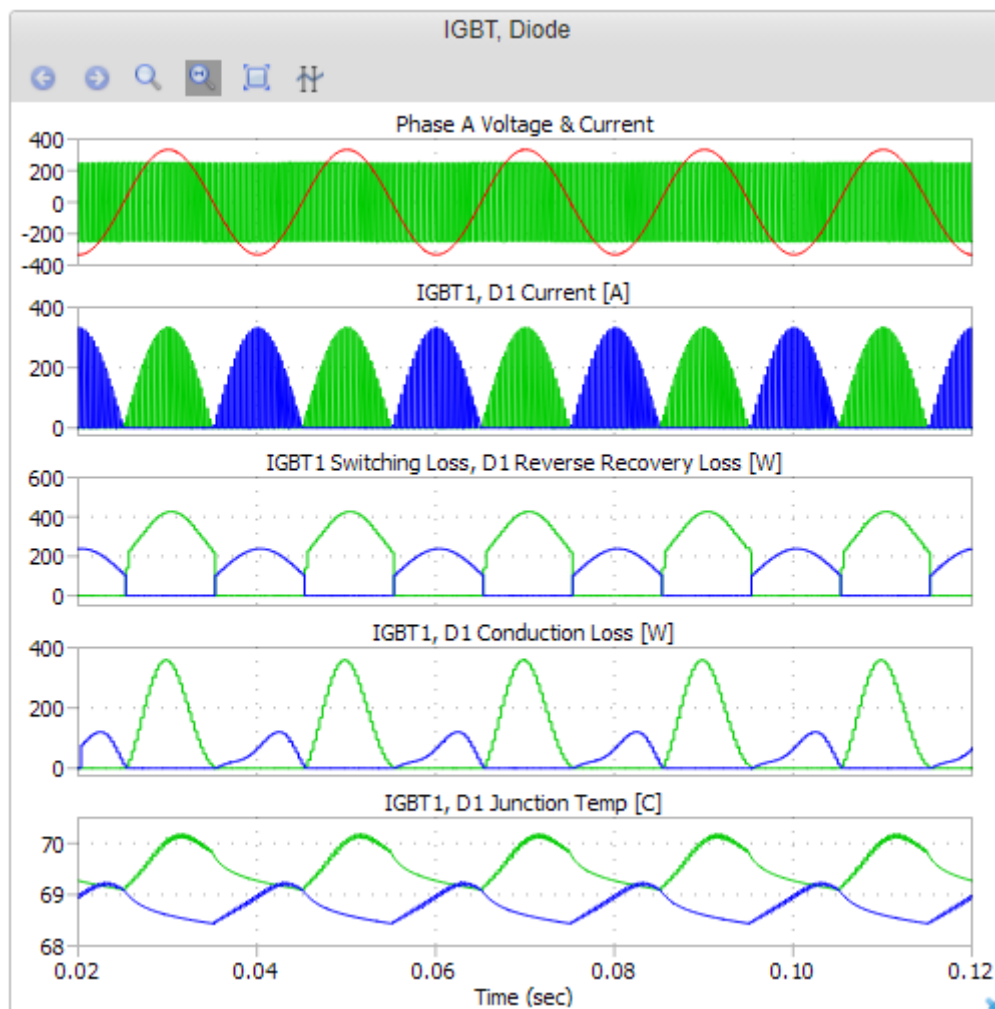
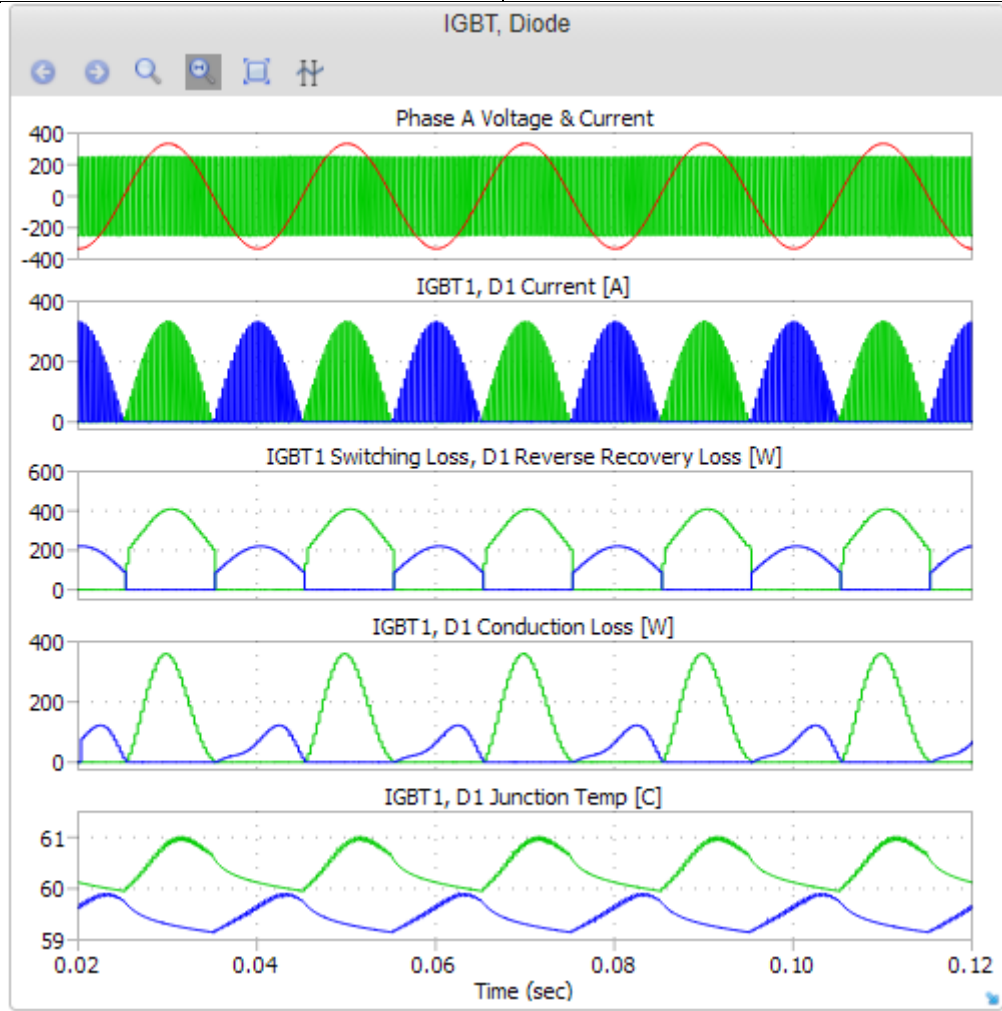


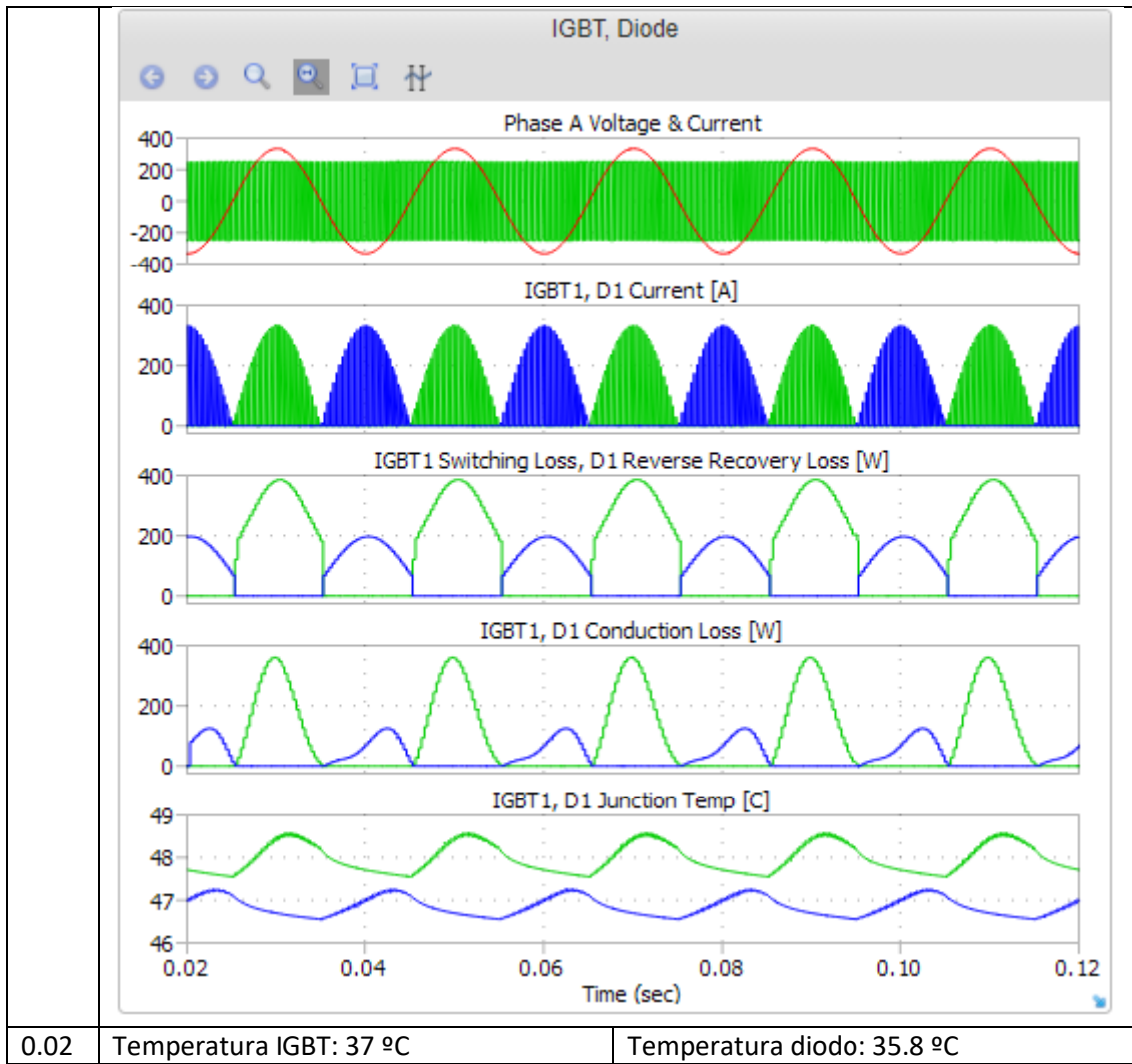
Figura 3.25 Resultados de simulación, simulación base, en SEMIS

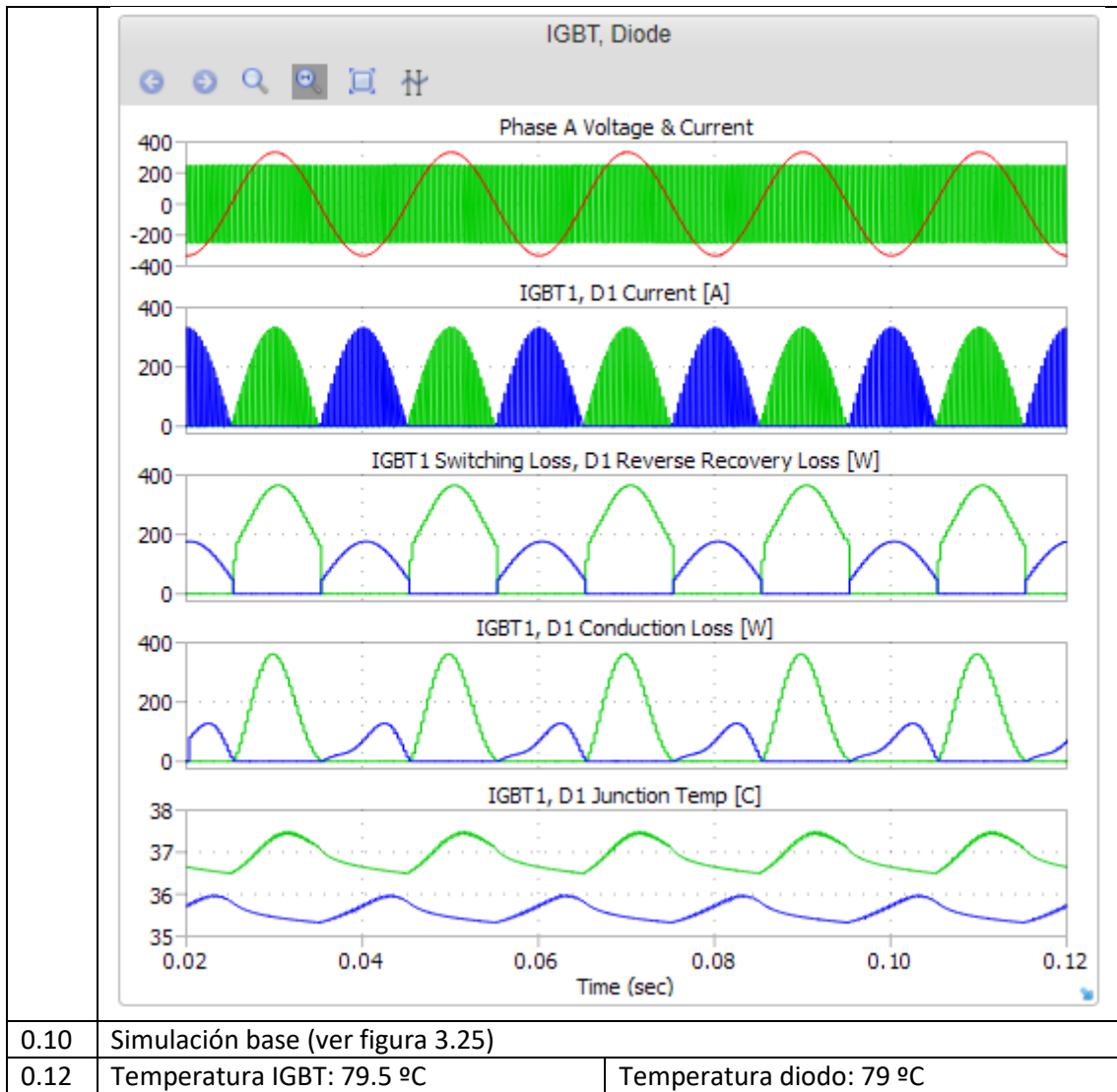
La forma de las pérdidas se corresponde con las obtenidas en PLECS y Simulink, aunque los valores no son exactamente iguales, puesto que los modelos introducidos en PLECS y Simulink varían ligeramente en comparación con el que usa ABB. También hay que tener en cuenta que no se pueden visualizar los parámetros internos usados por el SEMIS, por lo que no se sabe si estos coinciden estrictamente con los proporcionados en la ficha técnica del módulo.

La temperatura a la que llegan el IGBT y el diodo es de 70°C y 69 °C respectivamente, resultados que se corresponden con los obtenidos con los otros paquetes software.

3.3.1. Variación del disipador térmico

Rth (K/W)	Resultados obtenidos	
0.08	Temperatura IGBT: 60.5 °C	Temperatura diodo: 59.5 °C
	 <p>The figure displays six vertically stacked plots for a simulation with Rth = 0.08. The x-axis for all plots is 'Time (sec)' ranging from 0.02 to 0.12. <ul style="list-style-type: none"> Phase A Voltage & Current: Shows a red sinusoidal voltage waveform and a green current waveform. IGBT1, D1 Current [A]: Shows a blue current waveform for the IGBT and a green current waveform for the diode. IGBT1 Switching Loss, D1 Reverse Recovery Loss [W]: Shows a blue waveform for IGBT switching loss and a green waveform for diode reverse recovery loss. IGBT1, D1 Conduction Loss [W]: Shows a blue waveform for IGBT conduction loss and a green waveform for diode conduction loss. IGBT1, D1 Junction Temp [C]: Shows the temperature of the IGBT (blue) and diode (green) junctions, which fluctuate between approximately 59.5°C and 60.5°C. </p>	
0.05	Temperatura IGBT: 48 °C	Temperatura diodo: 47 °C





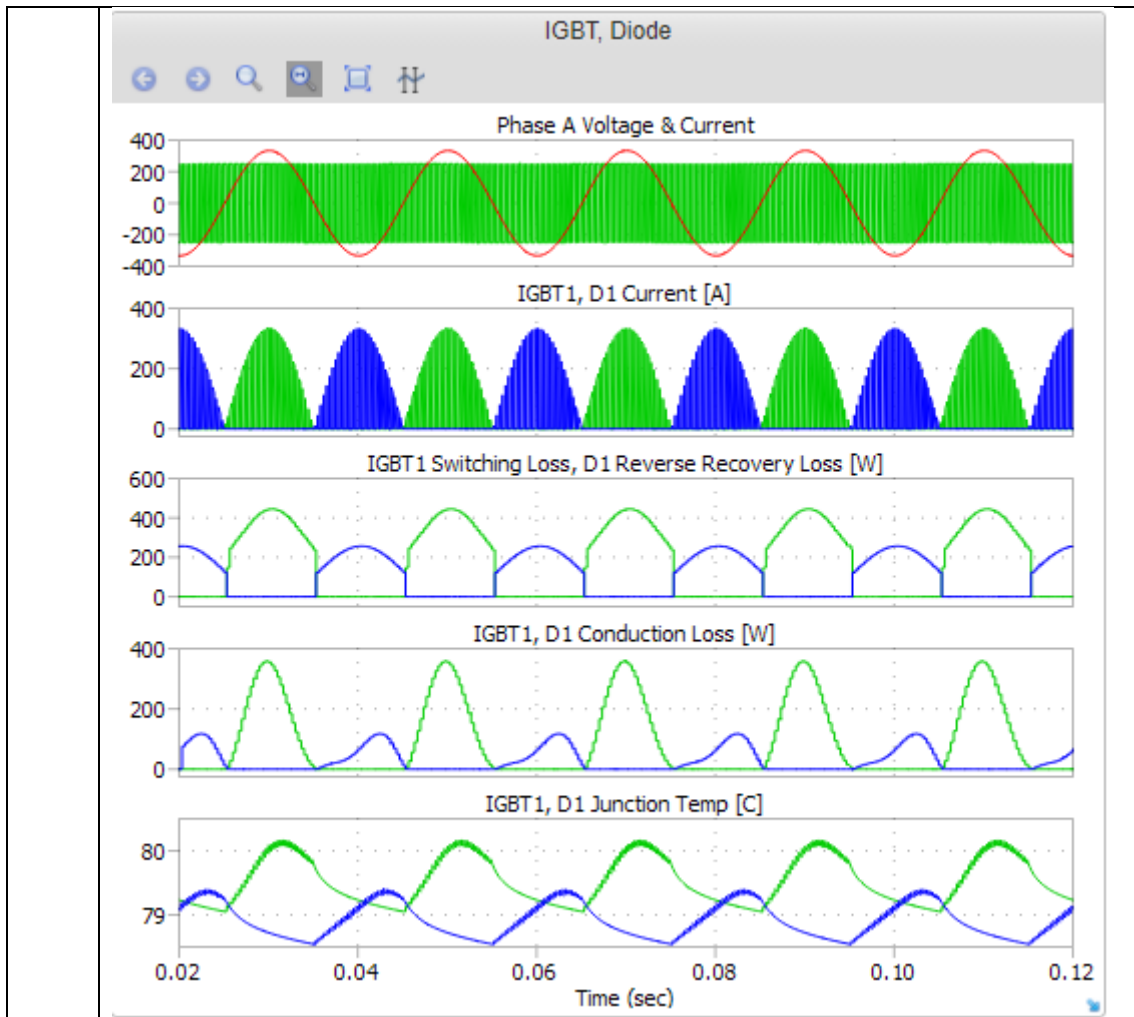
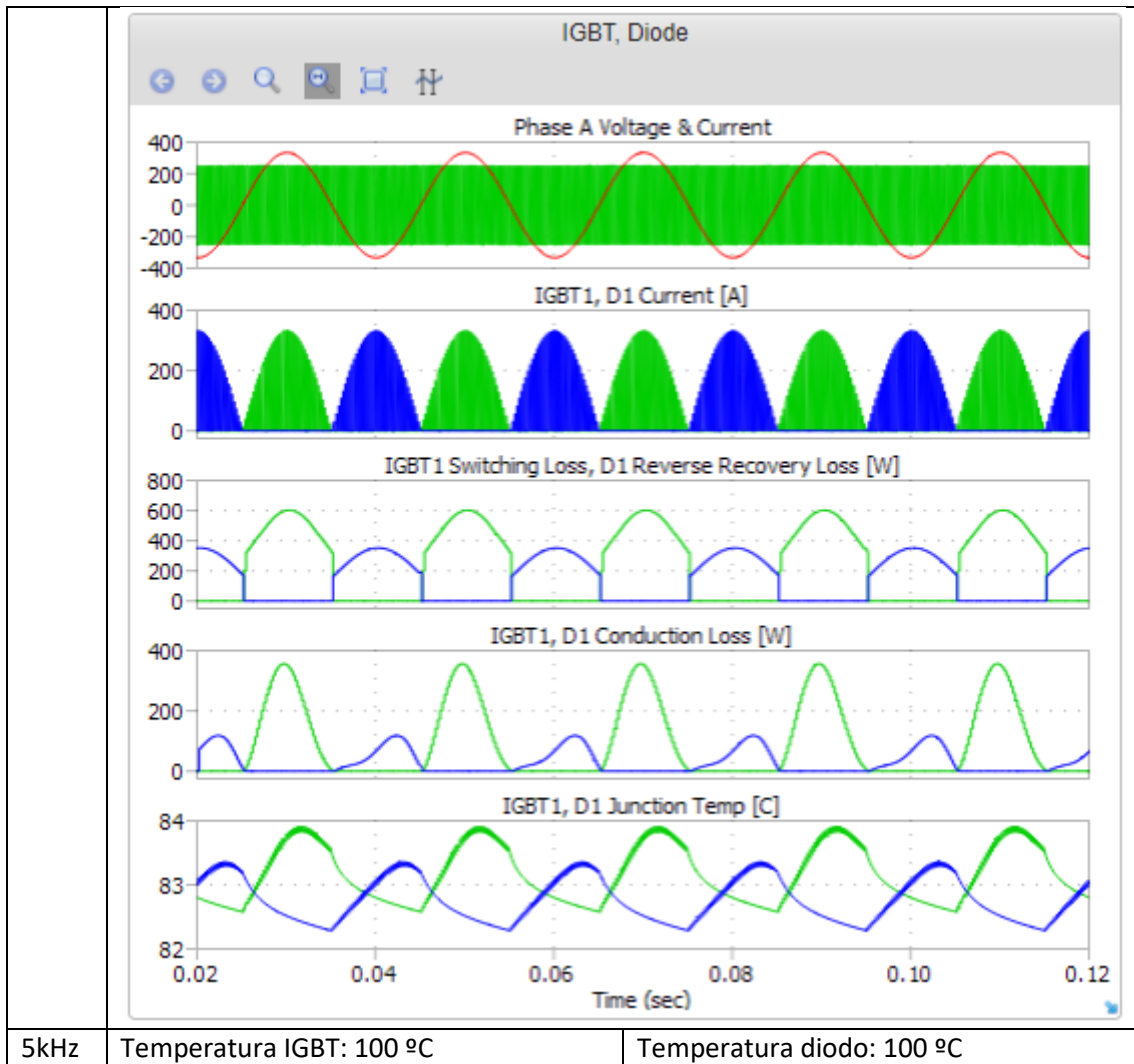


Tabla 3.6 Resultados variación Rth con SEMIS ABB

Los resultados dados en la Tabla 3.6 son los que se calculan por el software de ABB. Se asume que las características que utilizan son las que proporcionan en la ficha técnica, aunque se desconoce si se han realizado modificaciones internas de los componentes. Los datos obtenidos se asemejan a los que se han obtenido en PLECS y Simulink, como se podrá ver en la comparativa entre los distintos softwares que se realizará posteriormente.

3.3.2. Variando la frecuencia de conmutación

fs	Resultados obtenidos	
3kHz	Simulación base (Figura 3.25)	
4kHz	Temperatura IGBT: 83.5 °C	Temperatura diodo: 82.5 °C



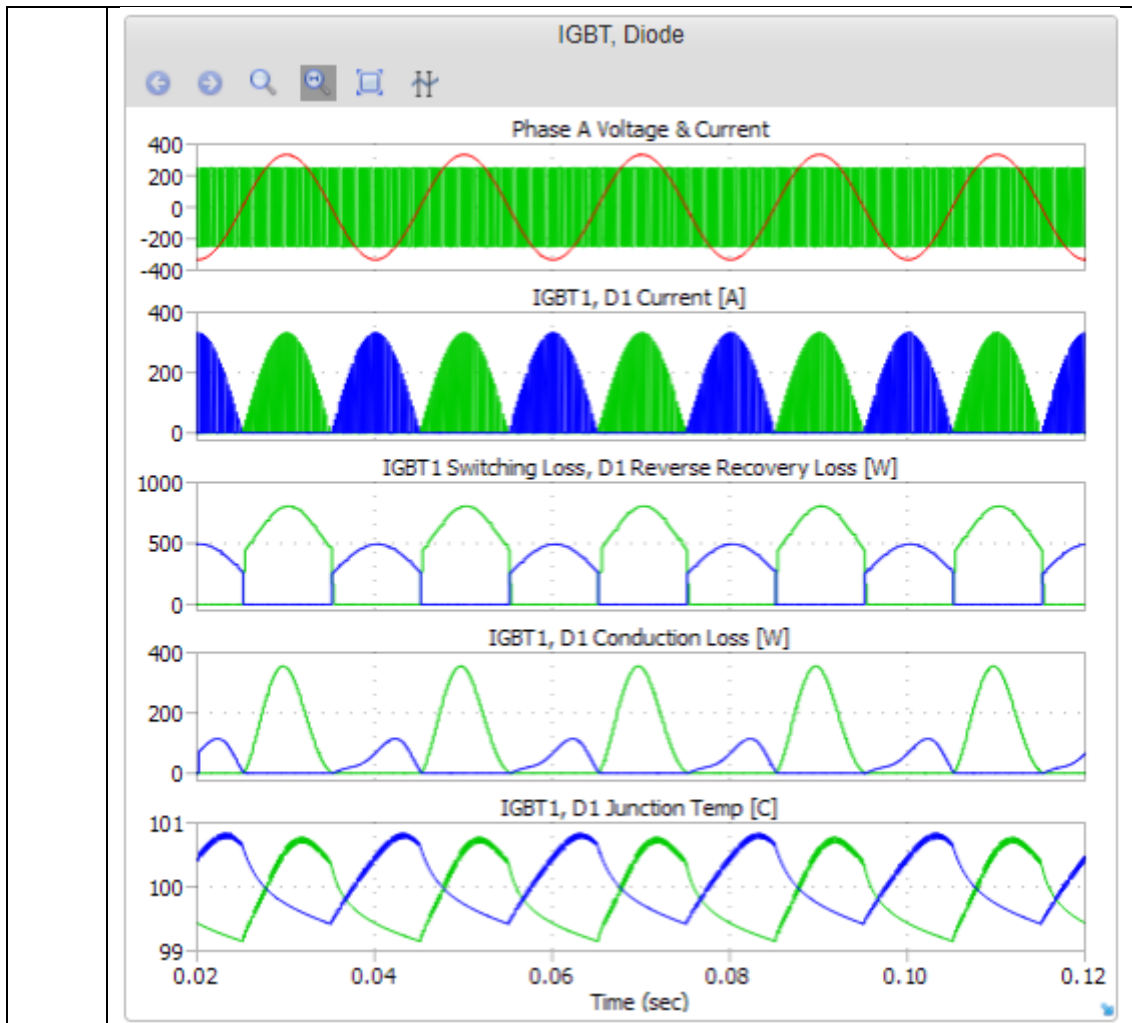


Tabla 3.7 Resultados variación f_s con SEMIS ABB

Se obtienen temperaturas de IGBT y diodo más altas a medida que aumenta la frecuencia de conmutación, como se ve en las gráficas de la Tabla 3.7. En SEMIS la frecuencia máxima de conmutación para este circuito está acotada entre 900-5000Hz. Por esta razón, no se realizarán simulaciones a frecuencias mayores que 5kHz.

3.4. Variación de la carga del inversor

Para esta simulación se realizará un estudio práctico para determinar la potencia máxima que puede entregar el inversor, con el modelo de IGBT+Diodo previamente usado y a una tensión $V_{dc}=500V$, empleando un disipador térmico de aire forzado de las siguientes características:

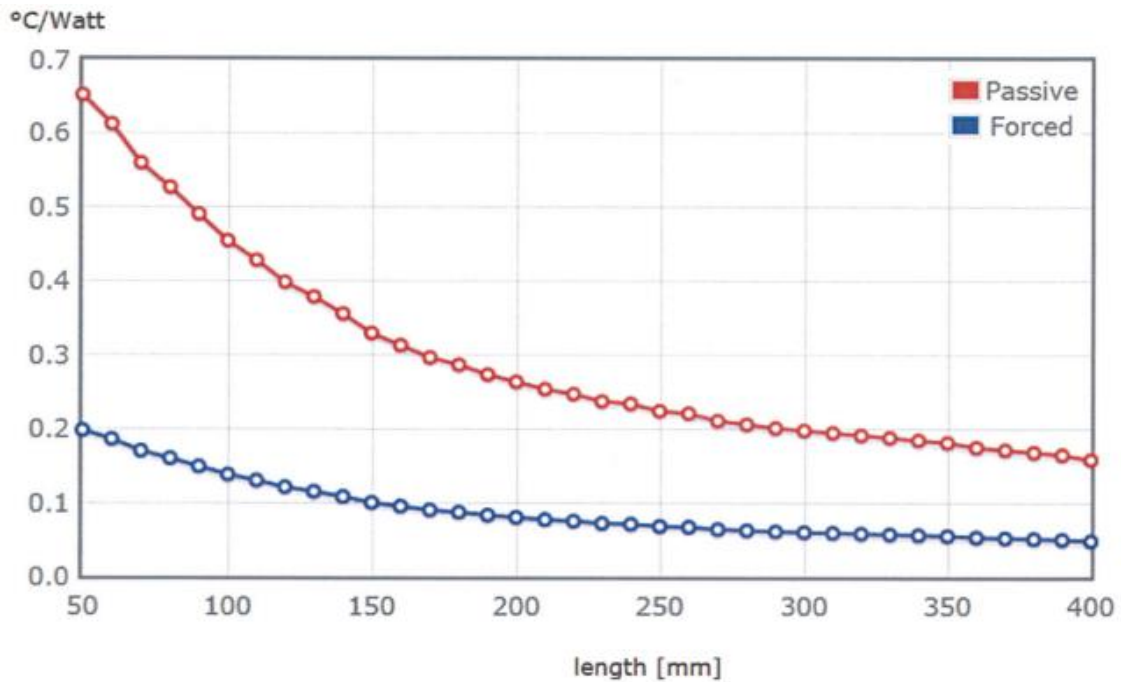


Figura 3.26 Resistencia térmica y longitud del disipador [19]

Se elegirá el modelo con aire forzado, entre los dos dados en la gráfica. Se trabajará con el disipador de 350mm de longitud, es decir, con una $R_{th} = 0.07 \text{ K/W}$. Las dimensiones totales del disipador serían de 350x215x77mm.

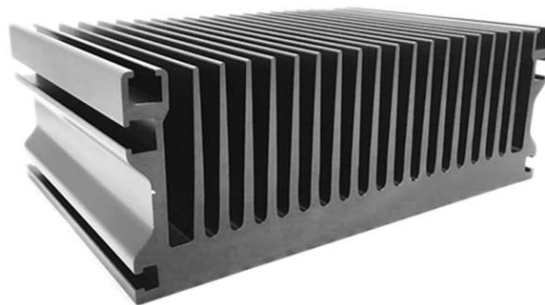


Figura 3.27 Disipador térmico de ABL 180AB1500B [20]

Para esta simulación se analizará la potencia máxima que puede entregar el inversor bajo las condiciones dadas, sin superar la temperatura máxima a la que pueden llegar los semiconductores. Para ello se trabajará inicialmente con una carga de $P = 25\text{kW}$ y $\text{PF} = 0.74$, y se añadirá más carga a la salida del inversor hasta llegar a una temperatura en régimen permanente cercana a los 125°C . En las Figuras 3.29-3.30, se muestran los resultados de pérdidas, corriente y temperatura de los dispositivos obtenidas simulando con Simulink y PLECS:

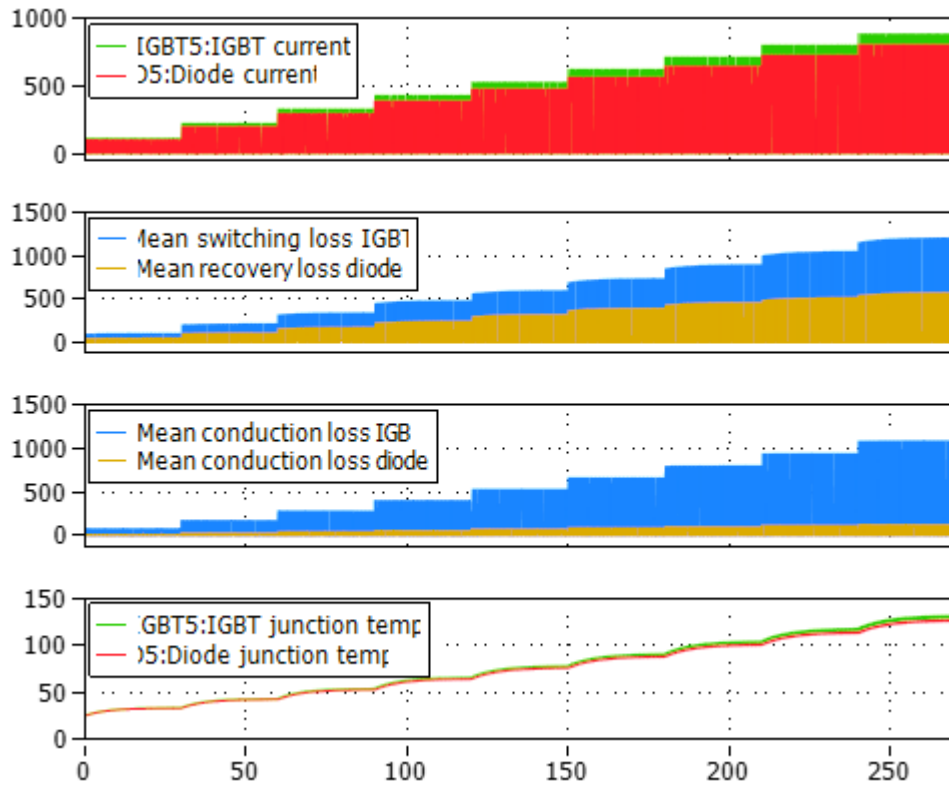


Figura 3.28 Resultados de la variación de carga en PLECS

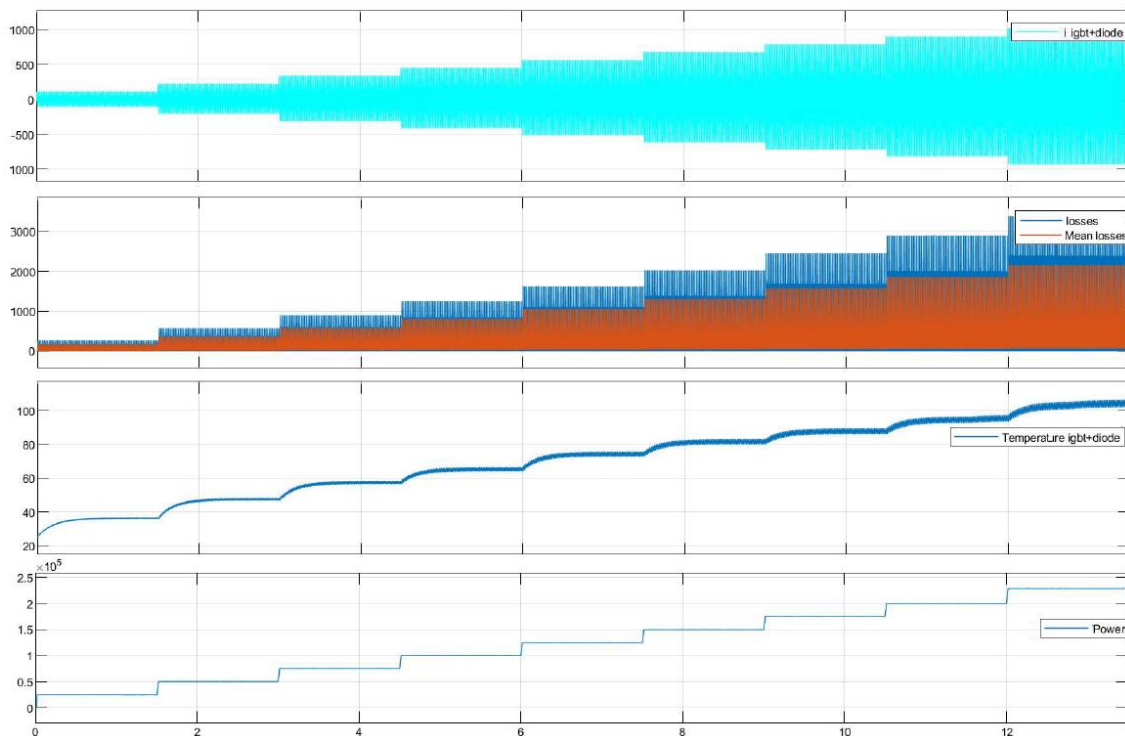


Figura 3.29 Resultados de la variación de carga en Simulink

Como se puede observar, se han añadido nueve escalones de 25kW cada uno, llegando a una carga máxima de 225kW de potencia activa. Se ha elegido este valor, puesto que los resultados obtenidos de temperatura se encuentran muy próximos al límite de temperatura marcado por

el fabricante. También se han evaluado los casos dados en SEMIS, recopilando los datos añadidos en un vector de datos en Matlab, para poder realizar una comparativa entre los tres softwares empleados.

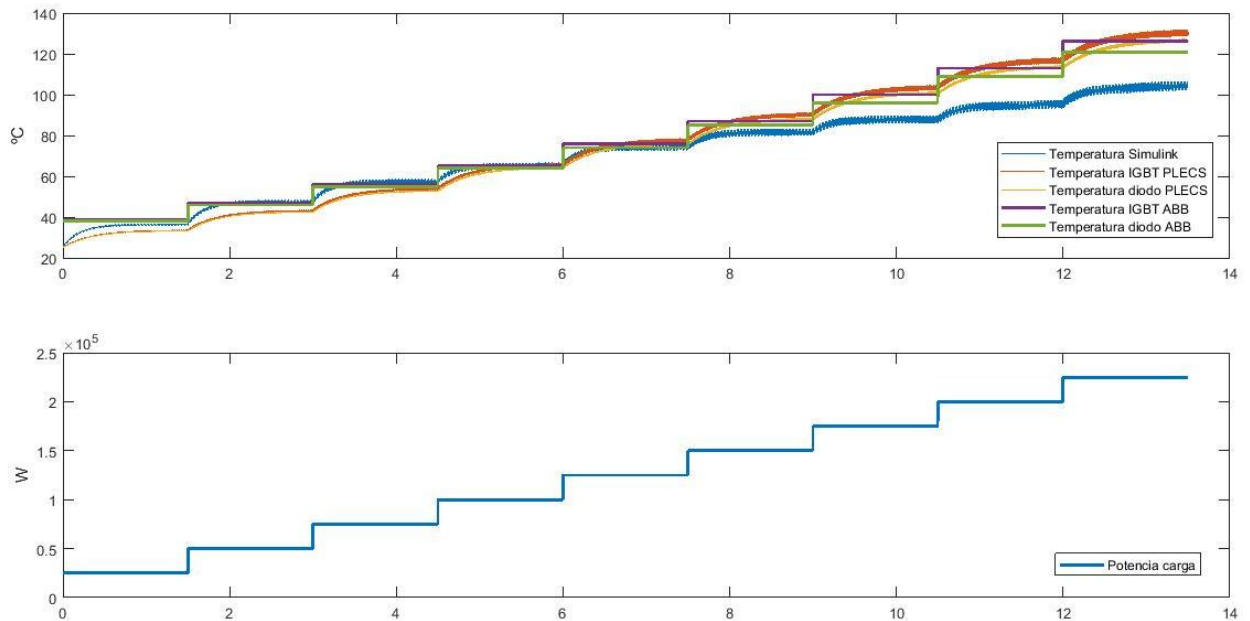


Figura 3.30 Comparativa de los resultados de Simulink, PLECS y SEMIS

Se puede observar cómo los resultados de temperatura obtenidos en PLECS y en SEMIS son muy parecidos, obteniendo una temperatura de 125°C aproximadamente en SEMIS y 130°C en PLECS para una potencia de 225kW. Este es el límite en el que podría funcionar el dispositivo, arriesgándose a una posible ruptura, por lo tanto, se recomendaría trabajar siempre a una potencia inferior a 200kW, con un factor de potencia de 0.74 y bajo las condiciones específicas de funcionamiento evaluadas en esta simulación.

En cuanto a los resultados obtenidos en Simulink, estos varían de los extraídos de los otros paquetes software. Como se ha comentado anteriormente, en Simulink se ha empleado un modelo de IGBT+Diodo el cual no permite introducir todos los datos de pérdidas del diodo. Este hecho no supone un error grave trabajado a potencias menores, pero a medida que la potencia crece, también crecen las pérdidas, alejándose el modelo simulado del real. Debido a este motivo, las temperaturas a partir de 175kW no se corresponden con las de PLECS y ABB. Se aprecia que a potencias más bajas el funcionamiento del modelo elaborado es bastante fiable.

3.5. Comparativa de paquetes de simulación

En este apartado se comentarán algunas de las características que poseen los paquetes software utilizados, así como las diferencias que presentan entre sí y las posibles ventajas y desventajas.

3.5.1. Facilidad de configuración

En cuanto a la configuración básica de la simulación, PLECS y Simulink tienen prácticamente el mismo menú de configuración, donde se puede elegir el tiempo de simulación, el paso de simulación, tolerancia, tipo de solver etc. Se pueden ver estos menús en las Figuras 3.32-3.33.

Como se puede observar Matlab tiene algunas funciones adicionales que PLECS no posee, pero que no se han modificado en este trabajo.

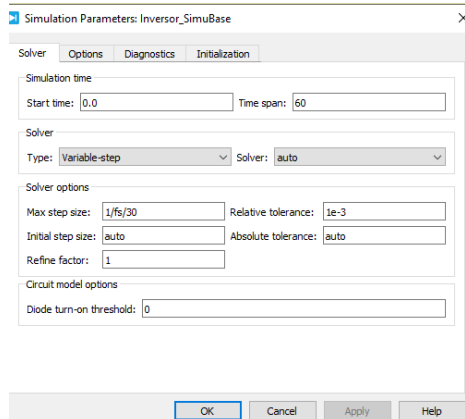


Figura 3.31 Configuración de parámetros PELCS

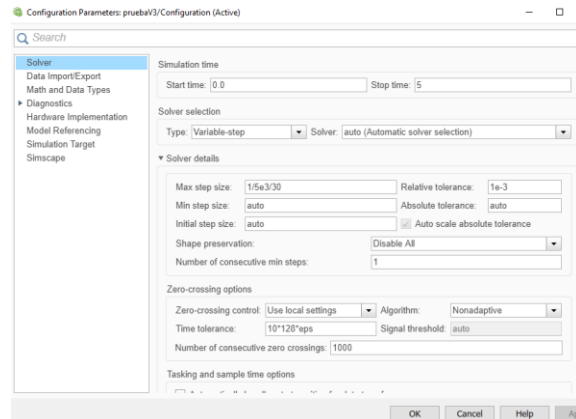


Figura 3.32 Configuración de parámetros Simulink

Por otra parte, en SEMIS no se pueden elegir los parámetros de la simulación, puesto que son datos internos a los que el usuario no tiene acceso.

3.5.2. Resultados

Se representan en las tablas dadas a continuación los valores obtenidos de cada simulación, según el software empleado. También se ha calculado el error relativo, según la expresión X, asumiendo que los resultados más correctos son los proporcionados por SEMIS, puesto que son los del fabricante y tienen información más completa sobre el dispositivo.

$$\varepsilon_{\%} = \frac{|V_{ideal} - V_{real}|}{V_{ideal}} \cdot 100 \tag{21}$$

- Variando Rth

Rth (K/W)		0.02	0.05	0.08	0.1	0.12
PLECS	IGBT	40.8 °C	49 °C	57.5 °C	64 °C	70.5 °C
	ε_{IGBT}	10%	2%	5%	9%	11%
	Diodo	39.8 °C	47.5 °C	56.5 °C	62.5 °C	69.5 °C
	ε_{Diodo}	11%	1%	5%	9%	12%
Simulink	IGBT+Diodo	43.8 °C	52.5 °C	61.5 °C	70 °C	73 °C
	$\varepsilon_{IGBT+Diodo}$	18%	9%	2%	0%	8%
SEMIS ABB	IGBT	37 °C	48 °C	60.5 °C	70 °C	79.5 °C
	Diodo	35.8 °C	47 °C	59.5 °C	69 °C	79 °C

Tabla 3.8 Resumen de los resultados de temperatura obtenidos variando Rth

- Variando fs

fs (Hz)		3k	4k	5k
PLECS	IGBT	64 °C	74 °C	86 °C
	ε_{IGBT}	9%	11%	14%
	Diodo	62.5 °C	73 °C	85 °C
	ε_{Diodo}	9%	12%	15%
Simulink	IGBT+Diodo	70 °C	75 °C	84 °C
	$\varepsilon_{IGBT+Diodo}$	0%	10%	16%
SEMIS ABB	IGBT	70 °C	83.5 °C	100 °C
	Diodo	69 °C	82.5 °C	100 °C

Tabla 3.9 Resumen de los resultados de temperatura obtenidos variando fs

En cuanto a los resultados mostrados en la Tabla 3.8, se puede determinar que para disipadores con resistencia entre 0.05K/W y 0.1K/W el error se puede considerar pequeño en comparación con los resultados obtenidos en SEMIS. Si seguimos aumentando el valor del disipador, las pérdidas serán mayores y el error se incrementará, al no disponer de datos suficientes para un modelo térmico más detallado. El mayor error obtenido, de 18%, se da para un disipador con $R_{th}=0.02K/W$ simulando con Simulink. La desventaja principal del modelo utilizado en Simulink es que se ha utilizado un módulo conjunto para IGBT+Diodo, en el que no se pueden introducir detalladamente los datos de recuperación inversa del diodo, diferenciándose de esta manera del dispositivo real.

Respecto a la frecuencia de conmutación utilizada, los resultados obtenidos en Simulink y PLECS, dados en la Tabla 3.9, se ajustan mejor a los de SEMIS para una frecuencia de 3kHz, siendo el error en el caso de PLECS menor que el 10% y en el caso de Simulink el resultado es idéntico al de SEMIS. Al aumentar la frecuencia de conmutación se esperan mayores pérdidas en el inversor, por tanto, mayores temperaturas de los dispositivos. El error para una $f_s=5kHz$ es del 15% aproximadamente tanto en Simulink como en PLECS. Este error es relativamente alto en comparación con las otras simulaciones debido a lo comentado anteriormente que las pérdidas aumentan y también las diferencias entre el modelo empleado en simulación y el modelo real, del cual no se dispone de todos los datos necesarios para un modelo exacto en simulación.

3.5.3. Tiempo que tarda en simular

El tiempo real que tarda una simulación en ejecutarse permite al usuario obtener resultados más rápido o lento. Este tiempo varía según las características del software que estamos usando, la complejidad del modelo simulado y la capacidad del ordenador, entre otros factores.

En Simulink una simulación como la que se ha empleado para este trabajo puede necesitar un tiempo real de 7 minutos y 22 segundos necesarios para completar la simulación, utilizando el modo de simulación normal. Simulink permite la ejecución de una simulación en modo acelerado, lo cual supondría un tiempo real de simulación de 6 minutos y 45 segundos.

En PLECS existe una herramienta que permite la simulación del circuito modelado directamente en régimen permanente. Esta herramienta permite la realización de una simulación muy rápida, y a la vez, muy completa, del sistema, que nos proporciona todos los resultados buscados. Se puede configurar el número de ciclos que se desea visualizar, indicando el periodo del sistema, y el 'step size'. Para una simulación de 5 ciclos de reloj, con la configuración dada en Figura 3.34, se emplea un tiempo real de 9.34 segundos para completar la simulación.

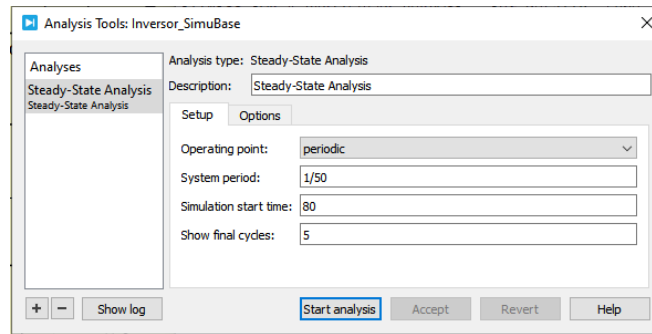


Figura 3.33 Configuración del análisis en régimen permanente PLECS

La desventaja que tendría esta herramienta es que no se puede ver la evolución del sistema en régimen transitorio. También existe la simulación regular, en la que se fijan los parámetros de tiempo que se requiera simular y de este modo, se puede ver el desarrollo en régimen transitorio del sistema. Esta simulación requiere un tiempo real de 5 minutos 20 segundos necesarios para que el sistema se estabilice.

4. Conclusiones generales y trabajos futuros

4.1. Conclusiones generales

El objetivo principal de este trabajo era realizar un análisis de las prestaciones que poseen distintos softwares de simulación, para poder determinar los aspectos más relevantes a tener en cuenta para elegir una herramienta para realizar el análisis térmico de un convertidor. Para ello, se ha enfocado el trabajo en la implementación de las características térmicas de un inversor trifásico.

En primer lugar, se ha elegido un modelo de IGBT + diodo, del fabricante ABB, y se han introducido sus características térmicas en Simulink y PLECS. Ambos paquetes software presentan herramientas de configuración sencillas que permiten importar los datos de pérdidas y los modelos térmicos, aunque PLECS permite la utilización de una herramienta gráfica para incorporar dichos datos, proporcionados por el fabricante en forma de gráficas. Esta funcionalidad de PLECS facilita el trabajo del usuario, permitiendo una precisión mayor que en caso de tener que estimar datos de la gráfica para poder introducirlos en forma de array de números. En cuanto a la configuración general de la simulación, tanto PLECS como Simulink tienen un menú parecido para los parámetros de simulación, mientras que SEMIS no permite cambiar la configuración de la simulación.

Como se ha comentado anteriormente, PLECS dispone de una funcionalidad que permite realizar un análisis del sistema directamente en régimen permanente. Es la opción más rápida para conocer el comportamiento del inversor, ya que la simulación regular tarda varios minutos en ejecutarse, mientras que este análisis tarda unos segundos únicamente.

Las simulaciones realizadas variando los parámetros base tenían como objetivo evaluar la precisión del modelo bajo distintas condiciones. Se ha demostrado que para frecuencias de conmutación más bajas y resistencias térmicas medias el modelo tiene menor error. Si se aumenta la frecuencia de conmutación o la resistencia térmica del disipador empleado las pérdidas son mayores, por tanto, mayor será la diferencia entre el modelo real y el simulado. Este hecho se cumple sobre todo en Simulink, puesto que el modelo se basa en un bloque de IGBT+ Diodo que no permite introducir todos los parámetros dados por el fabricante, siendo, por tanto, el modelo más inexacto que en PLECS, donde se han podido incorporar más datos de pérdidas de los semiconductores. Los datos que no se han podido tener en cuenta en Simulink son los de la recuperación inversa del diodo, por tanto, las pérdidas simuladas del diodo serán menores que las reales y la temperatura obtenida en simulación también.

En la última parte del trabajo se ha realizado una simulación variando la carga del inversor, con el objetivo de obtener la potencia máxima que podría entregar el convertidor para un caso práctico con un disipador térmico real elegido previamente. Este estudio ha mostrado que, bajo las condiciones dadas, la potencia máxima recomendable sería de 200kW con un $FP=0.74$. En estas condiciones no se superaría la temperatura máxima de los semiconductores de 125°C. Los resultados obtenidos en PLECS son prácticamente idénticos a los extraídos del software de ABB, con una diferencia de 4°C, mientras que los de Simulink se alejan un poco, como se puede ver en la Figura 3.31. Esto se debe a lo comentado anteriormente del modelo de pérdidas del diodo en Simulink.

En líneas generales SEMIS permitiría realizar un análisis rápido del sistema sin complicaciones de montaje y cálculos, pero tiene limitaciones que únicamente permiten trabajar con la

modulación SPWM y en zona lineal, siendo imposible usarlo para aplicaciones más sofisticadas, en caso de ser necesario.

4.2. Trabajos futuros

Este proyecto se ha realizado con los datos proporcionados por el fabricante del módulo de IGBT+Diodo proporcionados en la ficha técnica del dispositivo. En algunas ocasiones se han necesitado datos adicionales que no estaban disponibles en la ficha técnica y se ha tenido que realizar una interpolación de los parámetros existentes para poder tener un modelo más exacto del sistema. Con el objetivo de mejorar este modelo se podría buscar un modelo más completo de ficha técnica de semiconductores o pedir más información al fabricante de los datos que no están del todo especificados.

Se podría realizar el trabajo combinando distintos softwares, como PSPICE para modelar las pérdidas del circuito, y, posteriormente Simulink para representar el modelo térmico con los datos que ha proporcionado PSPICE.

Otra tendencia a analizar sería el empleo de modelos simplificados de los dispositivos para la estimación de las pérdidas de conmutación [21].

5. Presupuesto

En esta parte del proyecto se realizará una estimación del coste que conlleva la ejecución del trabajo.

Coste Hardware

Material	Precio unitario	Unidades	Precio total (tiempo de uso para amortización en 4 años)
Ordenador ASUS F555L	600 €	1	150 €

Tabla 5.1 Costes de material hardware

Costes Software

A continuación, se especifica el material software empleado para la realización del Trabajo Fin de Máster. Los distintos softwares han sido usados durante un año, siendo por tanto el coste reflejado el correspondiente a la licencia anual de cada uno.

Material	Precio (coste de licencia para el tiempo usado)
Microsoft Word 2016	50 €
PLECS	1.200 €
Matlab	2.000 €
SEMIS	-

Tabla 5.2 Costes de material software [22], [23]

Costes de personal

Se supone un sueldo medio de Ingeniero Industrial de 80 euros por hora.

Material	Precio/hora	Horas	Subtotal
Análisis de conceptos teóricos	80 €/hora	60 horas	4.800 €
Simulaciones con PLECS, SEMIS y Simulink	80 €/hora	180 horas	14.400 €
Documentación y redacción del Trabajo Fin de Máster	80 €/hora	80 horas	6.400 €

Tabla 5.3 Costes de personal

Costes de ejecución totales

Se establecen los gastos por honorarios facultativos en un 0,255% sobre el total de costes de personal y material, según el Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid, puesto que el proyecto no supera los 30.050€.

Material	Subtotal
Costes hardware	150 €
Costes software	3.250 €
Costes de personal	25.600 €
Subtotal final	29.000 €
Gastos por honorarios facultativos	73,95 €
Total (sin IVA)	29.073,95 €
Total (con IVA 21%)	35.179,48 €

Tabla 5.4 Costes de ejecución totales

Bibliografía

- [1] J. U. Ureña *et al.*, *Electrónica de potencia*. 1999.
- [2] F. González *et al.*, "Output voltage control," *Qual. Res. Psychol.*, vol. 0, no. 2, pp. 47–54, 2006.
- [3] E. Demirkutlu and A. M. Hava, "Output Voltage Control of A Four-Leg Inverter Based Three-Phase UPS by Means of Stationary Frame Resonant Filter Banks," no. December 2014, 2007, doi: 10.1109/IEMDC.2007.382785.
- [4] A. B. B. Hipak and I. Module, "5Sna 1600N170100," no. 5, pp. 1–9, 2020.
- [5] J. Berner, "Load-cycling capability of HiPak IGBT modules."
- [6] L. Franquelo, "Control térmico de los semiconductores de potencia," pp. 1–23.
- [7] K. Ma, N. He, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Frequency-Domain Thermal Modeling and Characterization of Power Semiconductor Devices," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 10, pp. 7183–7193, 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2509506.
- [8] "Thermal design and temperature ratings of IGBT modules."
- [9] "Transient thermal measurements and thermal equivalent circuit models."
- [10] S. H.J., D. T.R., N. R., J. J., and P. R.E., "Three-dimensional imaging of the lower esophageal sphincter in gastroesophageal reflux disease," *Ann. Surg.*, vol. 214, no. 4, pp. 374–384, 1991.
- [11] S. S. Khaleduzzaman, M. R. Sohel, R. Saidur, and J. Selvaraj, "Convective performance of 0.1 % volume fraction of TiO₂/water nanofluid in an electronic heat sink," *Procedia Eng.*, vol. 105, no. December, pp. 412–417, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.05.027.
- [12] U. M. Version, "the Simulation Platform for Power Electronics Systems."
- [13] "Thermal Simulation | Plexim." [Online]. Available: <https://www.plexim.com/products/plecs/thermal>. [Accessed: 14-Apr-2021].
- [14] "Simscape - MATLAB & Simulink." [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/products/simscape.html>. [Accessed: 15-Apr-2021].
- [15] "Revista ABB 3/2008 Electrónica de potencia," 2008.
- [16] "SEMIS." [Online]. Available: <https://www.hitachiabb-powergrids.com/offering/product-and-system/semiconductors/semis>. [Accessed: 13-Apr-2021].
- [17] "SEMIS4 - 3Phase 2 Level VSC." [Online]. Available: <https://www.hitachiabb-powergrids.com/offering/product-and-system/semiconductors/semis-models/semis4>. [Accessed: 13-Apr-2021].
- [18] SEMIS, "SEMIS Simulation Tool Three Phase 2-level VSC with IGBT User manual," 2020.
- [19] ABL, "Heatsink, Universal Rectangular Alu, 0.1°C/W, 150 x 215 x 77mm, PCB Mount." .
- [20] RS, "180AB1500B ABL Components | Heatsink, Universal Rectangular Alu, 0.1°C/W, 150 x 215 x 77mm, PCB Mount | 903-3147 | RS Components." [Online]. Available: <https://cl.rsdelivers.com/es//product/abl-components/180ab1500b/disipador-para-usar-con-aluminio-rectangular-01c/w-150-x-215-x-77mm/9033147>. [Accessed: 30-Jun-2021].

- [21] R. Stark, I. Kovacevic-badstuebner, A. Tsibizov, N. Nain, and U. Grossner, "Estimation of Switching Losses using Simplified Compact Models for SiC Power MOSFETs," no. 1.
- [22] "Pricing and Licensing - MATLAB & Simulink." [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/pricing-licensing.html>. [Accessed: 13-Jul-2021].
- [23] "Academic Price List | Plexim." [Online]. Available: <https://www.plexim.com/store/academic>. [Accessed: 13-Jul-2021].

6. Anexos

Anexo I: Manual de usuario

En este apartado se va a detallar cómo está estructurada la carpeta del proyecto, con el objetivo de facilitar el uso de este al usuario.

Matlab

En la interfaz de Matlab se emplea un script con una serie de datos base, necesarios para la ejecución de las simulaciones de este Trabajo.

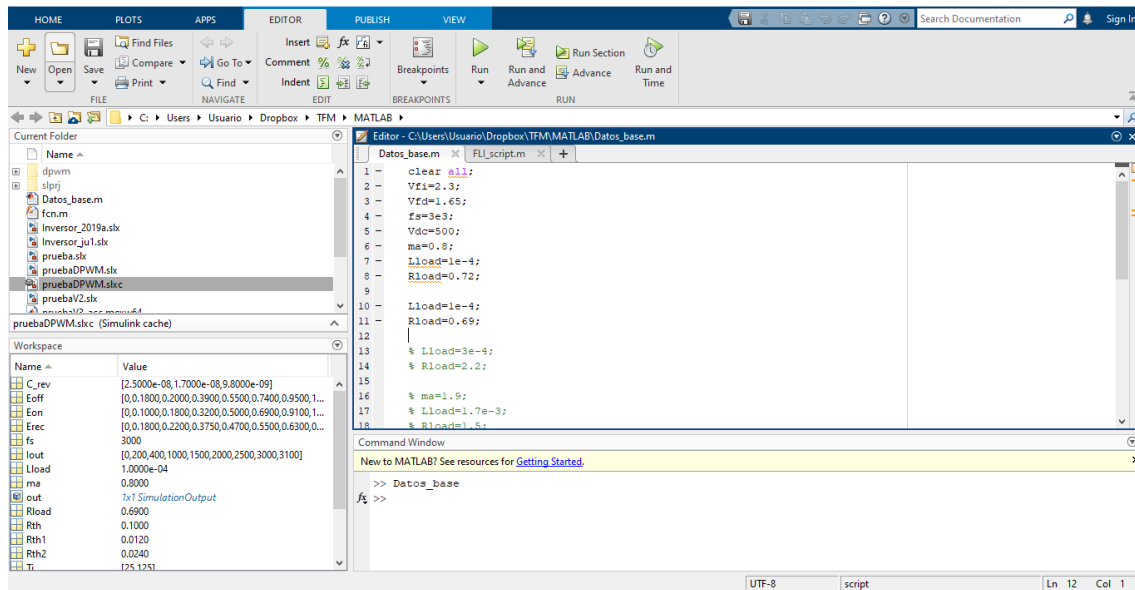


Figura 6.1 Interfaz de Matlab, script con datos base

A continuación, se citará el código del archivo de datos base.

clear all;

Vfi=2.3;

Vfd=1.65;

fs=3e3;

Vdc=500;

ma=0.8;

Lload=1e-4;

Rload=0.72;

Lload=1e-4;

Rload=0.69;

% Lload=3e-4;

```
% Rload=2.2;
```

```
% ma=1.9;
```

```
% Lload=1.7e-3;
```

```
% Rload=1.5;
```

```
%Thermal
```

```
Rth1=0.012;
```

```
Rth2=0.024;
```

```
Rth=0.1;
```

```
%Configuracion IGBT
```

```
Tj=[25, 125];
```

```
Iout=[0, 200, 400, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3100];
```

```
Eon=[0, 0.1, 0.18, 0.32, 0.5, 0.69, 0.91, 1.3, 1.4];
```

```
Eoff=[0, 0.18, 0.2, 0.39, 0.55, 0.74, 0.95, 1.26, 1.35];
```

```
Von=[0, 1, 1.2, 1.8, 2.25, 2.5, 2.8, 3.15, 3.22;0, 0.8, 1.15, 2.05, 2.5, 2.9, 3.35, 3.8, 3.9];
```

```
Erec=[0,0.18,0.22,0.375,0.47,0.55,0.63,0.66,0.67];
```

```
%Configuracion Diodo
```

```
V_rev=[1, 5, 35];
```

```
C_rev=[75-50, 35-18, 15-5.2]*1e-9;
```

```
% tic
```

```
%sim('pruebaV3.slx')
```

```
% toc
```

En la carpeta se encuentran los archivos de simulación correspondientes a todas las simulaciones realizadas durante el proyecto. En la Tabla 6.1 se cita la funcionalidad de cada archivo de simulación.

Nombre del archivo	Funcionalidad
Simu_Base	Simulación que contiene el circuito del inversor trifásico, con sus correspondientes bloques para realizar los cálculos de temperatura y pérdidas necesarios para el TFM.
Simu_VariandoCarga	Simulación que contiene el circuito del inversor trifásico con una serie de cargas, en forma de escalón, que se irán añadiendo a medida que se realiza la simulación, para ver el comportamiento del sistema bajo una carga determinada.
Simu_DPWM	Simulación en la que se emplea la modulación DPWM.

Tabla 6.1 Simulaciones realizadas en Matlab

En el código del script se encuentran todos los datos necesarios para las simulaciones, algunos están comentados y se emplearán únicamente para una simulación específica.

Una vez abierta la simulación se encuentra el diagrama dado en la Figura 6.2.

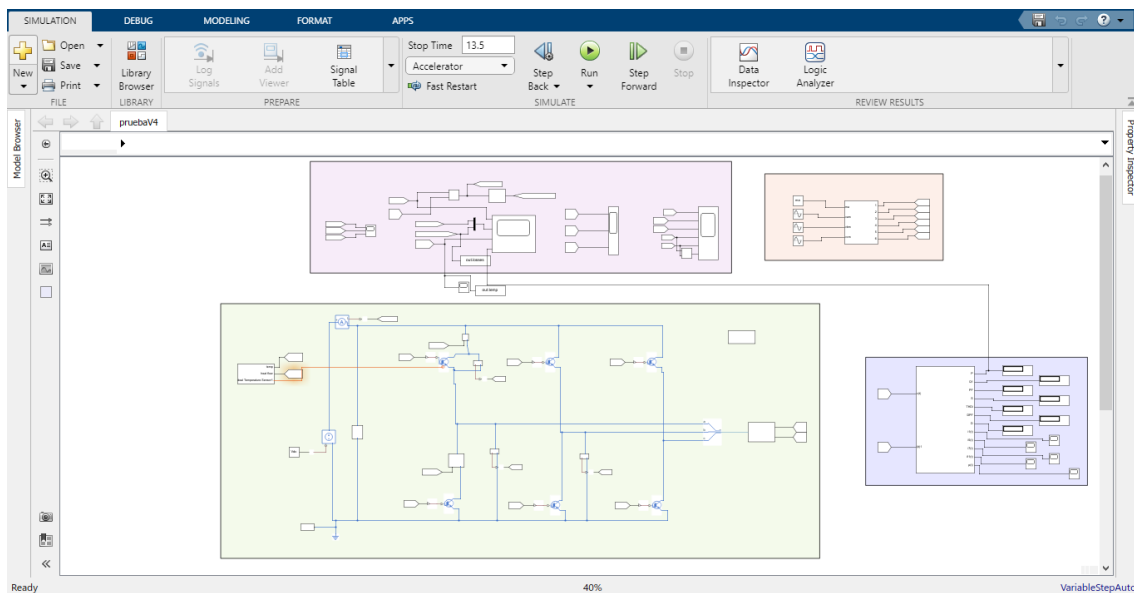


Figura 6.2 Simulación de inversor trifásico en Simulink

En la parte verde se encuentra el circuito inversor, en la parte morada los scopes correspondientes a todos los datos de importancia de la simulación, la parte naranja es la modulación SPWM empleada, y la parte azul es el bloque correspondiente al cálculo de los parámetros de potencia.

PLECS

La carpeta propia de las simulaciones de PLECS tiene el aspecto dado en la Figura 6.3, mientras que la funcionalidad de las simulaciones dadas en la figura está especificada en la Tabla 6.2.

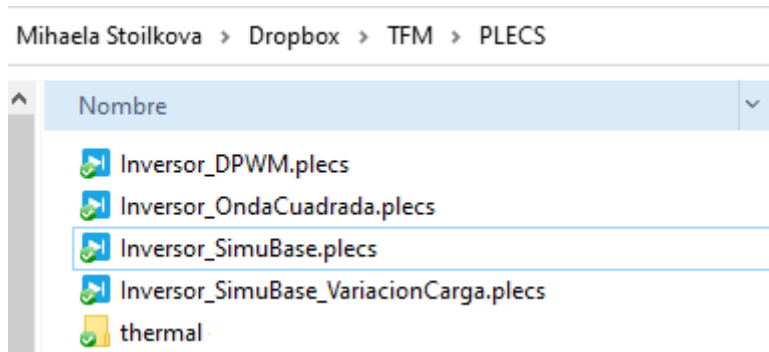


Figura 6.3 Carpeta de simulaciones PLECS

Nombre del archivo	Funcionalidad
Inversor_SimuBase	Simulación que contiene el circuito del inversor trifásico, con sus correspondientes bloques para realizar los cálculos de temperatura y pérdidas necesarios para el TFM.
Inversor_SimuBase_VariacionCarga	Simulación que contiene el circuito del inversor trifásico con cargas en forma de escalón para aumentar la carga del sistema.
Inversor_OndaCuadrada	Simulación configurada para trabajar en onda cuadrada.
Inversor_DPWM	Simulación en la que se emplea la modulación DPWM.

Tabla 6.2 Simulaciones realizadas en PLECS

En la carpeta de las simulaciones se ubica una carpeta correspondiente a la configuración térmica de los semiconductores, la cual se ha explicado en capítulos anteriores como se ha realizado. Consiste en dos archivos, como se ve en la Figura 6.4, uno para la configuración del IGBT y otro para el diodo.


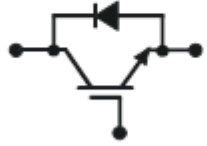
 5SNA 1600N170100 DIODE.xml	13/05/2021 11:22	Documento XML	473 KB
 5SNA 1600N170100.xml	13/05/2021 11:56	Documento XML	338 KB

Figura 6.4 Configuración térmica de los semiconductores

Es necesario incorporar la carpeta de configuración térmica en la simulación, para poder emplear los datos térmicos en los bloques del circuito.

Anexo II: Ficha técnica del módulo de IGBT+Diodo

V_{CE} = 1700 V I_C = 1600 A	HiPak IGBT Module 5SNA 1600N170100
-------------------------------------	---



Doc. No. 5SYA1564-03 10-2020

- Low-loss, rugged SPT chip-set
- Smooth switching SPT chip-set for good EMC
- Industry standard package
- High power density
- AISiC base-plate for high power cycling capability
- AlN substrate for low thermal resistance
- Improved high reliability package
- Recognized under UL1557, File E196689



Figura 6.5 HiPak 5SNA 1600N170100 [4]

IGBT characteristic values ^{*)}

Parameter	Symbol	Conditions	min	typ	max	Unit	
Collector (-emitter) breakdown voltage	$V_{BR}(CES)$	$V_{GE} = 0\text{ V}$, $I_c = 10\text{ mA}$, $T_{vj} = 25\text{ °C}$	1700			V	
Collector-emitter ^{*)} saturation voltage	$V_{CE sat}$	$I_c = 1600\text{ A}$, $V_{GE} = 15\text{ V}$	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	2.0	2.3	2.6	V
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	2.3	2.6	2.9	V
Collector cut-off current	I_{CES}	$V_{CE} = 1700\text{ V}$, $V_{GE} = 0\text{ V}$	$T_{vj} = 25\text{ °C}$			8	mA
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$			80	mA
Gate leakage current	I_{GES}	$V_{CE} = 0\text{ V}$, $V_{GE} = \pm 20\text{ V}$, $T_{vj} = 125\text{ °C}$	-500		500	nA	
Gate-emitter threshold voltage	$V_{GE(ETO)}$	$I_c = 160\text{ mA}$, $V_{CE} = V_{GE}$, $T_{vj} = 25\text{ °C}$	4.5		6.5	V	
Gate charge	Q_{ge}	$I_c = 1600\text{ A}$, $V_{CE} = 900\text{ V}$, $V_{GE} = -15\text{ V} \dots 15\text{ V}$		14.6		μC	
Input capacitance	C_{ies}	$V_{CE} = 25\text{ V}$, $V_{GE} = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $T_{vj} = 25\text{ °C}$		152		nF	
Output capacitance	C_{oes}			14.6			
Reverse transfer capacitance	C_{res}			6.4			
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$V_{CC} = 900\text{ V}$, $I_c = 1600\text{ A}$, $R_G = 0.82\ \Omega$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $L_\sigma = 50\text{ nH}$, inductive load	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	290		ns	
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	300			
Rise time	t_r	$V_{CC} = 900\text{ V}$, $I_c = 1600\text{ A}$, $R_G = 0.82\ \Omega$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $L_\sigma = 50\text{ nH}$, inductive load	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	175		ns	
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	190			
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$	$V_{CC} = 900\text{ V}$, $I_c = 1600\text{ A}$, $R_G = 0.82\ \Omega$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $L_\sigma = 50\text{ nH}$, inductive load	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	1050		ns	
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	1140			
Fall time	t_f	$V_{CC} = 900\text{ V}$, $I_c = 1600\text{ A}$, $R_G = 0.82\ \Omega$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $L_\sigma = 50\text{ nH}$, inductive load	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	150		ns	
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	170			
Turn-on switching energy	E_{on}	$V_{CC} = 900\text{ V}$, $I_c = 1600\text{ A}$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_G = 0.82\ \Omega$, $L_\sigma = 50\text{ nH}$, inductive load	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	380		mJ	
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	530			
Turn-off switching energy	E_{off}	$V_{CC} = 900\text{ V}$, $I_c = 1600\text{ A}$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_G = 0.82\ \Omega$, $L_\sigma = 50\text{ nH}$, inductive load	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	480		mJ	
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	590			
Short circuit current	I_{sc}	$t_{psc} \leq 10\ \mu\text{s}$, $V_{GE} = 15\text{ V}$, $T_{vj} = 125\text{ °C}$, $V_{CC} = 1200\text{ V}$, $V_{CBM(ChP)} \leq 1700\text{ V}$		7200		A	
Module stray inductance	$L_{\sigma CE}$			15		nH	
Resistance, terminal-chip	$R_{\theta C+EE}$		$T_c = 25\text{ °C}$		0.10	m Ω	
			$T_c = 125\text{ °C}$		0.13		

^{*)} Characteristic values according to IEC 60747 – 9
^{*)} Collector-emitter saturation voltage is given at chip level

Figura 6.6 Características del IGBT [4]

Diode characteristic values ^{*)}

Parameter	Symbol	Conditions	min	typ	max	Unit
Forward voltage ^{*)}	V_F	$I_F = 1600\text{ A}$	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	1.65	2.0	V
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	1.7	2.0	
Reverse recovery current	I_{rr}	$V_{CC} = 900\text{ V}$, $I_F = 1600\text{ A}$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_G = 0.82\ \Omega$, $L_\sigma = 50\text{ nH}$, inductive load	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	1090		A
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	1400		
Recovered charge	Q_{rr}	$V_{CC} = 900\text{ V}$, $I_F = 1600\text{ A}$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_G = 0.82\ \Omega$, $L_\sigma = 50\text{ nH}$, inductive load	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	390		μC
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	690		
Reverse recovery time	t_{rr}	$V_{CC} = 900\text{ V}$, $I_F = 1600\text{ A}$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_G = 0.82\ \Omega$, $L_\sigma = 50\text{ nH}$, inductive load	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	620		ns
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	830		
Reverse recovery energy	E_{rec}	$V_{CC} = 900\text{ V}$, $I_F = 1600\text{ A}$, $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_G = 0.82\ \Omega$, $L_\sigma = 50\text{ nH}$, inductive load	$T_{vj} = 25\text{ °C}$	280		mJ
			$T_{vj} = 125\text{ °C}$	480		

^{*)} Characteristic values according to IEC 60747 – 2
^{*)} Forward voltage is given at chip level

Figura 6.7 Características del diodo [4]

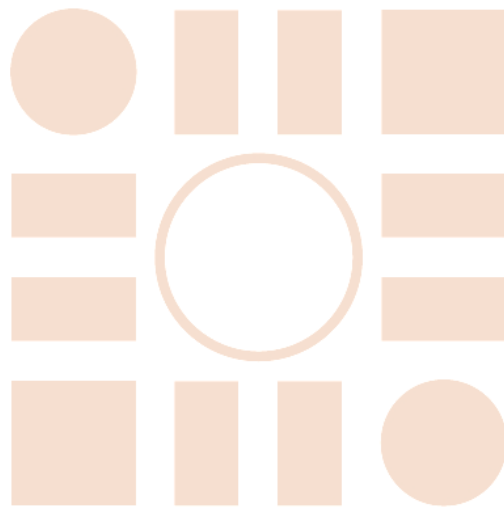
Thermal properties ^{*)}

Parameter	Symbol	Conditions	min	typ	max	Unit
IGBT thermal resistance junction to case	$R_{th(j-c)IGBT}$				0.011	K/W
Diode thermal resistance junction to case	$R_{th(j-c)DIODE}$				0.018	K/W
IGBT thermal resistance ^{*)} case to heatsink	$R_{th(c-s)IGBT}$	IGBT per switch, λ grease = 1W/m ² × K		0.012		K/W
Diode thermal resistance ^{*)} case to heatsink	$R_{th(c-s)DIODE}$	Diode per switch, λ grease = 1W/m ² × K		0.024		K/W

^{*)} For detailed mounting instructions refer to ABB document no. 5SYA 2039 - 01

Figura 6.8 Características térmicas [4]

Universidad de Alcalá
Departamento de Electrónica
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá