



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**DESARROLLO DE UN MODELO DE
SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL PARA UN
GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN
UN CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL**

Autora: Herrero Herrero, Rocío

Tutor:

**De Pablo Gómez, Santiago
Departamento de Tecnología
Electrónica**

Valladolid, abril 2021



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se desarrolla un convertidor CC/CA modular multinivel trifásico alimentado con paneles fotovoltaicos, los cuales actualmente son una fuente de energía en crecimiento dentro del ámbito nacional y mundial.

En primer lugar, se realiza una aproximación de la curva característica de los paneles fotovoltaicos para simular este generador de corriente en los diferentes entornos en los que se desarrolla esta memoria. Posteriormente se implementa gradualmente el MMC a través de la herramienta de simulación Matlab/Simulink. Finalmente, el trabajo concluye con la extensión a la simulación en tiempo real mediante una FPGA.

Durante todo el trabajo se analiza la estabilidad de las simulaciones, asegurando la calidad del estudio realizado. Para ello se realizan una serie de observaciones como examinar las respuestas temporales y la distorsión armónica o elegir los componentes eléctricos más adecuados.

PALABRAS CLAVE

Convertidor MMC, paneles fotovoltaicos, PWM, Matlab, FPGA

ABSTRACT

In the present Degree Final Project, a three-phase DC/AC multilevel modular converter is developed powered by photovoltaic panels, which are currently a growing source of energy in the national and global framework.

Firstly, an approximation of the characteristic curve of the photovoltaic panels are made to simulate this current generator in the different computing environment in which this report is developed. Afterwards, the MMC is gradually implemented through the Matlab/Simulink simulation tool. Finally, the Project concludes with the extension to real-time simulation using FPGA.

During all the Project, the stability of the simulations is analyzed, ensuring the quality of the study conducted. For this, a series of observations are made, such as examining the temporal responses and the harmonic distortion or selecting the most appropriate electrical components.

KEYWORDS

MMC Converter, photovoltaic panels, PWM, Matlab, FPGA



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor Santiago por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo, por su completa disponibilidad para ayudarme y guiarme, así como por todos los conocimientos enseñados

Gracias también a mis padres por todo lo que han hecho por mí, por su esfuerzo y sacrificio, por ayudarme en todo momento y brindarme siempre ese gran apoyo incondicional; de igual modo que mi hermano y hermana, por confiar en mí y animarme constantemente

Por último, agradecer a mis amigos, tanto de la carrera como de mi pueblo, los momentos de desconexión y el haber conseguido que estos años se hayan convertido en un recuerdo para toda la vida



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



*A mis abuelos, Manuel y Luis
Siempre en mi recuerdo*





ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	15
ÍNDICE DE TABLAS.....	23
ÍNDICE DE ECUACIONES	25
CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	29
1.1. INTRODUCCIÓN.....	31
1.2. OBJETIVOS	33
1.3. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	35
1.4. BASES DE DATOS.....	39
1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	41
CAPÍTULO II – ESTADO DEL ARTE.....	43
2.1. MÓDULO FOTOVOLTAICO	45
2.1.1. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO	45
2.1.2. GENERADOR FOTOVOLTAICO.....	46
2.1.3. CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO	46
2.1.3.1. VARIABLES ELÉCTRICAS	46
2.1.3.2. EFECTOS DE LA IRRADIANCIA Y LA TEMPERATURA.....	47
2.1.4. CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO DE REFERENCIA	48
2.1.5. APROVECHAMIENTO DE PANELES.....	49
2.1.6. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS.....	51
2.2. CONVERTIDOR	53
2.2.1. CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL	53
2.2.2. MODULACIÓN.....	55
2.2.2.1. MODULACIÓN PWM	56



2.2.2.2.	DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	58
2.2.3.	IGBT	59
2.3.	LIBRERÍA DE MATLAB Y SIMULINK	61
2.4.	FPGA.....	63
2.4.1.	FPGA FÍSICA.....	63
2.4.2.	DEFINICIÓN FPGA	64
2.4.3.	ELEMENTOS QUE LA CONFORMAN	64
2.4.4.	INTERFAZ	68
CAPÍTULO III – DESARROLLO		73
3.1.	MODELO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO.....	75
3.1.1.	DISPOSICIÓN DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	75
3.1.2.	APROXIMACIÓN CURVA P-V DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO UTILIZADO	78
3.1.3.	COMPROBACIÓN DE LA APROXIMACIÓN CON EL GENERADOR FOTOVOLTAICO DE REFERENCIA	82
3.2.	SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK	83
3.2.1.	ESQUEMA DEL CONVERTIDOR.....	83
3.2.2.	GENERADOR FOTOVOLTAICO.....	90
3.2.3.	OBTENCIÓN DEL CONVERTIDOR	93
3.2.3.1.	CONTROLADOR.....	93
3.2.3.1.1.	SETUP	94
3.2.3.1.2.	LOOP.....	96
A)	SEÑAL DE SINCRONIZACIÓN.....	96
B)	SEÑALES DE MODULACIÓN.....	97
C)	SEÑALES DE CONTROL	99
D)	PORTADORAS.....	107
3.2.3.2.	GENERADOR DE PWM	108



3.2.3.3. COMPONENTES ELÉCTRICOS 111

3.2.4. RESULTADOS 116

3.2.5. CORRIENTE CIRCULANTE..... 122

3.3. SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL 133

3.3.1. ESQUEMA DEL CONVERTIDOR..... 133

3.3.2. GENERADOR FOTOVOLTAICO..... 135

3.3.3. OBTENCIÓN DEL CONVERTIDOR..... 138

3.3.3.1. RCP CORE 140

3.3.3.1.1. PESTAÑA GLOBAL..... 140

3.3.3.1.2. PESTAÑA SETUP 148

3.3.3.1.3. PESTAÑA LOOP 151

A) PORTADORAS 151

B) LECTURA DE LA MEMORIA COMPARTIDA..... 152

C) SEÑAL DE SINCRONIZACIÓN 153

D) SEÑALES DE MODULACIÓN..... 154

E) CONTROL..... 155

3.3.3.1.4. PESTAÑA ASM..... 158

3.3.3.2. COMPONENTES ELÉCTRICOS 158

3.3.4. RESULTADOS 159

3.3.5. DISTORSIÓN ARMÓNICA 166

3.3.6. RIZADO DE LA CORRIENTE..... 171

3.3.7. POTENCIA ACTIVA, REACTIVA Y APARANTE 172

CAPÍTULO IV – CONCLUSIONES..... 175

4.1. IMPLEMENTACIÓN OBJETIVOS PROPUESTOS..... 177

4.2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO, MEJORAS O AMPLIACIONES 177

CAPÍTULO V – BIBLIOGRAFÍA 179



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Crecimiento mundial de la energía fotovoltaica acumulada en GW ^[1]	31
Ilustración 2 - Estructura gráfica de la generación de energía eléctrica renovable por tecnologías en % anualmente en España ^[3]	36
Ilustración 3 - De izquierda a derecha: célula fotovoltaica ^[10] , panel o módulo fotovoltaico ^[11] y generador fotovoltaico ^[12]	45
Ilustración 4 - Curva I-V para diferentes irradiancias y T=25°C del generador fotovoltaico de referencia.....	48
Ilustración 5 - Curva P-V para diferentes irradiancias y T=25°C del generador fotovoltaico de referencia.....	49
Ilustración 6 - Seguidores solares de un eje azimutal, de un eje horizontal, de un eje polar y de dos ejes respectivamente ^[23]	50
Ilustración 7 - Esquema de las celdas del MMC en una fase	54
Ilustración 8 - Izquierda: señal portadora; derecha: señal moduladora normalizada	56
Ilustración 9 - Izquierda: señal de disparo; derecha: señal modulada	57
Ilustración 10 - Tipos de portadoras. De izquierda a derecha: PD, POD y APOD en Matlab/SIMULINK.....	57
Ilustración 11 - IGBT	59
Ilustración 12 - Curva característica de un IGBT	60
Ilustración 13 - FPGA física.....	63
Ilustración 14 - Arquitectura Tarjeta FPGA	67
Ilustración 15 - MMC en la FPGA: DIO Control.....	69
Ilustración 16 - MMC en la FPGA: características del convertidor	70
Ilustración 17 - MMC en la FPGA: RCP Core.....	71
Ilustración 18 - Disposición de los paneles fotovoltaicos	76
Ilustración 19 - Curva P-V para diferentes irradiancias y T=25°C del generador fotovoltaico de referencia.....	79
Ilustración 20 - Curva P-V del generador fotovoltaico utilizado.....	81
Ilustración 21 - Curva de la derivada de la potencia en función de la tensión frente a la tensión del generador fotovoltaico utilizado	81



Ilustración 22 - Superposición curva P-V del generador fotovoltaico de referencia (negro) y curva P-V aproximada del generador fotovoltaico de referencia (azul)..... 82

Ilustración 23 - Base para construir el MMC en Matlab/SIMULINK 84

Ilustración 24 - MMC en Matlab/SIMULINK: Esquema general..... 87

Ilustración 25 - MMC en Matlab/SIMULINK: Interior del bloque Fase 1 Rama U 88

Ilustración 26 - MMC en Matlab/Simulink: Interior del bloque Filtro y carga . 89

Ilustración 27 - SM (módulo de conmutación) o celda 90

Ilustración 28 - Código para la implementación de la función que calcula la corriente que suministran los paneles fotovoltaicos en Matlab/SIMULINK... 91

Ilustración 29 - Código para obtener la corriente que suministran los paneles fotovoltaicos en el controlador en Matlab/SIMULINK..... 92

Ilustración 30 - Bloque de la función embebida del controlador 94

Ilustración 31 - Setup del código del controlador en Matlab/SIMULINK 95

Ilustración 32 - Código de la generación de la señal de sincronización en Matlab/SIMULINK..... 96

Ilustración 33 - Señal de sincronización en Matlab/Simulink 97

Ilustración 34 - Código de las señales moduladoras en Matlab/SIMULINK... 98

Ilustración 35 - Señales de modulación en Matlab/Simulink..... 98

Ilustración 36 - Ciclos de trabajo y señales de disparo en diferentes situaciones. Izquierda: celda retirada al final del ciclo; Derecha: celda insertada al final del ciclo..... 99

Ilustración 37 - Código de la generación de señal de control de la fase 1 y rama superior en Matlab/SIMULINK (parte 1) 99

Ilustración 38 - Posibles estados de los módulos de conmutación (insertados o en bypass) y sentidos de la corriente (positiva o negativa)..... 102

Ilustración 39 - Código de las funciones para buscar la posición de las tensiones máximas y mínimas de entre las señales de disparo que están en modo encendido o apagado en Matlab/SIMULINK..... 103

Ilustración 40 - Código de la generación de señal de control de la fase 1 y rama superior en Matlab/SIMULINK (parte 2) 105



Ilustración 41 - Tensiones de los condensadores de la Fase 1 y Rama Superior en [V]..... 106

Ilustración 42 - Tensiones de los condensadores de la Fase 1 y Rama Inferior en [V]..... 106

Ilustración 43 - Señales portadoras de la fase 1 y rama superior en Matlab/Simulink 108

Ilustración 44 - Bloque de la función embebida del generador de PWM..... 109

Ilustración 45 - Código de la función embebida del generador de PWM en Matlab 110

Ilustración 46 - Señal portadora de la fase 1 y rama superior con zoom en Matlab/Simulink 111

Ilustración 47 - Suma de las señales de disparo de la fase 1 y rama superior y el promedio de esta 114

Ilustración 48 - Suma de las señales de disparo de la fase 1 de las dos ramas 115

Ilustración 49 - Tensión del convertidor en la Rama Superior de las tres fases en Matlab/Simulink 116

Ilustración 50 - Tensión del convertidor en la Rama Inferior de las tres fases en Matlab/Simulink 117

Ilustración 51 - Tensión a la salida del convertidor de las tres fases en Matlab/Simulink 117

Ilustración 52 - Tensiones de salida de cada fase en Matlab/Simulink..... 118

Ilustración 53 - Comparación de la tensión a la salida del MMC y la tensión en la carga para la Fase 1 en Matlab/Simulink 119

Ilustración 54 - Corrientes que circulan por las Ramas Superiores de las tres fases en Matlab/Simulink 119

Ilustración 55 - Corrientes que circulan por las Ramas Inferiores de las tres fases en Matlab/Simulink 120

Ilustración 56 - Corrientes que circulan a la salida del convertidor de las tres fases en Matlab/Simulink 120

Ilustración 57 - Corrientes que circulan por los condensadores de salida de las tres fases en Matlab/Simulink 121

Ilustración 58 - Corrientes de salida de cada fase en Matlab/Simulink..... 121



Ilustración 59 - Potencia media de salida total y real en Matlab/Simulink.. 122

Ilustración 60 - Corrientes en una fase 123

Ilustración 61 - Corriente circulante de la Fase 1 al inyectar 0 A en todas las celdas..... 125

Ilustración 62 - Potencias medias de la Fase 1 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 0 A aproximadamente en todas las celdas..... 125

Ilustración 63 - Corriente circulante de la Fase 2 al inyectar 0 A en todas las celdas..... 126

Ilustración 64 - Potencias medias de la Fase 2 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 0 A aproximadamente en todas las celdas..... 126

Ilustración 65 - Corriente circulante de la Fase 3 al inyectar 0 A en todas las celdas..... 127

Ilustración 66 - Potencias medias de la Fase 3 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 0 A aproximadamente en todas las celdas..... 127

Ilustración 67 - Corriente que circula por el lado de continua, su media y la potencia media de las baterías situadas en la zona de continua cuando se inyectan 0 A en las celdas del MMC en Matlab/Simulink [W] 128

Ilustración 68 - Corriente inyectada por el generador fotovoltaico en la celda 1 de la Fase 1 y Rama Superior en Matlab/Simulink 129

Ilustración 69 - Corriente circulante de la Fase 1 al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas 129

Ilustración 70 - Potencias medias de la Fase 1 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas 130

Ilustración 71 - Corriente circulante de la Fase 2 al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas 130

Ilustración 72 - Potencias medias de la Fase 2 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas 131

Ilustración 73 - Corriente circulante de la Fase 3 al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas 131

Ilustración 74 - Potencias medias de la Fase 3 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas 132



Ilustración 75 - Corriente que circula por el lado de continua, su media y la potencia media de las baterías situadas en la zona de continua cuando se inyectan 8.72 A en las celdas del MMC en Matlab/Simulink [W]..... 132

Ilustración 76 - MMC en FPGA: esquema general..... 134

Ilustración 77 - Código para la implementación de la función [en pestaña Global] que calcula la corriente que suministran los paneles fotovoltaicos en RTSim..... 136

Ilustración 78 - Código para obtener la corriente que suministran los paneles fotovoltaicos en RTSim [en pestaña Loop]..... 137

Ilustración 79 - Comunicación HIL Core y RCP Core en RTSim 138

Ilustración 80 - Información aportada por la interfaz de RTSim sobre la compilación..... 139

Ilustración 81 - Microsegundos empleados en ejecutar el código del Core#2 en RTSim..... 139

Ilustración 82 - Código con #defines en la parte Global de la RTSim 142

Ilustración 83 - Nombres de las señales analógicas leídas por los amperímetros conectados en cada rama en RTSim..... 143

Ilustración 84 - Código para la declaración de variables destinadas a la lectura de las tensiones de los condensadores situados en la planta en la parte Global de la RTSim..... 143

Ilustración 85 - Código para la declaración de variables globales en la parte Global de la RTSim..... 144

Ilustración 86 - Código para la declaración de variables temporales en la parte Global de la RTSim..... 144

Ilustración 87 - Código para la declaración de variables vectoriales en la parte Global de la RTSim..... 145

Ilustración 88 - Código para implementar la función posVmin en la parte Global de RTSim..... 146

Ilustración 89 - Código para implementar la función posVmax en la parte Global de RTSim..... 147

Ilustración 90 - Código del setup de la RTSim (parte 1)..... 148

Ilustración 91 - Código del setup de la RTSim (parte 2)..... 149

Ilustración 92 - Código del setup de la RTSim (parte 3)..... 150



Ilustración 93 - Código de la generación de las señales portadoras de la fase 1 y rama superior e inferior en RTSim 151

Ilustración 94 - Código para la lectura de las tensiones de los condensadores de las celdas en RTSim..... 153

Ilustración 95 - Código para la generación de la señal de sincronización en RTSim..... 154

Ilustración 96 - Código para la generación de las señales moduladoras en RTSim..... 154

Ilustración 97 - Código para calcular el ciclo de servicio en RTSim..... 155

Ilustración 98 - Código para calcular el estado actual en RTSim..... 156

Ilustración 99 - Código de control de la fase A y rama superior en RTSim ... 157

Ilustración 100 - Asignación de valor constante a una variable global en ensamblador 158

Ilustración 101- Tensión en la salida del MMC antes de la bobina de rama superior de las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim 159

Ilustración 102 - Tensión en la salida del MMC antes de la bobina de rama inferior de las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim 160

Ilustración 103 - Tensión en la salida del MMC de las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim..... 160

Ilustración 104 - Tensión en la carga de las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim 161

Ilustración 105 - Corrientes que circulan por las ramas superiores (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim..... 162

Ilustración 106 - Corrientes que circulan por las ramas inferiores (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim..... 163

Ilustración 107 - Corriente que circula por las bobinas de salida del MMC en las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim..... 163

Ilustración 108 - Corriente que circula por los condensadores de salida en las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim..... 164

Ilustración 109 - Corriente que circula por la carga de salida en las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim 164



Ilustración 110 - Izquierda: circuito RC en paralelo; derecha: triángulo de intensidades en un circuito RC en paralelo..... 165

Ilustración 111 - Corriente que circula por las baterías del lado de continua [A] 166

Ilustración 112 - Armónicos entre 0 Hz y 12000 Hz de los datos obtenidos en la tensión de la carga en la simulación en tiempo real..... 170

Ilustración 113 - Esquema del rizado de la corriente 171

Ilustración 114 - Filtro y carga en RTSim con la distribución de potencias .. 174



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Abreviaturas y acrónimos	32
Tabla 2 - Estructura de la generación de energía eléctrica por tecnologías en % anualmente en España ^[3]	35
Tabla 3 - Estructura de la generación de energía eléctrica renovable por tecnologías en % anualmente en España ^[3]	35
Tabla 4 - Parámetros del generador fotovoltaico	48
Tabla 5 - Tipo de variables escalares de la FPGA.....	65
Tabla 6 - Posibles tipos de señales en la FPGA.....	68
Tabla 7 - Instrucciones posibles a utilizar en el RCP Core de la FPGA.....	72
Tabla 8 - Parámetros del módulo fotovoltaico.....	75
Tabla 9 - Valores de las constantes de los polinomios para el generador fotovoltaico utilizado.....	80
Tabla 10 - Posibles estados de los condensadores	101
Tabla 11 - Posibles estados para la elección del condensador adecuado ...	101
Tabla 12 - Valores de los componentes eléctricos en Matlab/Simulink.....	112
Tabla 13 - Valores de la tensión en diferentes colocaciones del Voltímetro para una frecuencia de 50 Hz obtenido en RTSim.....	159
Tabla 14 - Valores de la corriente en diferentes colocaciones del Amperímetro para una frecuencia de 50 Hz obtenido en RTSim	161
Tabla 15 - Valores de la tensión de salida obtenidos en la simulación en RTSim	166
Tabla 16 - Armónicos entre 0 Hz y 12000 Hz de los datos obtenidos en la tensión de la carga en RTSim	168



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 - Tasa de distorsión armónica total en voltaje.....	58
Ecuación 2 - Cálculo de la tensión que aporta el generador fotovoltaico con la disposición elegida	76
Ecuación 3 - Cálculo de la corriente que aporta el generador fotovoltaico con la disposición elegida	76
Ecuación 4 - Cálculo de la potencia que aporta el generador fotovoltaico con la disposición elegida	76
Ecuación 5 - Cálculo de la tensión en circuito abierto que aporta el generador fotovoltaico con la disposición elegida.....	76
Ecuación 6 - Cálculo de la corriente de cortocircuito que aporta el generador fotovoltaico con la disposición elegida.....	77
Ecuación 7 - Cálculo de la potencia aportada por los paneles fotovoltaicos en cada fase con la disposición elegida.....	77
Ecuación 8 - Cálculo de la potencia aportada por los paneles fotovoltaicos en total con la disposición elegida	77
Ecuación 9 - Tensión aportada por cada fase del MMC.....	77
Ecuación 10 - Cálculo de los parámetros del generador de referencia	77
Ecuación 11 - Polinomio base del tramo 1.....	79
Ecuación 12 - Derivada del polinomio base del tramo 1	79
Ecuación 13 - Polinomio base del tramo 2.....	79
Ecuación 14 - Derivada del polinomio base del tramo 2	79
Ecuación 15 - Valores de la frecuencia de resonancia entre los que puede estar comprendida.....	112
Ecuación 16 - Inductancia equivalente en cada fase	112
Ecuación 17 - Frecuencia de resonancia en un circuito serie	113
Ecuación 18 - Frecuencia de resonancia en un circuito serie con la inductancia equivalente y la capacitancia de salida.....	113
Ecuación 19 - Paso de rad/s a Hz de la frecuencia de resonancia en un circuito serie	113
Ecuación 20 - Potencia en un sistema trifásico	113
Ecuación 21 - Ley de Ohm.....	113



Ecuación 22 - Deducción ecuación de potencia en un sistema trifásico empleando la ley de Ohm 114

Ecuación 23 - Cálculo del valor de la resistencia en la salida 114

Ecuación 24 - Capacitancia equivalente en cada rama..... 114

Ecuación 25 - Capacidad equivalente en cada fase 115

Ecuación 26 - Frecuencia de resonancia en un circuito serie con la inductancia equivalente y la capacitancia de celda..... 115

Ecuación 27 - Corriente circulante 122

Ecuación 28 - Gradiente de corriente circulante..... 123

Ecuación 29 - Cálculo de corriente circulante al inyectar OA en todas las celdas 124

Ecuación 30 - Cálculo de la corriente de salida de cada fase 162

Ecuación 31 - Corriente que circula por la bobina de salida en RTSim 165

Ecuación 32 - Cálculo del rizado de la corriente 171

Ecuación 33 - Comprobación valor de la resistencia de salida con los valores observados en RTSim 172

Ecuación 34 - Cálculo de la potencia activa con los valores observados en RTSim..... 172

Ecuación 35 - Cálculo de la potencia reactiva con los valores observados en RTSim..... 173

Ecuación 36 - Cálculo de la potencia aparente con los valores de potencia activa y reactiva calculados previamente 173

Ecuación 37 - Cálculo de la potencia aparente con los valores observados en RTSim..... 173



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Introducción al tema del trabajo y los objetivos de este, así como la motivación y justificación de su realización.



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

1.1. INTRODUCCIÓN

En la última década, la energía fotovoltaica ha experimentado un crecimiento exponencial a nivel mundial, como se observa en la Ilustración 1, compitiendo cada vez más con las fuentes de energía convencionales.

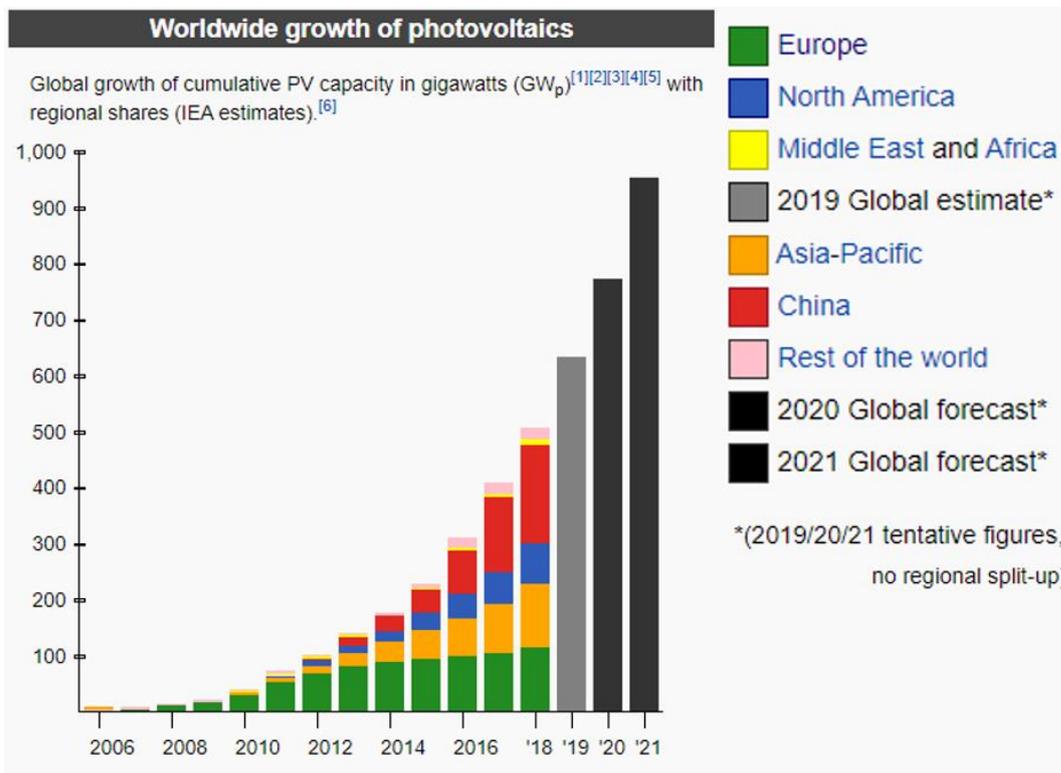


Ilustración 1 - Crecimiento mundial de la energía fotovoltaica acumulada en GW ^[1]

España es uno de los países que más apuestan por este tipo de energía a nivel europeo, representando el 90% de las instalaciones fotovoltaicas realizadas en la Unión Europea en 2019, pasando de 288 a 4080 MW y liderando en número de instalaciones a los países europeos. ^[2]

Por lo tanto, ante el crecimiento de instalaciones fotovoltaicas, los convertidores de corriente continua a alterna, como es el caso del MMC, se convierten en un sistema imprescindible, tanto para el uso directo de esta fuente de energía orientado a cualquier aplicación particular, como para el envío de esta energía a la red. Como consecuencia, los simuladores en tiempo real adquieren una gran importancia en el desarrollo de este tipo de aplicaciones, ya que permiten descubrir problemas de diseño antes de construir el prototipo, lo cual conlleva un gran ahorro de tiempo y esfuerzo.

En el Trabajo Fin de Grado que se presenta en esta memoria, se propone y se desarrolla un convertidor modular multinivel trifásico que genera energía a partir de un generador fotovoltaico.

Los siguientes apartados dentro de este capítulo tienen como finalidad enfocar el objetivo del trabajo, mencionar la motivación de su realización y dar una visión general del esquema propuesto para su consecución.

Previamente, a modo aclaratorio se muestran las abreviaturas y acrónimos, ordenados alfabéticamente, que se han empleado a lo largo de todo el trabajo en la Tabla 1.

Tabla 1 - Abreviaturas y acrónimos

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	SIGNIFICADO
μ S	Microsegundos
A	Amperios
APOD	Alternative Phase Opposition Disposition
CA / AC	Corriente alterna
CC	Corriente continua
DB	Decibelios
FPGA	Field-Programmable Gate Array
H	Hora
HIL	Hardware in the Loop
HZ	Hercios
I-V	Intensidad-Voltaje
L/LW/LOW	Inferior
MMC	Convertidor Modular Multinivel
° C	Grados Centígrados
PD	Phase Disposition
POD	Phase Opposition Disposition
PV	Photovoltaic
P-V	Power-Voltage
PWM	Pulse-Width Modulation
RCP	Prototipado rápido de controladores
RTSIM	Real Time Simulation
SM	Switch Model
TFG	Trabajo Fin de Grado
THD	Tasa de distorsión armónica
U/UP	Superior
V	Voltios
W	Watios
Ω	Ohmios



1.2. OBJETIVOS

El presente Trabajo Fin de Grado tiene una serie de objetivos que se exponen a continuación.

En primer lugar, el más importante es implementar en un simulador en tiempo real un convertidor modular multinivel operando de forma estable y alimentado con paneles fotovoltaicos conectados directamente a sus celdas. El controlador se implementará en lenguaje C, comprendiendo y ajustando el código a las limitaciones que pueda presentar el procesador.

Otro de los objetivos contempla el desarrollo del mismo en la simulación en Matlab/Simulink. Se trata de un primer modelo de convertidor que sirva de precedente para posteriormente trasladar los conocimientos al simulador en tiempo real.

Así mismo, se necesita un modelo de generador fotovoltaico que alimente a los convertidores en ambos entornos de simulación, constituyendo otro de los objetivos del trabajo.

Finalmente, como se ha introducido anteriormente, se pretenden conseguir simulaciones estables, que presenten formas de onda limpias, es decir, filtradas, analizando para ello tanto las representaciones temporales que proporcionan de forma rápida y visual si se está consiguiendo el resultado esperado, como la tasa de distorsión armónica que indica la medida de distorsión de la forma de onda rigurosamente.



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

1.3. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la energía solar fotovoltaica ha experimentado un importante crecimiento en España, llegando casi a duplicar su representación dentro del marco nacional en el último año como se puede apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2 - Estructura de la generación de energía eléctrica por tecnologías en % anualmente en España ^[3]

GENERACIÓN EN %	2017	2018	2019	2020
HIDRÁULICA	7	13.1	9.5	12.2
TURBINACIÓN BOMBEO	0.9	0.8	0.6	1.1
NUCLEAR	21.2	20.4	21.4	22.2
CARBÓN	17.2	14.3	4.9	2
FUEL + GAS	0	0	0	0
MOTORES DIÉSEL	1.3	1.2	1.1	1
TURBINA DE GAS	0.3	0.4	0.3	0.2
TURBINA DE VAPOR	1	0.9	0.8	0.6
CICLO COMBINADO	14.1	11.5	21.2	17.5
HIDROEÓLICA	0	0	0	0
EÓLICA	18.3	19	20.8	21.9
SOLAR FOTOVOLTAICA	3.2	3	3.5	6.1
SOLAR TÉRMICA	2	1.7	2	1.8
OTRAS RENOVABLES	1.4	1.4	1.4	1.8
COGENERACIÓN	10.8	11.1	11.4	10.7
RESIDUOS NO RENOVABLES	1	0.9	0.9	0.8
RESIDUOS RENOVABLES	0.3	0.3	0.3	0.3

Además, está adquiriendo gran fuerza dentro del ámbito de las energías renovables, situándose entre las tres mayores fuentes de energía renovable en España por debajo de las energías eólicas e hidráulicas como se ilustra de forma numérica en la Tabla 3 y gráfica en la Ilustración 2. Este crecimiento se ha podido apreciar en mayor medida en el último año.

Tabla 3 - Estructura de la generación de energía eléctrica renovable por tecnologías en % anualmente en España ^[3]

GENERACIÓN EN %	2017	2018	2019	2020
HIDRÁULICA	21,8	34	25,2	27,7
HIDROEÓLICA	0	0	0	0
EÓLICA	56,6	49,4	55,4	49,7
SOLAR FOTOVOLTAICA	9,9	7,7	9,4	13,8

SOLAR TÉRMICA	6,3	4,4	5,3	4,1
OTRAS RENOVABLES	4,3	3,5	3,7	4,1
RESIDUOS RENOVABLES	1	0,9	0,9	0,7

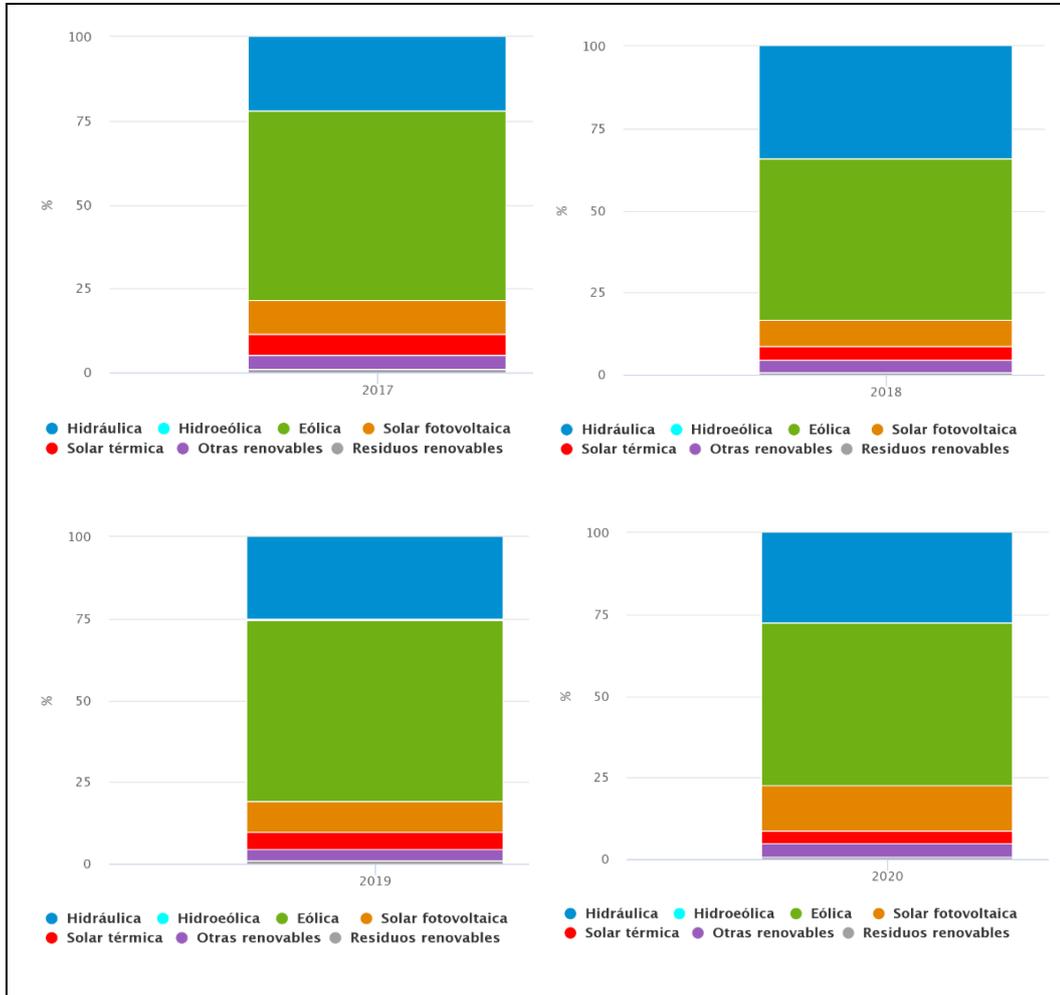


Ilustración 2 - Estructura gráfica de la generación de energía eléctrica renovable por tecnologías en % anualmente en España [3]

En cuanto al marco europeo, se conoce que el mercado de la energía solar también está en constante crecimiento. Cabe destacar que, en 2019, el 90% de la energía solar fotovoltaica instalada en la Unión Europea fue producida en España. [2], [4]

Asimismo, cabe recordar la instauración del Pacto Verde Europeo o “Green Deal” en 2019 cuya finalidad es conseguir para 2050 una economía limpia, sin emisiones, que reduzca la contaminación y proteja el hábitat natural mejorando el bienestar de las personas y la sostenibilidad de las empresas. Para alcanzar este objetivo, una de las principales acciones a realizar es la inversión en



tecnologías que sean respetuosas con el medio ambiente, como es el caso de la energía solar fotovoltaica y su consiguiente necesidad de instalación de convertidores de CC a CA para su utilización. [5], [6]

Toda esta información resulta de aliciente para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado.



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



1.4. BASES DE DATOS

Para la realización de esta memoria se ha necesitado una amplia búsqueda Bibliográfica con la finalidad de encontrar posibles trabajos relevantes que ayudasen a la comprensión y posterior desarrollo de este trabajo.

Entre las fuentes de datos donde se ha acudido a buscar información ha sido el propio Repositorio Documental de la Universidad de Valladolid (UVaDOC), aunque la bibliografía que ha tenido más repercusión en este trabajo es la citada en el CAPÍTULO V – BIBLIOGRAFÍA.





1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria de este Trabajo Fin de Grado consta de cinco grandes partes que se nombran y describen a continuación:

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este primer capítulo se introduce el tema del trabajo y los objetivos de este, así como la motivación y justificación de su realización, haciendo hincapié en el contexto actual de la energía obtenida mediante paneles fotovoltaicos y su importancia como fuente de energía renovable. También se deja constancia de una búsqueda Bibliográfica para localizar los trabajos más relevantes existentes en las Bases de Datos a las cuales está suscrita la Universidad de Valladolid.

CAPÍTULO II – ESTADO DEL ARTE

El estudio teórico acerca de los temas desarrollados en el trabajo: MÓDULO FOTOVOLTAICO, CONVERTIDOR, LIBRERÍA DE MATLAB Y SIMULINK y FPGA se expone en este punto.

CAPÍTULO III – DESARROLLO

Este capítulo está destinado a explicar los métodos, la programación y las estructuras utilizadas para el progreso del trabajo, además de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO IV – CONCLUSIONES

El grado de implementación de los objetivos propuestos, es decir, las conclusiones de esta memoria, así como posibles líneas futuras de trabajo, mejoras o ampliaciones se recogen en este capítulo.

CAPÍTULO V – BIBLIOGRAFÍA

La memoria finaliza con este punto donde se presenta la bibliografía de consulta empleada en este trabajo con la finalidad de obtener información para el desarrollo y comprensión de la memoria.



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



CAPÍTULO II – ESTADO DEL ARTE

Estudio teórico sobre los temas desarrollados en este trabajo: módulos fotovoltaicos, convertidores, librería de Matlab y FPGA.



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

2.1. MÓDULO FOTOVOLTAICO

En este apartado se procede a realizar una descripción de los paneles o módulos y generadores fotovoltaicos, así como a mencionar las características principales y diferentes alternativas para incrementar su rendimiento.

Se comienza por la definición de los paneles solares. Estos son dispositivos que generan calor o electricidad a través de la energía solar. Esta energía se obtiene mediante la captación de la luz y del calor emitidos por el sol, siendo una de las principales energías renovables, también conocida como energía limpia o verde.

Según la finalidad se puede distinguir entre colectores solares y paneles fotovoltaicos. Los colectores solares emplean la energía solar para calentar un líquido que cede su calor al agua mediante un intercambiador de calor; mientras que los paneles o módulos fotovoltaicos se encargan de transformar la energía solar en energía eléctrica. Estos últimos de gran interés para este trabajo. [7], [8]

2.1.1. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO

Los paneles o módulos fotovoltaicos [Ilustración 3] están formados por un conjunto de celdas o células fotovoltaicas interconectadas entre sí que producen electricidad en forma de corriente continua cuando incide sobre ellos la energía solar. Esto ocurre gracias al efecto fotovoltaico. [9]



Ilustración 3 - De izquierda a derecha: célula fotovoltaica [10], panel o módulo fotovoltaico [11] y generador fotovoltaico [12]

Este efecto fotovoltaico es el responsable de convertir la luz solar que impacta sobre determinados materiales en corriente eléctrica a través de la célula fotovoltaica. En concreto, cuando los fotones o partículas energéticas de los que está compuesta la luz solar inciden y son absorbidos sobre una célula fotovoltaica, transfieren su energía a un electrón de un átomo de la célula, siendo este último capaz de escapar de su posición normal para formar parte

de una corriente en un circuito eléctrico. Los materiales sobre los que inciden son semiconductores. Éstos se caracterizan por aumentar su conductividad con la temperatura ya que la separación entre la banda de valencia y la banda conductora es pequeña, lo cual permite que los electrones puedan saltar a la banda de conducción. [13], [14]

Una de las propiedades más importantes de los paneles fotovoltaicos es la estructura tridimensional interna del material empleado puesto que determina la proporción de luz solar que la célula convierte en energía eléctrica, variando así el rendimiento de los paneles fotovoltaicos. El material más común es el silicio y las estructuras de las células más utilizadas, ordenadas de mayor a menor rendimiento, son: silicio monocristalino, silicio policristalino y silicio amorfo. Un incremento del rendimiento hace que esta energía sea más competitiva en relación con otras fuentes. [15], [16]

2.1.2. GENERADOR FOTOVOLTAICO

La potencia generada por una única célula fotovoltaica es pequeña ya que produce una tensión de ± 0.5 (V) y una corriente de 2 a 4 A. Por este motivo, es necesario conectar varias células entre sí para aumentar el voltaje o la corriente, lo que se conoce como panel o módulo fotovoltaico. Estos están diseñados para suministrar electricidad a un determinado voltaje, normalmente 12 o 24 V. [15], [17], [18]

Así mismo, se pueden conectar dos o más módulos para formar un generador fotovoltaico. Estos producen corriente continua y pueden ser conectados en serie o en paralelo para generar cualquier combinación de corriente y tensión. [19]

2.1.3. CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO

A continuación, se explican las variables eléctricas más relevantes de un panel fotovoltaico y la influencia que tienen sobre estos la irradiancia y la temperatura.

2.1.3.1. VARIABLES ELÉCTRICAS

Las principales variables eléctricas que se estudian de un panel fotovoltaico son:

- Tensión de circuito abierto: valor máximo de tensión de la célula que se obtiene cuando no se conecta ninguna carga al panel y la intensidad que circula es nula. Varía en función de las condiciones atmosféricas.
- Corriente de cortocircuito: valor máximo de intensidad de la célula cuando, en ausencia de cargas externas y tras haber sido cortocircuitada en sus terminales, la tensión producida es de 0 V. Varía en función de las condiciones atmosféricas.
- Potencia máxima: valor máximo del producto de intensidad y tensión que puede entregar el panel bajo unas condiciones estándar de medida.

También cabe mencionar otras características como:

- Tensión en el punto de máxima potencia: valor de la tensión cuando la potencia es máxima bajo unas condiciones estándar de medida.
- Corriente en el punto de máxima potencia: valor de la intensidad cuando la potencia es máxima bajo unas condiciones estándar de medida.
- Eficiencia o rendimiento: cantidad de potencia de radiación incidente sobre el panel que es capaz de convertirse en potencia eléctrica. [20], [21]

2.1.3.2. EFECTOS DE LA IRRADIANCIA Y LA TEMPERATURA

Las propiedades que tienen mayor influencia sobre las diferentes curvas características de una celda fotovoltaica son la irradiancia y la temperatura.

En primer lugar, la intensidad de cortocircuito de una celda es proporcional a la intensidad de iluminación incidente, es decir, ante un aumento o disminución de la irradiancia, la intensidad se ve aumentada o disminuida respectivamente. [Ilustración 4].

Por otra parte, la tensión en circuito abierto no experimenta grandes variaciones al modificar las condiciones de radiación solar. Es por esto que la potencia generada acaba siendo proporcional a la irradiancia [Ilustración 5].

En cuanto al efecto de la temperatura, la tensión del circuito abierto disminuye del orden de unos pocos milivoltios por cada grado centígrado que aumenta la temperatura. Esto provoca que la eficiencia de la celda disminuya (se reduce entre el 0.4 y 0.5 % por grado centígrado en las celdas de silicio), mientras que la corriente de cortocircuito permanece prácticamente constante.

Se puede asumir que, en buenas condiciones de irradiación, su valor es aproximadamente $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ en la superficie terrestre, y la temperatura de la celda es de $25 \text{ (}^\circ\text{C)}$. [22]

2.1.4. CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO DE REFERENCIA

Las curvas características de un generador fotovoltaico vienen dadas por el fabricante del mismo.

En este trabajo se parte de los datos de un generador fotovoltaico policristalino STP320-24 fabricado por Suntech en condiciones estándar, es decir con una irradiancia de $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ y una temperatura de $25 \text{ (}^\circ\text{C)}$ [Tabla 4]; junto con las curvas características para diferentes irradiancias [Ilustración 4 e Ilustración 5].

Tabla 4 - Parámetros del generador fotovoltaico

PARÁMETROS	VALOR
NÚMERO DE SERIES	72
NÚMERO DE MÓDULOS POR SERIE	22
CORRIENTE A LA POTENCIA MÁXIMA	627.84 A
TENSIÓN A LA POTENCIA MÁXIMA	807.4 V
POTENCIA CC DE SALIDA	506.91 kW
TENSIÓN EN CIRCUITO ABIERTO	1003.2 V
CORRIENTE EN CORTOCIRCUITO	653.04 A

Por lo tanto, se trata de un generador fotovoltaico que consta de 72 series de 22 paneles fotovoltaicos conectados en serie, de tal forma que aportan los valores de tensión, corriente y potencia que se indican en la Tabla 4.

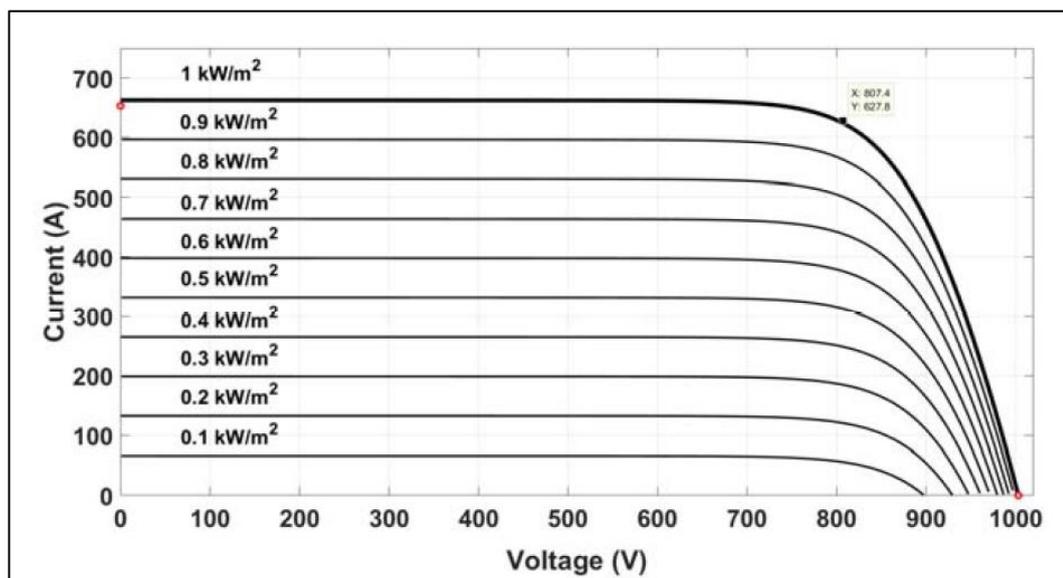


Ilustración 4 - Curva I-V para diferentes irradiancias y $T=25^\circ\text{C}$ del generador fotovoltaico de referencia

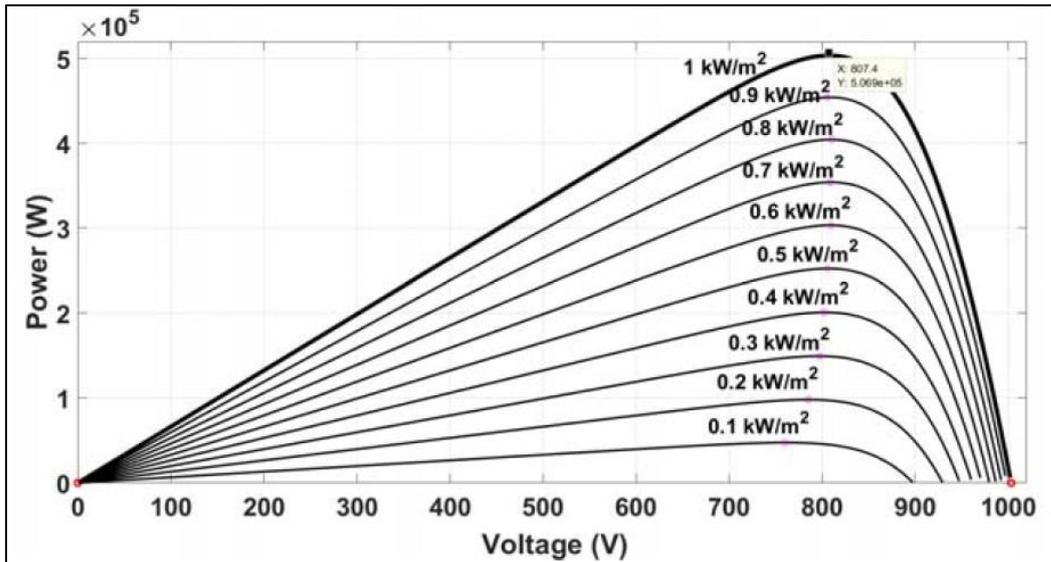


Ilustración 5 - Curva P-V para diferentes irradiancias y $T=25^{\circ}\text{C}$ del generador fotovoltaico de referencia

2.1.5. APROVECHAMIENTO DE PANELES

En general, un generador fotovoltaico no es suficiente por sí solo. Normalmente es necesario instalar un sistema fotovoltaico completo. Dicho sistema suele constar del propio generador fotovoltaico junto a otros componentes que varían en función del tipo de aplicación.

El objetivo es aumentar la eficiencia de los paneles solares consiguiendo obtener la mayor proporción de luz solar. Para esto, lo ideal sería conseguir que los rayos del sol incidieran perpendicularmente sobre el plano de los paneles fotovoltaicos el máximo tiempo posible. Esto se puede conseguir mediante la instalación de seguidores solares.

Un sistema de seguimiento solar es una estructura que mueve los paneles solares para que sigan la trayectoria del sol con la finalidad de optimizar el ángulo de incidencia, es decir, el ángulo con el que los paneles reciben la radiación solar. De esta forma, el panel fotovoltaico producirá más energía cuanto más cerca se encuentre dicho ángulo de la perpendicular. Así se maximiza la producción de electricidad de la instalación, aunque también aumentan los costes y el mantenimiento.

Existen diferentes tipos de sistemas de seguimiento solar:

- Activos, dentro de los que se pueden diferenciar distintas modalidades [Ilustración 6]:

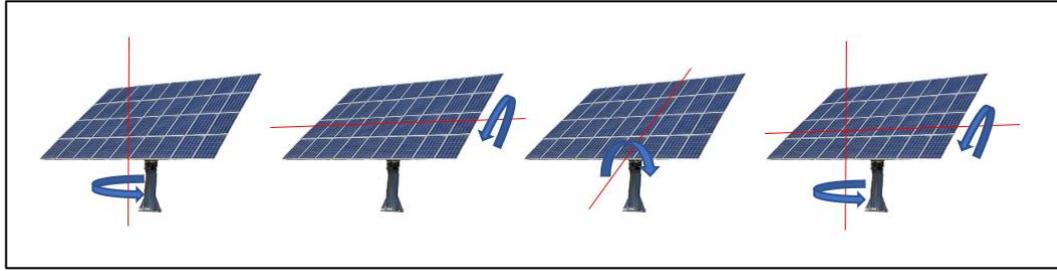


Ilustración 6 - Seguidores solares de un eje azimutal, de un eje horizontal, de un eje polar y de dos ejes respectivamente^[23]

- En un eje azimutal

Giran sobre un eje vertical y los paneles deben estar orientados con un ángulo constante igual a la latitud del lugar logrando un mayor rendimiento del sistema durante todo el año. El valor de giro sobre su eje vertical se determina directamente por el valor del ángulo azimutal del sol, siendo el ángulo azimutal del sol el ángulo que forma el sol y el Norte medido en sentido horario. En estos sistemas la velocidad de giro es variable.

- En un eje horizontal

Giran sobre un eje horizontal norte-sur. Los módulos se encuentran colocados de manera paralela al eje de giro. La trayectoria dibujada es siempre de este a oeste perpendicular al plano horizontal que difiere de la trayectoria solar en la inclinación que se tiene.

- En un eje polar

Giran sobre un eje orientado en la dirección norte-sur que tiene una inclinación igual a la latitud del lugar. Los módulos se colocan paralelos al eje de giro. Es muy parecido al seguidor horizontal pero su inclinación, que es igual a la latitud del lugar, hace que estos tengan una ganancia mayor por año ya que estos corrigen la declinación del sol. Su velocidad de giro es constante de 15 °/h.

- En dos ejes

Se mueve en dos ejes, uno alineado norte-sur y otro este-oeste. Este tipo de sistemas están diseñados para maximizar la producción de energía durante todo el año. Pueden variar la orientación según la estación, además de seguir al sol durante el día.

Los sistemas activos en un eje proporcionan un aumento de entre el 25 y 35% de rendimiento. Estos presentan menor coste, mayor simplicidad y la posibilidad de su adaptación a cubiertas, pero tienen la desventaja de realizar un seguimiento solar menos preciso captando menos energía que los sistemas activos en dos ejes, los cuales proporcionan un aumento del 30 al 45% del

rendimiento respecto a las estructuras fijas contando con mayor precisión, pero también mayores costes.

- Pasivos. Estos carecen de un control electrónico y su funcionamiento consiste en el cambio de densidad de un líquido que presenta un punto de ebullición bajo y que se coloca en dos recipientes orientados de este a oeste y conectados entre sí. De esta forma, el líquido se evapora al recibir los rayos solares y la diferencia de pesos provoca el movimiento de los paneles. En este caso, además, es necesario la colocación de amortiguadores hidráulicos para contrarrestar la fuerza del viento.

Finalmente, otro componente a destacar son las lentes de concentración. Su objetivo es concentrar la radiación solar de una superficie amplia en una muy pequeña, provocando que la radiación solar que incidirá sobre un panel fotovoltaico se concentre, mejorando la eficiencia de conversión a energía en un 35%. [24], [25]

2.1.6. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes más prometedoras de las energías renovables en el mundo como se viene mostrando en este trabajo.

Sus ventajas son claras:

- No es contaminante, no consume combustibles fósiles ni genera residuos o ruidos
- Es una fuente inagotable
- No requiere excesivo mantenimiento
- Los generadores de energía pueden ser instalados sobre edificios ya construidos generando su propia energía de forma segura y silenciosa
- Posee una elevada fiabilidad
- Larga duración de vida de los paneles, normalmente de 30 años
- Presenta resistencia a condiciones climáticas extremas
- El excedente de electricidad se puede vender a una compañía eléctrica
- Si se desea, se puede aumentar la potencia generada mediante la incorporación sencilla de nuevos módulos fotovoltaicos

En cuanto a los inconvenientes que presentan son:

- Complejidad de la instalación
- Costes muy elevados, principalmente porque requiere una importante inversión inicial [26]





2.2. CONVERTIDOR

Hasta el momento se ha explicado que los generadores fotovoltaicos producen corriente continua. Pero en la mayoría de las aplicaciones la carga necesita ser alimentada con corriente alterna. Este es el motivo por el que se hace necesario disponer de convertidores CC/CA o inversores que permitan transformar la corriente continua en corriente alterna.

2.2.1. CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL

Los convertidores modulares multinivel son convertidores electrónicos de potencia, es decir, un conjunto de circuitos eléctricos formados por semiconductores de potencia y fuentes de tensión basadas en condensadores, capaces de transformar la energía eléctrica de un nivel de tensión, corriente o frecuencia a otro. El procedimiento para realizarlo es mediante la conmutación del voltaje CC de entrada.

De esta forma, con entradas de diferentes niveles de tensión de continua que presentan valores de tensiones relativamente pequeños se pueden generar tensiones de salida alternas con valores elevados. Si se incrementa el número de niveles en el inversor, aumenta el rango de valores en la tensión de salida, generándose una forma de onda escalonada, con una menor distorsión armónica. [27]

Estos convertidores se componen de dos ramas de p células elementales de conmutación conectadas en serie. Así, un convertidor de p módulos tiene n niveles de tensión, siendo n el número de células elementales (p) más uno.

En cuanto al funcionamiento, las dos ramas del convertidor están siempre conduciendo, lo que requiere que las dos ramas generen a la salida la misma tensión. Por ello, si por ejemplo la rama superior restara m capacidades a la tensión $n-1$, entonces la rama inferior sumará $n-1-m$ capacidades al nivel de tensión cero. [28], [29]

Puede haber una pequeña diferencia entre las tensiones de las dos ramas debido a los inevitables desfases entre las conmutaciones de una y otra rama. Por ello es necesario conectar inductancias entre las dos ramas en la salida para evitar cortocircuitos [Ilustración 7].

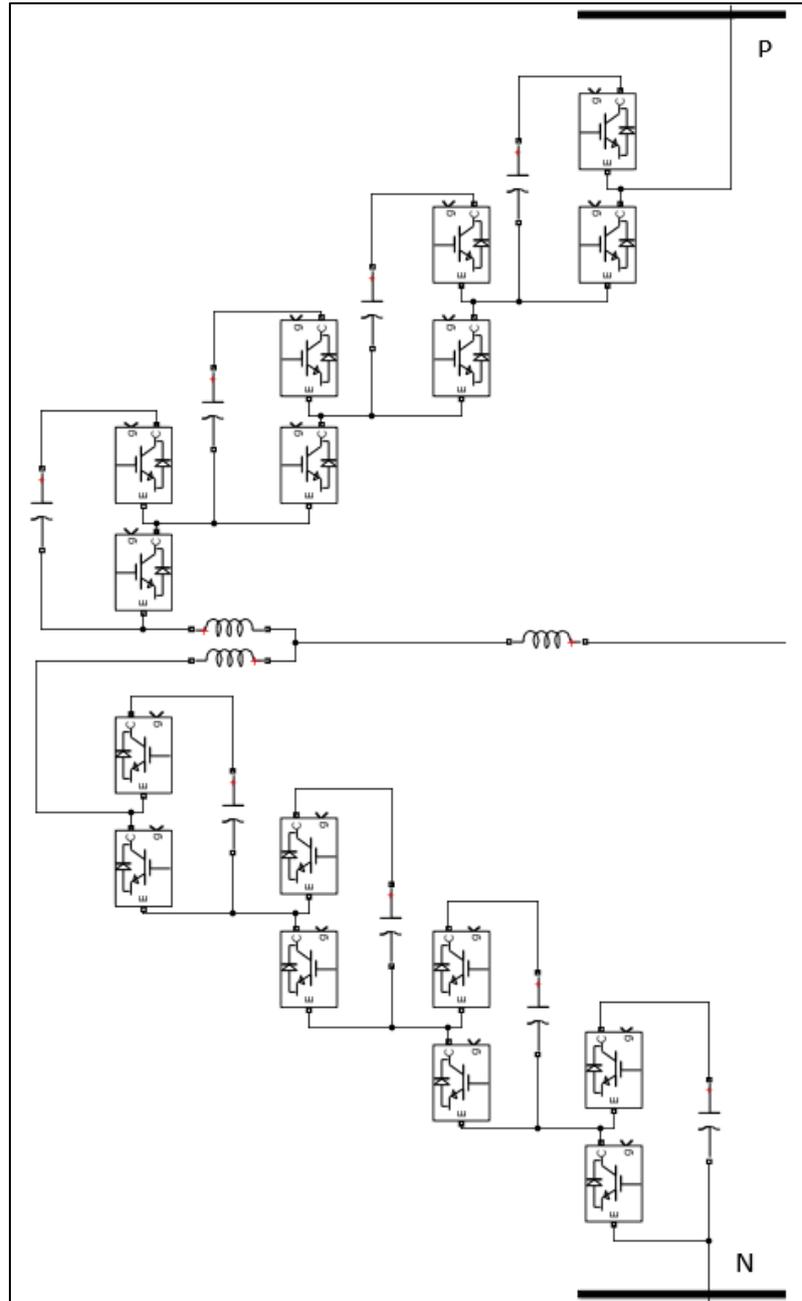


Ilustración 7 - Esquema de las celdas del MMC en una fase

Las principales ventajas que presentan los convertidores multinivel son:

- La tensión puede crecer tanto como se necesite gracias a la disposición modular, sin asumir el riesgo de tener que hacer frente a tensiones peligrosas, ya que la máxima tensión que soporta cada semiconductor es la correspondiente a su celda
- En los casos en los que hay un elevado número de celdas, se pueden dejar algunas como redundantes, lo cual facilita la tarea de equilibrar la

tensión de los condensadores, y en caso de módulos averiados, permite su extracción y sustitución en caliente

- La tensión de salida obtenida en un convertidor CC/CA multinivel presenta un contenido armónico inferior a la obtenida con un convertidor CC/CA convencional de potencia equivalente. En teoría, se podría conseguir una distorsión armónica nula si se dispusiera de un número infinito de niveles de tensión de entrada, reduciéndose la frecuencia de conmutación de los interruptores sin disminuir la calidad en la tensión de salida
- La corriente continua de entrada absorbida presenta una distorsión armónica baja, sin discontinuidades, algo que no sucede en los inversores convencionales, ya que la corriente de las ramas nunca se interrumpe, pasa por unos semiconductores u otros

En cuanto a los inconvenientes se pueden mencionar los siguientes:

- En caso de producirse un cortocircuito en continua, aparecen elevadas corrientes de cortocircuito debido al empleo de los Half-bridge. Esto se puede evitar utilizando Full-bridge
- Emplean un número de interruptores elevado, lo que significa un incremento en la complejidad del control
- Introducen problemas de desequilibrio en las tensiones de los condensadores
- Los condensadores utilizados se cargan y descargan a la frecuencia fundamental, por lo que su tamaño es mucho mayor que las de otros convertidores donde se dimensionan para trabajar a frecuencia de conmutación [28], [30], [31]

2.2.2. MODULACIÓN

La modulación es una técnica que consiste en manipular una forma de onda periódica para controlar el nivel de potencia entregado a una carga permitiendo decidir sobre la conmutación de los semiconductores. Se puede emplear un método escalar o vectorial indistintamente sin tener por qué influir en la tensión de salida.

En este trabajo se empleará modulación escalar. Esta se compone de una portadora a frecuencia de conmutación y una moduladora por fase. Ambas se comparan y en función del resultado se obtiene la orden de encendido o apagado de la célula de conmutación.

Las grandes ventajas que presenta este tipo de modulación son su simplicidad y el bajo coste computacional que requiere. [17], [32], [33]

2.2.2.1. MODULACIÓN PWM

La modulación de ancho de pulso (PWM) es una de las estrategias más utilizadas para controlar la salida AC de los convertidores de potencia.

El PWM consiste en apagar y encender rápidamente el interruptor que permite el paso de energía. Así, la carga, aunque es incapaz de seguir dichas oscilaciones, puede seguir el valor medio de la misma.

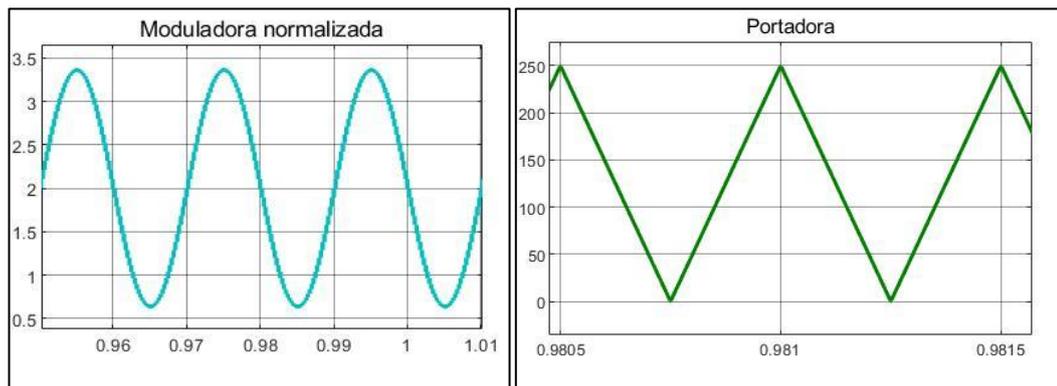


Ilustración 8 - Izquierda: señal portadora; derecha: señal moduladora normalizada

El procedimiento consiste en comparar una señal de alta frecuencia que se utiliza como señal portadora con una señal en baja frecuencia como referencia llamada señal moduladora [Ilustración 8] y que transporta la información deseada dictando la forma definitiva de la señal modulada, esto es amplitud, frecuencia y fase deseadas. De esta forma, la salida estará en nivel alto o a uno cuando la referencia sea mayor que la portadora y en nivel bajo o a cero en caso contrario. El resultado es una onda cuadrada tal y como la imagen de la izquierda que se muestra en la Ilustración 9, cuya anchura de pulso es modulada y por lo tanto variable. Al final, lo que se pretende crear es un tren de pulsos que tenga el mismo promedio fundamental amplitud-tiempo, es decir, la integral de la forma de onda de la tensión sobre el tiempo, que la señal de referencia en cualquier instante [imagen derecha de Ilustración 9].

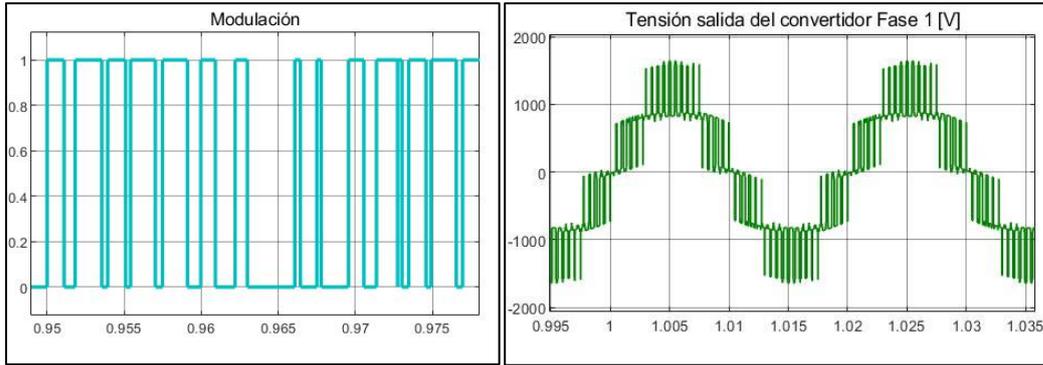


Ilustración 9 - Izquierda: señal de disparo; derecha: señal modulada

Existen diversos tipos de estrategias de modulación. En este trabajo se empleará el PWM de muestreo natural a frecuencia fija, es decir, se realizará una conmutación siempre que haya una intersección entre la señal de referencia y la portadora. [34], [35], [36]

Pueden distinguirse tres estrategias de PWM alternativas [Ilustración 10] con diferentes relaciones de fase:

- Phase Disposition (PD): todas las señales portadoras están en la misma fase.
- Phase Opposition Disposition (POD): todas las señales portadoras por encima del cero están desfasadas 180° con respecto a las señales portadoras que están por debajo del cero.
- Alternative Phase Opposition Disposition (APOD): todas las señales portadoras adyacentes están desfasadas 180° .

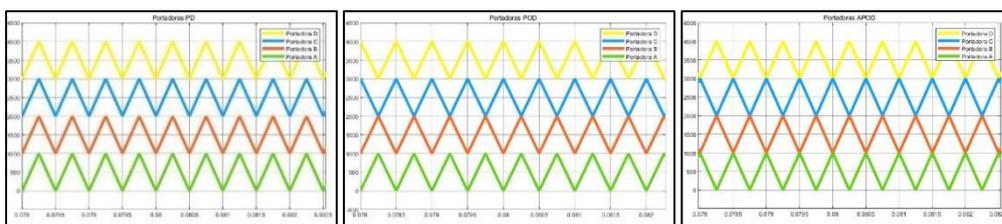


Ilustración 10 - Tipos de portadoras. De izquierda a derecha: PD, POD y APOD en Matlab/SIMULINK

En este trabajo se desarrolla la estrategia PD debido a la facilidad de implementación que requiere de cara a la programación en el simulador en tiempo real, presentando una menor posibilidad de equivocación y una buena distorsión armónica.

2.2.2.2. DISTORSIÓN ARMÓNICA

Una consecuencia del proceso de modulación son los armónicos que presenta la señal de salida.

Los armónicos son vibraciones de frecuencias más altas múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, es decir, de la frecuencia más baja de una forma de onda periódica; y su amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo. El resultado es una deformación de la corriente y como consecuencia de la tensión. La tensión armónica se define como la tensión sinusoidal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación.

Algunos de los efectos que provocan dichos armónicos son:

- Reducción del rendimiento de la instalación
- Deterioro del aislamiento de los componentes y como consecuencia, reducción de energía
- Aumento de los costes económicos

Para realizar un estudio de los armónicos se utiliza el espectro de frecuencias armónicas de la señal. Esto es una representación gráfica que incluye los armónicos presentes, así como la señal en frecuencia y en amplitud.

Este trabajo se va a centrar en una característica que permite analizar la calidad de la modulación, la distorsión armónica (THD). Su cálculo permite calificar el nivel de contaminación en tensión o en corriente, es decir, mide la cantidad de distorsión que presenta una forma de onda, ya sea de tensión o de corriente. [37], [38]

Según el Boletín Oficial Del Estado a 1 de febrero de 2018, la tasa total de distorsión armónica que se define como la relación entre el valor eficaz de las componentes armónicas y el valor eficaz de la componente fundamental [Ecuación 1], no debe sobrepasar el 3.00%. [39]

Ecuación 1 - Tasa de distorsión armónica total en voltaje

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1}$$

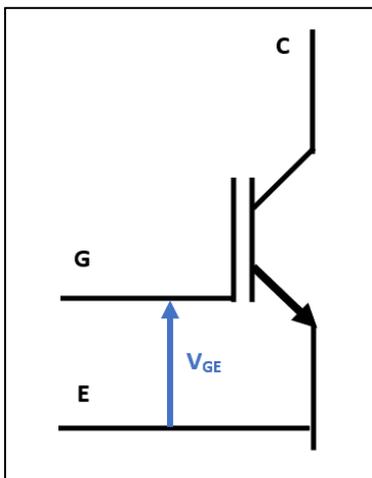
Como aclaración a la Ecuación 1., se considera V_1 la tensión nominal que se corresponde con el armónico primero.

Por lo tanto, dados los efectos no deseados que provoca este tipo de fenómeno, siempre se intenta reducir la distorsión armónica. Lo más habitual es disponer

de un filtro de salida que permita el paso de la señal a un rango de frecuencias determinadas e impida el paso de armónicos, es decir, que modifique el espectro en frecuencia de la señal de entrada en función de los requerimientos.

En este trabajo se utilizan los filtros de segundo orden de paso bajo LC que proporciona una tasa de caída de - 40 dB/década y que solo permite el paso de frecuencias bajas, atenuando las frecuencias altas. [40], [41]

2.2.3. IGBT



Dentro de las celdas del convertidor se ubican los IGBTs en paralelo con los diodos, por ello se procede a explicar muy brevemente qué es un IGBT y algunas de sus características.

Un IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) es un dispositivo semiconductor [Ilustración 11] muy similar al transistor, pero con puerta aislada. Se utiliza frecuentemente como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

Ilustración 11 - IGBT

Su funcionamiento viene determinado por sus curvas características [Ilustración 12], y sobre él se puede decidir su estado de encendido (ON) o apagado (OFF). Para definir el estado de encendido es necesario que la tensión puerta emisor (V_{GE}) tome el valor de 15 V, mientras que para que esté apagado, esta misma tensión debe adquirir valores inferiores a 0 V.

Como se puede apreciar en la curva de la Ilustración 12, en $\pm 1200V$ se produce el fenómeno llamado avalancha, el cual es destructivo y deja al IGBT inutilizable. Por este motivo, se intentará trabajar con tensiones suficientemente alejadas a este valor para evitar la ruptura del IGBT.

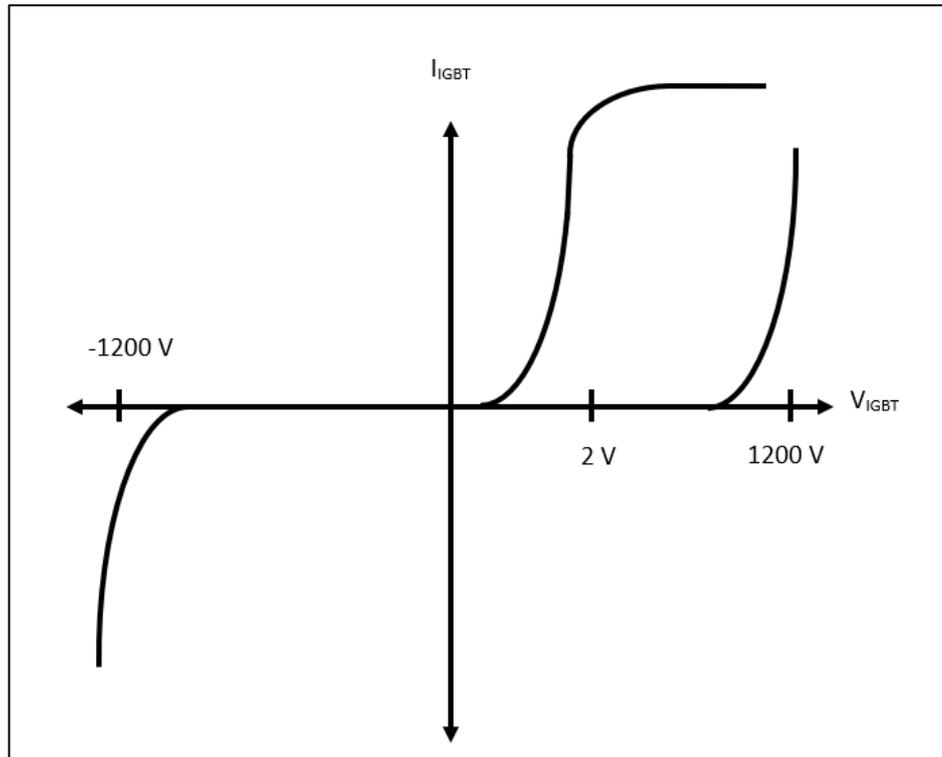


Ilustración 12 - Curva característica de un IGBT



2.3. LIBRERÍA DE MATLAB Y SIMULINK

En este trabajo se emplea Matlab y Simulink para el desarrollo del generador fotovoltaico, así como para la implementación del convertidor MMC.

Matlab es un sistema de análisis numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. [42], [43], [44]

Simulink es un entorno de programación visual que funciona sobre el entorno de programación de Matlab y que posee un mayor nivel de abstracción que el lenguaje Matlab. Se trata de una herramienta que permite diseñar y simular un sistema o modelo antes de convertirlo en hardware. Entre los diferentes modelos que permite realizar, se encuentran los diseños de sistemas de control para electrónica de potencia, que es lo que se pretende desarrollar en este trabajo. [45], [46]

Se utiliza la librería SimPowerSystems o Simscape Electrical que proporciona componentes y herramientas para modelar y simular sistemas electrónicos, mecatrónicos y eléctricos.

Este entorno ayuda a desarrollar sistemas de control y probar el rendimiento del sistema. Además, se pueden parametrizar los modelos mediante variables y expresiones de Matlab. [47], [48]



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

2.4. FPGA

En este punto se inicia la explicación de la FPGA (Field-Programmable Gate Array) empleada en este trabajo, así como sus características, los elementos que la conforman y la interacción con el entorno de la interfaz.

2.4.1. FPGA FÍSICA

Para la realización de este Trabajo Fin de Grado se dispone de una FPGA integrada en una tarjeta de breakout, es decir, una tarjeta de salida de señales.

Posee un puerto USB con dos conectores, uno en la tarjeta que contiene la FPGA y otro en la tarjeta de breakout, de los cuales solo se puede usar uno; y una conexión de alimentación de 3 A y 4 V. Además, la FPGA incluye cuatro LEDs, de los cuales uno de ellos se enciende al conectar el cable de la alimentación para indicar que el diseño dentro de la FPGA está operativo [Ilustración 13], otros dos para indicar que los procesadores que hay dentro de la FPGA están funcionando (encendidos) o en reposo (apagados), y el último que no se utiliza.

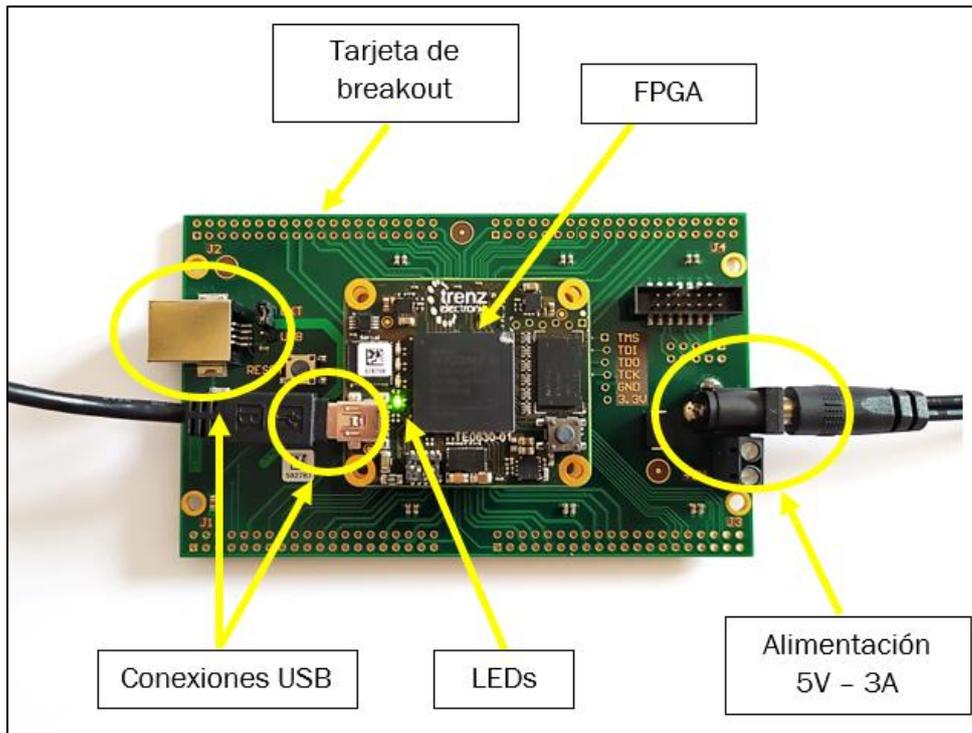


Ilustración 13 - FPGA física

2.4.2. DEFINICIÓN FPGA

Una FPGA es un dispositivo semiconductor programable que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada mediante un lenguaje de descripción especializado. Se puede definir como una matriz de celdas compuestas por memorias 64x1, que también pueden ser usadas como memorias 32x2, de tal forma que puede implementar funciones lógicas usando esas memorias como si fueran ROM, pero también puede implementar memorias RAM reales, donde la aplicación puede leer y escribir datos. [49]

Una de las características principales de las FPGAs es que se pueden reprogramar y reducen de forma considerable los costos de ingeniería destinados a investigación, diseño y prueba de un nuevo producto.

En las FPGAs abundan los recursos de interconexión internos, presentan funciones de alto nivel como sumadores y multiplicadores además de memorias, y combinan los bloques lógicos e interconexiones con microprocesadores y periféricos relacionados para modelar un sistema programable completo en un chip. [50], [51]

2.4.3. ELEMENTOS QUE LA CONFORMAN

La FPGA utilizada contiene los siguientes elementos que se pueden observar en la Ilustración 14 y que se explican seguidamente:

- Dos procesadores secuenciales
- Memorias privadas en procesadores
- Un procesador vectorial (32 MAC/clock)
- Una memoria compartida (2K)
- 36 generadores de PWM

Los dos procesadores secuenciales, es decir, procesadores que no ejecutan más de una instrucción a la vez, se denominan de la siguiente manera:

- Core 1 o HIL (Hardware in the Loop): simula el comportamiento de la planta
- Core 2 o RCP (Prototipado rápido de controladores): simula la operación del controlador para controlar la planta

Los dos permiten la programación en lenguaje C, el cual es convertido a lenguaje ensamblador gracias a la función del compilador; no obstante, llegado el caso de que se quiera optimizar, se puede programar el procesador directamente en ensamblador. De hecho, el procesador dedicado a simular los

componentes no lineales de la planta se programa íntegramente en ensamblador.

Además, pueden trabajar con variables escalares y vectoriales de tipo entero o en coma flotante, y pueden realizar operaciones de multiplicación con acumulación en coma flotante en un solo ciclo de reloj.

Cuentan con un total de hasta 256 variables internas almacenadas en sus propias memorias privadas y 2048 externas de la memoria compartida. Como aclaración, existe una distinción entre el tipo de variables que puede utilizar la FPGA para el desarrollo de esta memoria:

- Escalares: se pueden distinguir cuatro tipos (R, S, P y K) atendiendo a la clasificación que se recoge en la Tabla 5. Este tipo de variables son siempre privadas de cada procesador, es decir, solo un procesador puede escribir y leer mientras que el otro no tiene acceso a dicha variable. Estas variables son las consideradas internas
- Vectoriales: pueden ser compartidas por ambos procesadores si se describen con el mismo nombre, es decir, ambos procesadores pueden acceder a esa variable, o privadas si se emplean nombres distintos. Estas variables son las consideradas externas

Tabla 5 - Tipo de variables escalares de la FPGA

TIPO DE VARIABLE	NÚMERO DISPONIBLE	DESCRIPCIÓN
R	96	Variables globales que se almacenan en posiciones fijas de la memoria
S	32	Variables locales o argumentos que se almacenan en una pila de datos
P	64	Variables que almacenan el resultado de las operaciones de multiplicación
K	64	Variables que recogen valores constantes resultados de distintas operaciones

Además, cada Core utiliza 128 puertos administrados de la siguiente forma: los puertos del 64 al 127 son empleados para comunicarse con el procesador vectorial, y los otros puertos admiten diversos usos, entre ellos la comunicación con los 36 generadores de PWM.

Una característica que cabe mencionar del procesador utilizado es su función de watch_dog implementada por software con el fin de detectar que el procesador tarde más de lo que debería en ejecutar el código. El procesador se ejecuta en el tiempo asignado al Loop, en este trabajo 250 microsegundos, y



en el caso de que termine de realizar todas las instrucciones antes, se mantiene a la espera del comienzo del siguiente ciclo; pero puede ocurrir que necesite más tiempo para llevar a cabo todas las instrucciones demandadas. En ese caso, el procesador ejecutaría un halt y se detendría.

También se dispone de dos memorias de programa, una para cada procesador, cuya finalidad es almacenar las instrucciones con un total de 8192 instrucciones de 32 bits cada una. Estos procesadores ejecutan cada instrucción en un ciclo de reloj.

El procesador vectorial maneja 32 magnitudes en coma flotante y periódicamente calcula un conjunto nuevo de valores basado en los resultados anteriores y en los valores recibidos por cada uno de los procesadores secuenciales externos, manejando datos de 80 bits. Este recurso se emplea para evaluar las tensiones y corrientes de las bobinas, condensadores y resistencias de la planta; es decir, los elementos lineales de la planta, a diferencia del procesador HIL que calcula los valores de los elementos no lineales de la planta, como es el conjunto del MMC. El motivo es que las operaciones que realiza son rígidas, es decir, solo puede llevar a cabo los siguientes tipos de operaciones:

- Inicializar variables
- Mantener valores
- Multiplicaciones
- Multiplicaciones con acumulación positiva o negativa

Por ello, la principal ventaja de este procesador es que puede realizar 32 operaciones de multiplicación y acumulación en coma flotante cada ciclo de reloj.

Por otra parte, este procesador tiene como entradas dos multiplexores, los cuales cuentan con 160 entradas: 64 destinadas a valores aportados por el Core 1, otras 64 para valores aportados por el Core 2, y otras 32 que pueden ser constantes o los propios valores calculados por el procesador vectorial. Las 32 constantes provienen de 32 memorias de 256 valores de 80 bits.

Otro elemento disponible es la memoria compartida de doble puerto. Esta es una memoria a la que se puede acceder simultáneamente desde diferentes sistemas. En ella se pueden almacenar 2048 variables vectoriales de 80 bits y pueden acceder a ella los dos Cores.

Finalmente, se dispone de 36 generadores de PWM cuyo control está disponible para los dos procesadores, aunque es muy conveniente que, en cada modelo de simulación, cada generador de PWM sea utilizado solo por uno de los procesadores.

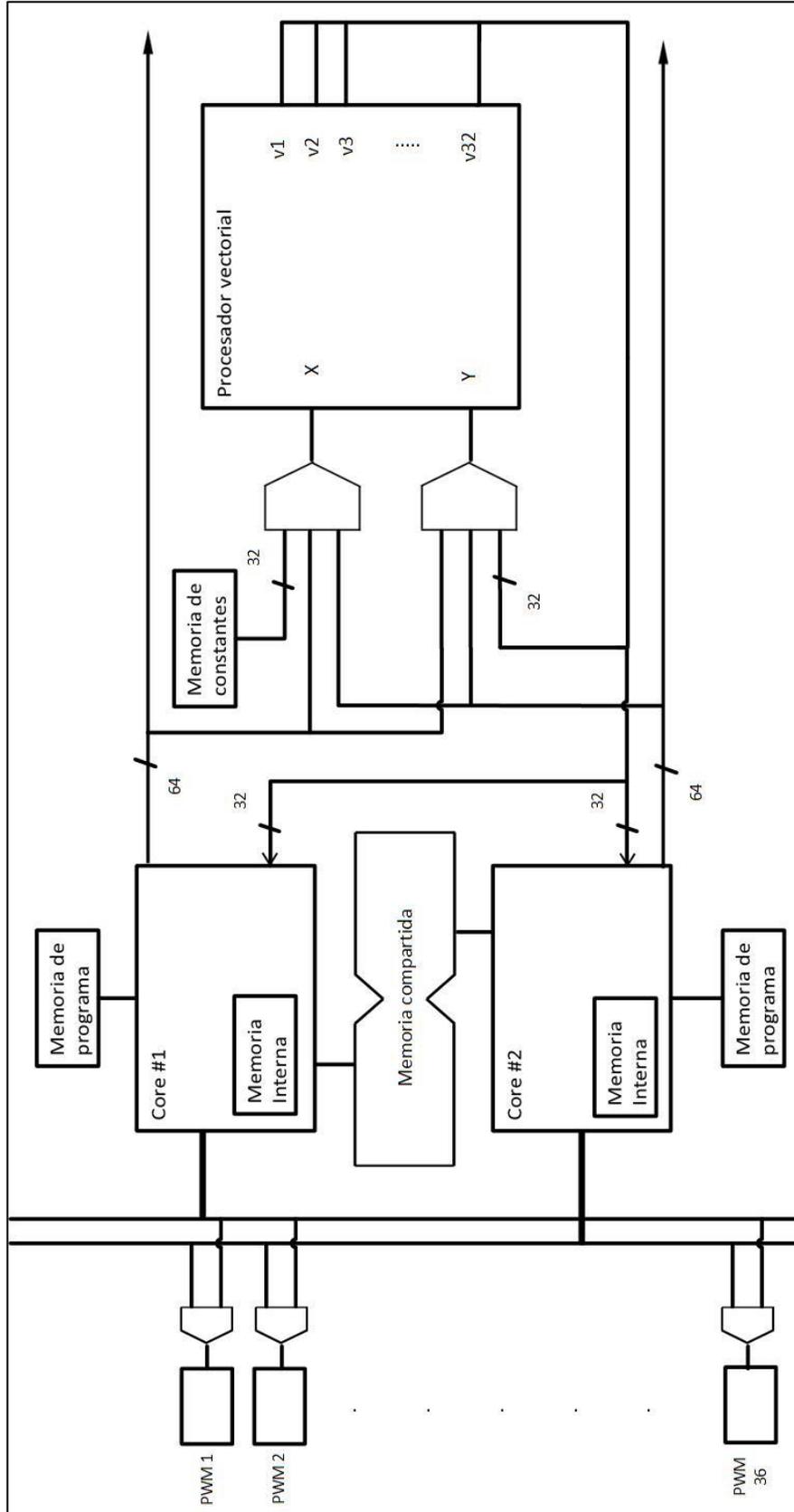


Ilustración 14 - Arquitectura Tarjeta FPGA

2.4.4. INTERFAZ

A continuación, se muestran las opciones que proporciona este entorno de simulación.

Cuenta con un bloque DIO Control [Ilustración 15] que sirve para conectar las salidas digitales a sus correspondientes entradas. En este caso aparecen conectadas 24 ya que es el número de celdas que se emplea en este trabajo.

También se dispone de un convertidor MMC. Las características seleccionadas para este módulo se pueden ver en la Ilustración 16. Se puede observar que tiene un nombre propio, en este caso 'mmc01', que se puede elegir el número de celdas, la tensión de las celdas y si se desea alimentar las celdas mediante baterías o condensadores. En caso de elegir condensadores, como se puede ver, se puede indicar la capacitancia de estos, así como si se desea realizar una precarga de los mismos y si se desea añadir una fuente de corriente a las celdas. También se puede apreciar que se trata de un convertidor con tres ramas superiores y tres ramas inferiores. Cabe destacar que cada módulo de celda MMC recibe un nombre único para poder acceder a los voltajes de sus condensadores desde el módulo RCP. Finalmente, se puede seleccionar la opción de colocar resistencias en serie con los semiconductores, así como determinar su valor.

Por otra parte, el RCP Core que simula el controlador, se puede configurar con los parámetros que aparecen en la Ilustración 17. Además, como se puede ver hay diferentes pestañas:

- Config: se utiliza para definir el tiempo de ciclo del controlador, los puertos de interfaz, las ramas y las medidas. Además, se pueden medir distintos tipos de señales como se puede ver en la Tabla 6

Tabla 6 - Posibles tipos de señales en la FPGA

DISEÑO TIPO SEÑAL	DESCRIPCIÓN
	Señal eléctrica
	Señal numérica
	Señal mecánica

- Global: sirve para definir las variables globales que se van a emplear en el código, así como las funciones. Permite utilizar variables en coma

flotante (double), enteras (int) y booleanas (bool). También se admite la declaración de vectores

- Setup: parte del código que se ejecuta únicamente en el primer ciclo y sirve para inicializar las variables globales y las salidas del módulo
- Loop: parte del código que se ejecuta de forma periódica
- ASM: en esta pestaña se genera el código ensamblador a partir del código en C desarrollado
- Help: aporta una pequeña documentación que describe las pestañas previamente citadas

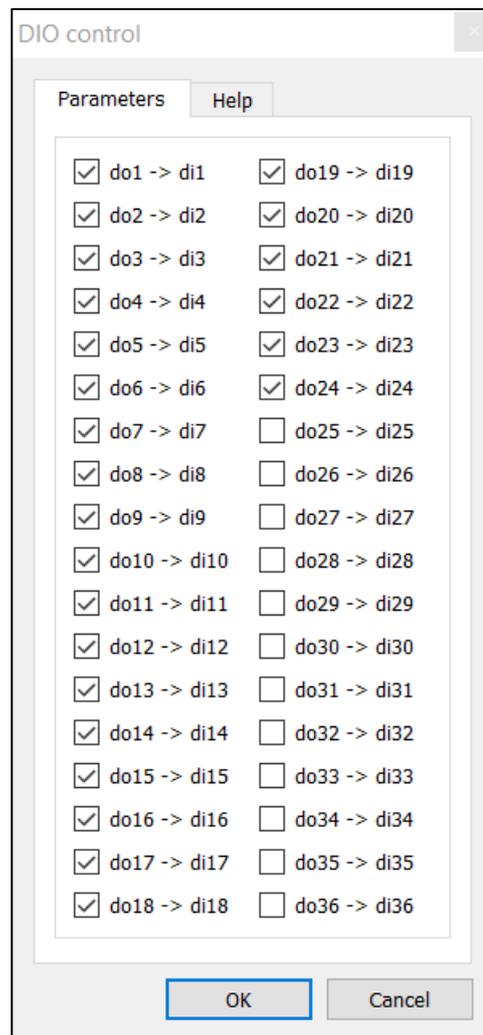


Ilustración 15 - MMC en la FPGA: DIO Control

MMC Converter [ph3]

Parameters Help

Basic features

Module tag
mmc01

Number of serial cells per branch
4 cells

Cell voltage (V)
807.4

Use batteries
 Use capacitors

Capacitance of each cell (F)
0.03

Precharge capacitors
 Add current sources to cells

Converter inputs

Phase A upper arm switch control
Digital Inputs 1 ~ 4

Phase A lower arm switch control
Digital Inputs 5 ~ 8

Phase B upper arm switch control
Digital Inputs 9 ~ 12

Phase B lower arm switch control
Digital Inputs 13 ~ 16

Phase C upper arm switch control
Digital Inputs 17 ~ 20

Phase C lower arm switch control
Digital Inputs 21 ~ 24

Semiconductor features

Device series resistance (Ohm)
0.1

OK Cancel

Ilustración 16 - MMC en la FPGA: características del convertidor

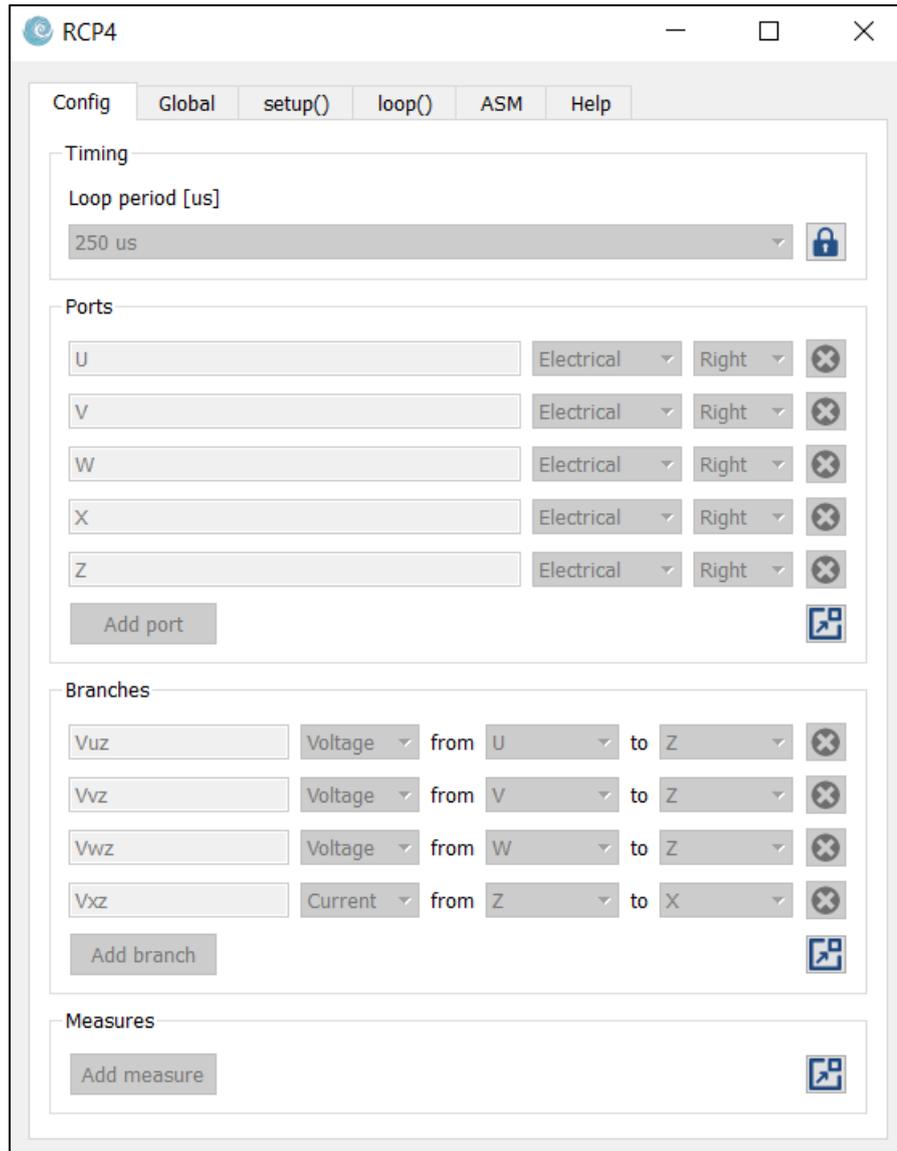


Ilustración 17 - MMC en la FPGA: RCP Core

Además, existen diferentes instrucciones que se pueden usar para implementar el código en lenguaje C, de las cuales, algunas de ellas se recogen en la Tabla 7.

Cabe destacar la diferencia entre las instrucciones de `pwmConfig` y `pwmWidth`. La primera reinicia la portadora en cada ciclo, utilizando un tiempo de dos ciclos de reloj, a diferencia de la segunda que únicamente emplea un ciclo de reloj, pero conllevando una posible desincronización.



Tabla 7 - Instrucciones posibles a utilizar en el RCP Core de la FPGA

INSTRUCCIONES	PARAMETROS DE ENTRADA	DESCRIPCIÓN
pwmConfig(<canal>, <periodo en microsegundos>, <tipo rampa>, <ciclo de servicio>)	Canal	Del 1 al 36
	Periodo en microsegundos	Por ejemplo 500 μ s
	Tipo de rampa	0: descendente y ascendente 1: ascendente y descendente
	Ciclo de servicio	Porcentaje calculado
pwmWidth(<canal>, <dutyCycle>)	Canal	Del 1 al 36
	Ciclo de servicio	Porcentaje calculado
wrapToPI()	Double	Ajusta cualquier valor a $\pm\pi$
ab2uvw()	Tensiones alfa y beta	Transformada de Park inversa
loopPeriod()		Devuelve el valor especificado en Timing/Loop Period dentro de la pestaña "Config"
loopMicroseconds()		Proporciona los microsegundos que se necesitan desde el comiendo del periodo del Loop



CAPÍTULO III – DESARROLLO

*Explicación de los métodos, la programación y las estructuras utilizadas,
además de los resultados obtenidos en este trabajo.*



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



3.1. MODELO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO

En este apartado se pretende desarrollar el modelo del generador fotovoltaico que se va a usar en esta aplicación. Para ello, como se ha mencionado anteriormente, se emplean los módulos fotovoltaicos detallados en el apartado 2.1.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO DE REFERENCIA.

El objetivo es buscar una aproximación polinómica con los datos de los módulos de referencia para simular su comportamiento a través de una fuente de corriente dependiente. Para ello, se ha decidido comenzar estudiando la colocación de los paneles fotovoltaicos y posteriormente se ha realizado la aproximación.

3.1.1. DISPOSICIÓN DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Se parte de un módulo fotovoltaico policristalino STP320-24-Ve fabricado por Suntech con los parámetros que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 - Parámetros del módulo fotovoltaico

PARÁMETROS	VALOR
POTENCIA CC DE SALIDA	320 W
TENSIÓN A LA POTENCIA MÁXIMA	36.7 V
CORRIENTE A LA POTENCIA MÁXIMA	8.72 A
TENSIÓN EN CIRCUITO ABIERTO	45.6 V
CORRIENTE EN CORTOCIRCUITO	9.07 A

En este caso, se está empleando un módulo que aporta una potencia máxima de 320 W con una tensión en el punto de máxima potencia de 36.7 V y una corriente de 8.72 A.

Como se ha expuesto anteriormente, los IGBTs empleados soportan una tensión máxima de 1200 V, por lo que se pretende buscar un valor aproximado de dos tercios de esta tensión para evitar tanto su desaprovechamiento como su ruptura. Por este motivo se toma la decisión de colocar una serie de 22 paneles en cada una de las celdas, tal y como se muestra en la Ilustración 18, de tal forma que se obtiene una tensión máxima de 807.4 V [Ecuación 2].

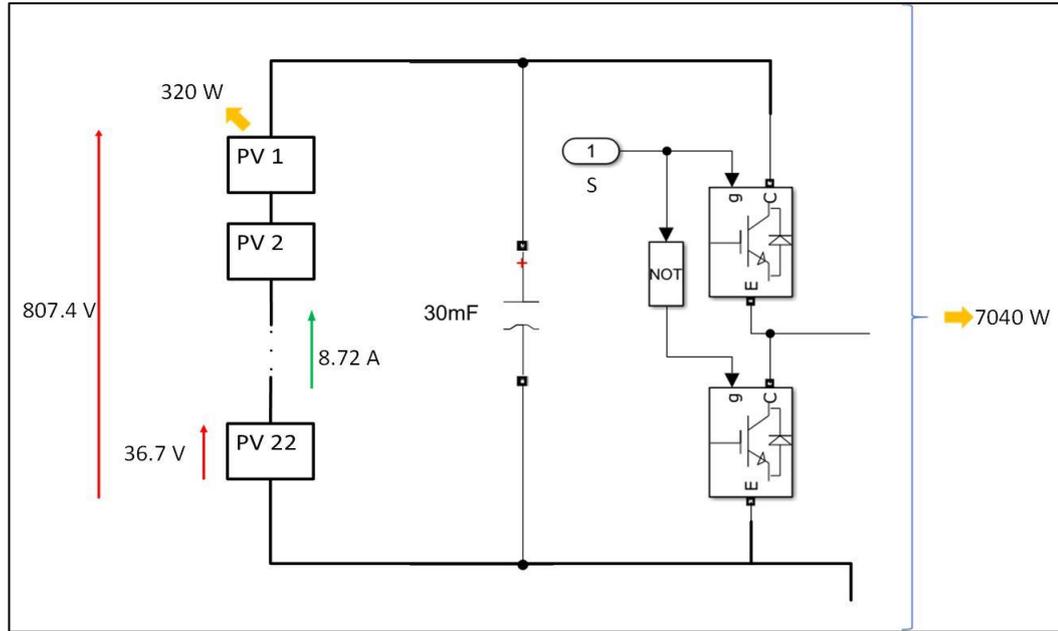


Ilustración 18 - Disposición de los paneles fotovoltaicos

Ecuación 2 - Cálculo de la tensión que aporta el generador fotovoltaico con la disposición elegida

$$V_{\text{generador}} = V_{pv \text{ máx}} \cdot N_{pv} = 36.7 \frac{V}{\text{panel}} \cdot 22 \frac{\text{paneles}}{\text{serie}} = 807.4 \frac{V}{\text{serie}}$$

De esta forma se procede a calcular los demás parámetros del generador que se va a utilizar y que se han presentado en la Ilustración 18 multiplicando por 22 sus valores, a excepción de la corriente, la cual mantiene su valor al colocar una única serie [Ecuación 3, Ecuación 4, Ecuación 5 y Ecuación 6].

Ecuación 3 - Cálculo de la corriente que aporta el generador fotovoltaico con la disposición elegida

$$I_{\text{generador}} = I_{pv \text{ máx}} = 8.72 \frac{A}{\text{serie}}$$

Ecuación 4 - Cálculo de la potencia que aporta el generador fotovoltaico con la disposición elegida

$$P_{\text{generador}} = P_{pv \text{ máx}} \cdot N_{pv} = 320 \frac{W}{\text{panel}} \cdot 22 \frac{\text{paneles}}{\text{serie}} = 7040 \frac{W}{\text{serie}}$$

Ecuación 5 - Cálculo de la tensión en circuito abierto que aporta el generador fotovoltaico con la disposición elegida

$$\begin{aligned} V_{\text{generador}} \\ \text{circuito abierto} &= V_{pv \text{ circuito abierto}} \cdot N_{pv} = 45.6 \frac{V}{\text{panel}} \cdot 22 \frac{\text{paneles}}{\text{serie}} \\ &= 1003.2 \frac{V}{\text{serie}} \end{aligned}$$



Ecuación 6 - Cálculo de la corriente de cortocircuito que aporta el generador fotovoltaico con la disposición elegida

$$I_{\text{generador cortocircuito}} = I_{\text{pv cortocircuito}} = 9.07 \frac{A}{\text{serie}}$$

Entonces, cada celda aportará una potencia de 7040 W como se ha calculado en la Ecuación 4. Dado que en cada fase se dispone de 8 celdas, 4 en cada rama, la potencia que suministra cada fase será de 56320 W [Ecuación 7].

Ecuación 7 - Cálculo de la potencia aportada por los paneles fotovoltaicos en cada fase con la disposición elegida

$$P_F = 8 \cdot P_{sm} = 8 \frac{\text{celdas}}{\text{fase}} \cdot 7040 \frac{W}{\text{celda}} = 56320 \frac{W}{\text{fase}}$$

Y como se dispone de un sistema de 3 fases, la potencia total aportada por el generador fotovoltaico tomará un valor de 168960 W [Ecuación 8].

Ecuación 8 - Cálculo de la potencia aportada por los paneles fotovoltaicos en total con la disposición elegida

$$P_T = 3 \cdot P_F = 3 \text{ fases} \cdot 56320 \frac{W}{\text{fase}} = 168960 W$$

Al final, cada fase aporta 3230 V en continua [Ecuación 9], lo cual significa que se pueden generar hasta ± 1600 V cresta en alterna, de los cuales se toma la decisión de generar ± 1200 V cresta como se verá más adelante.

Ecuación 9 - Tensión aportada por cada fase del MMC

$$807.4 \frac{V_{\text{fase}}}{\text{celda activada}} \cdot 4 \text{ celdas activadas} = 3230 V_{\text{fase}}$$

A modo de comparación con el modelo de referencia, basta con multiplicar ciertos valores por 72, ya que en la disposición de referencia se han colocado 72 series de 22 paneles, obteniéndose los valores que se han mostrado anteriormente en la Tabla 4 [Ecuación 10].

Ecuación 10 - Cálculo de los parámetros del generador de referencia

$$I_{\text{generador}} = 8.72 \frac{A}{\text{serie}} \cdot 72 \text{ series} = 627.84 A$$

$$P_{\text{generador}} = 320 \frac{W}{\text{panel}} \cdot 22 \frac{\text{paneles}}{\text{serie}} \cdot 72 \text{ series} = 506.9 kW$$

$$V_{\text{generador}} = 45.6 \frac{V}{\text{panel}} \cdot 22 \frac{\text{paneles}}{\text{serie}} = 1003.2 \frac{V}{\text{serie}}$$
$$I_{\text{generador}} = 9.07 \frac{A}{\text{serie}} \cdot 72 \text{ series} = 653.04 A$$

3.1.2. APROXIMACIÓN CURVA P-V DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO UTILIZADO

Una vez se conoce la disposición del generador fotovoltaico, se procede a realizar la aproximación de sus curvas características para después implementar dicho generador en los diferentes entornos de simulación.

Analizando las dos curvas [Ilustración 4 e Ilustración 5], se decide realizar la aproximación de la curva P-V ya que se puede elaborar una aproximación polinómica que facilite el cálculo, a diferencia de la curva I-V que presenta una forma exponencial.

Estudiando la imagen se puede diferenciar dos tramos en la curva P-V [Ilustración 5], cada uno de los cuales se puede representar con diferentes funciones polinómicas:

- 1) Tramo 1 de 0V a 700V
- 2) Tramo 2 de 700V a 1003.2V

Observando la forma de cada tramo, para el tramo 1 se ha estudiado la posibilidad de recta, polinomio de segundo orden y polinomio de tercer orden; mientras que para el tramo 2 se ha analizado la posibilidad de polinomio de cuarto orden y polinomio de sexto orden. Otras posibilidades han sido descartadas por la forma que presentan los polinomios.

Se toma como resultado más aproximado el polinomio de segundo orden y el polinomio de sexto orden para los tramos 1 y 2 respectivamente puesto que ofrece una forma muy similar a la curva P-V [Ilustración 19].

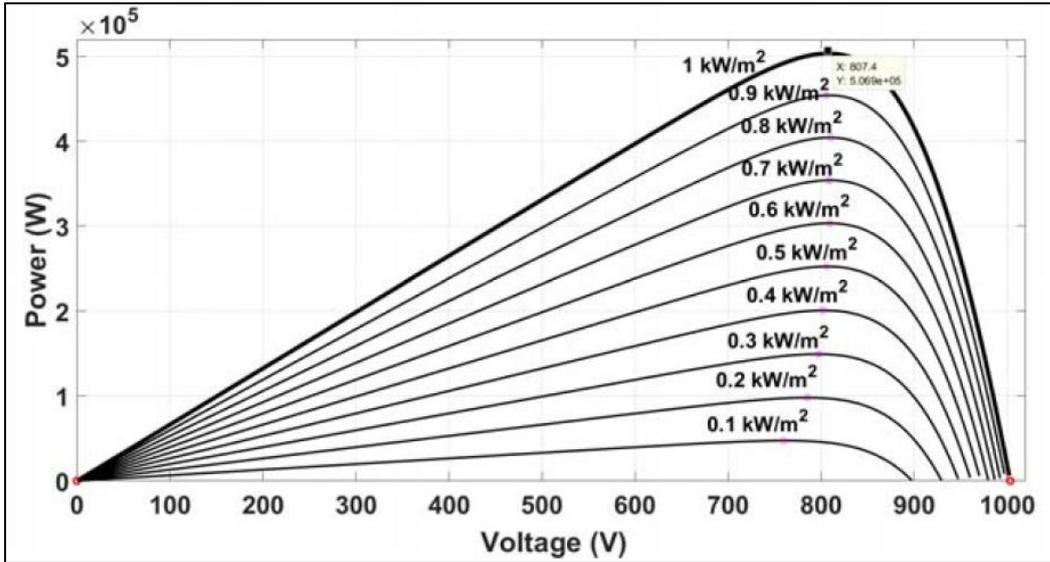


Ilustración 19 - Curva P-V para diferentes irradiancias y T=25°C del generador fotovoltaico de referencia

Para desarrollar el generador fotovoltaico utilizado en este trabajo, los polinomios base empleados y sus derivadas son:

1) Tramo 1:

Ecuación 11 - Polinomio base del tramo 1

$$P_{pv} = A \cdot V_{pv}^2 + B \cdot V_{pv} + C$$

Ecuación 12 - Derivada del polinomio base del tramo 1

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 2 \cdot A \cdot V_{pv} + B$$

2) Tramo 2:

Ecuación 13 - Polinomio base del tramo 2

$$P_{pv} = D \cdot V_{pv}^6 + E \cdot V_{pv}^5 + F \cdot V_{pv}^4 + G \cdot V_{pv}^3 + H \cdot V_{pv}^2 + I \cdot V_{pv} + J$$

Ecuación 14 - Derivada del polinomio base del tramo 2

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 6 \cdot D \cdot V_{pv}^5 + 5 \cdot E \cdot V_{pv}^4 + 4 \cdot F \cdot V_{pv}^3 + 3 \cdot G \cdot V_{pv}^2 + 2 \cdot H \cdot V_{pv} + I$$

Que junto a las siguientes condiciones obtenidas a partir de escalar los datos del generador fotovoltaico de referencia [Tabla 4 e Ilustración 5], es decir, dividir entre las 72 series de las que consta este último:

- 1) Tramo 1:
 - a. Origen: (0,0) [V, W]
 - b. Punto de la gráfica: (600, 5555.226766) [V, W]
 - c. Final: (700, 6388.510781) [V, W]

- 2) Tramo 2:
 - a. Origen: (0,0) [V, W]
 - b. Coincidencia en valor con el otro tramo: (700, 6388.510781) [V, W]
 - c. Coincidencia en pendiente con el otro tramo: (700, 8.200572845) [V, W]
 - d. Punto de máxima potencia: (807.4, 7040) [V, W]
 - e. Pendiente nula en el punto de máxima potencia: (807.4, 0) [V, W]
 - f. Punto de la gráfica: (900, 5763.54777) [V, W]
 - g. Circuito abierto: (1003.2, 0) [V, W]

Permite resolver el sistema obteniendo un valor para cada una de las constantes [Tabla 9] de los polinomios [Ecuación 11 y Ecuación 13].

Tabla 9 - Valores de las constantes de los polinomios para el generador fotovoltaico utilizado

Tramo	Constante	Valor
1	A	-0.001322673
	B	10.0523151
	C	0
2	D	3.57988E-12
	E	-1.42497E-08
	F	2.22097E-05
	G	-0.017016857
	H	6.426997334
	I	-949.7475378
	J	0

De esta forma se consigue la curva P-V de aproximación del generador fotovoltaico utilizado en este trabajo mostrada en la Ilustración 20, donde se puede ver que el modelo presenta continuidad en valor. Además, se ha estudiado su derivada y se puede ver que también presenta continuidad en el punto donde se produce el cambio de tramo presentando una función

decreciente en el primer tramo y acrecentando este decrecimiento a partir del punto de máxima potencia [Ilustración 21].

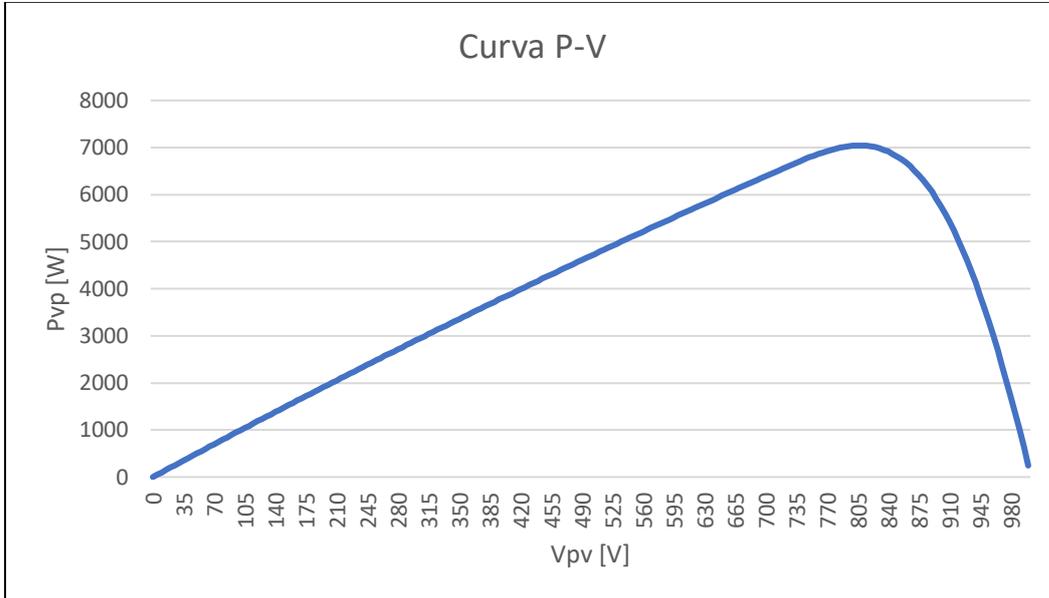


Ilustración 20 - Curva P-V del generador fotovoltaico utilizado

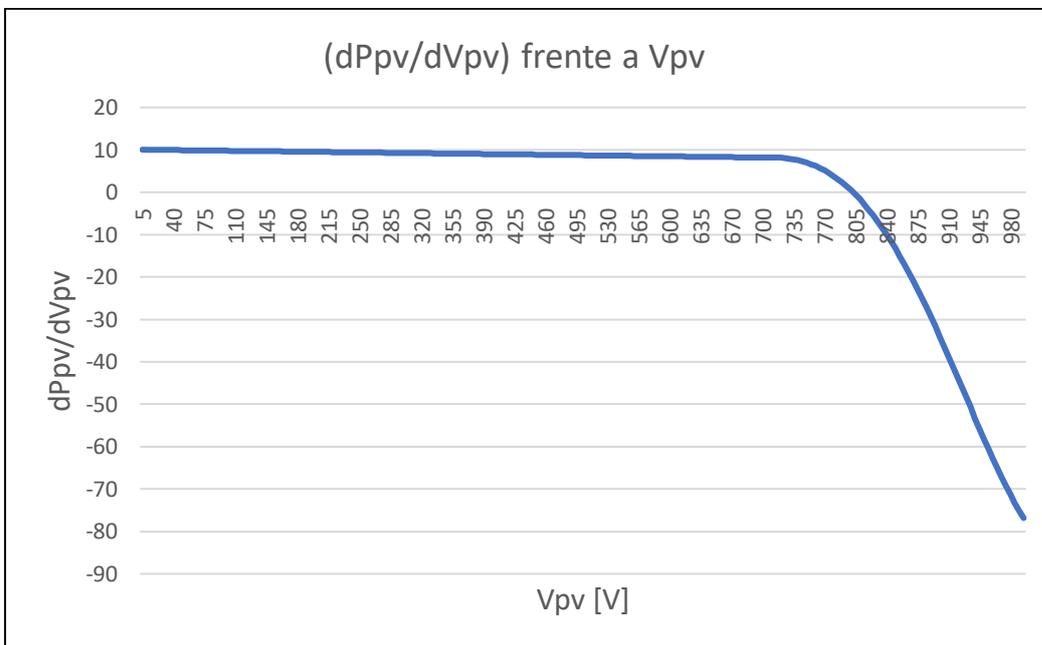


Ilustración 21 - Curva de la derivada de la potencia en función de la tensión frente a la tensión del generador fotovoltaico utilizado

3.1.3. COMPROBACIÓN DE LA APROXIMACIÓN CON EL GENERADOR FOTOVOLTAICO DE REFERENCIA

Se verifica que el modelo desarrollado en el apartado anterior, 3.1.2 APROXIMACIÓN CURVA P-V DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO UTILIZADO, es adecuado escalando de nuevo las condiciones para obtener las de referencia [Tabla 4 e Ilustración 5] y así resolver el sistema obteniendo de nuevo el valor de cada una de las constantes de los polinomios de la Ecuación 11 y Ecuación 13.

Realizando una representación gráfica se puede comprobar que el modelo se ajusta correctamente al generador fotovoltaico de referencia [Ilustración 22].

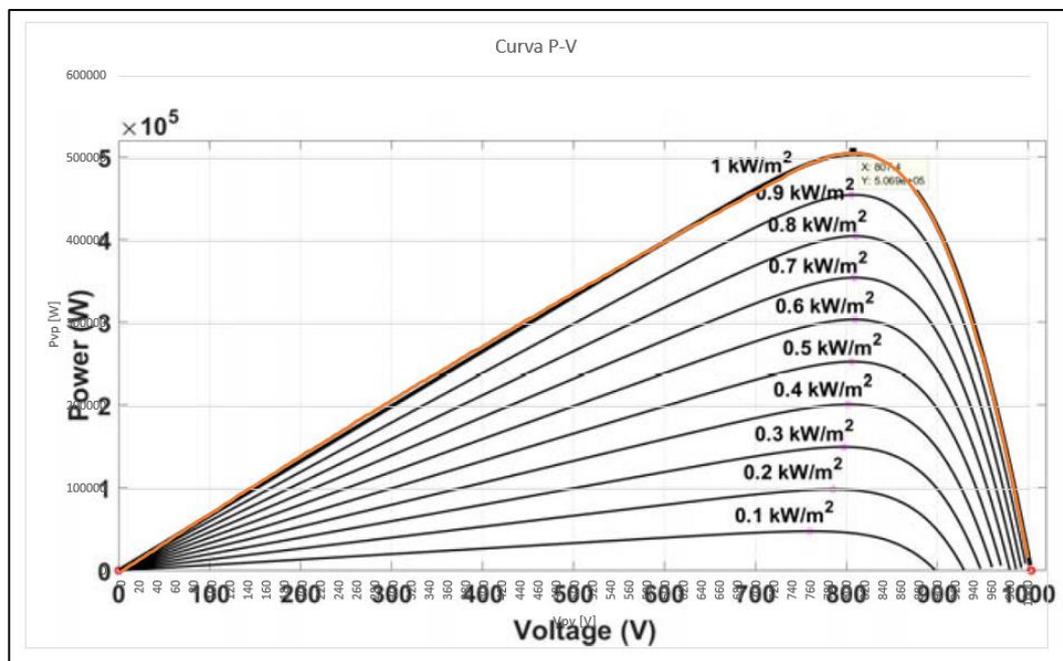


Ilustración 22 - Superposición curva P-V del generador fotovoltaico de referencia (negro) y curva P-V aproximada del generador fotovoltaico de referencia (azul)



3.2. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK

A lo largo de este punto se describe la simulación realizada en Matlab/Simulink. Para ello se expone el esquema utilizado, el código implementado, los resultados obtenidos y ciertas características a destacar del desarrollo.

3.2.1. ESQUEMA DEL CONVERTIDOR

En este trabajo se desarrolla un convertidor modular multinivel de forma gradual. A continuación, se describe un breve resumen de su consecución.

La base para construir este equipo consta de una planta y un controlador sencillo, el cual se muestran en la Ilustración 23. La planta inicial es un convertidor CC/CC que alimenta a una carga RC a partir de una batería. En cuanto al controlador, se pueden diferenciar dos partes, una que se ejecuta cada 250 microsegundos y se usa para implementar los reguladores como si se estuviera empleando un procesador, y la otra se ejecuta cada 1 microsegundo e implementa un generador PWM similar a los disponibles habitualmente en los procesadores de control.

A partir de esta situación inicial, se siguen los siguientes pasos:

- Cambio de la señal moduladora a senoidal
- Elección del tipo de portadora
- Sistema monofásico con una rama que contenga 4 celdas o módulos de conmutación
- Sistema monofásico con dos ramas de 4 celdas cada una. Dichas celdas son alimentadas con baterías
- Sistema trifásico con dos ramas de 4 celdas cada una. Dichas celdas son alimentadas con baterías
- Sustitución de las baterías de las celdas por condensadores
- Modelo alimentado con fuentes de corrientes dependientes dentro de las celdas

De tal forma que se llega al modelo actual que se expone en la Ilustración 24.

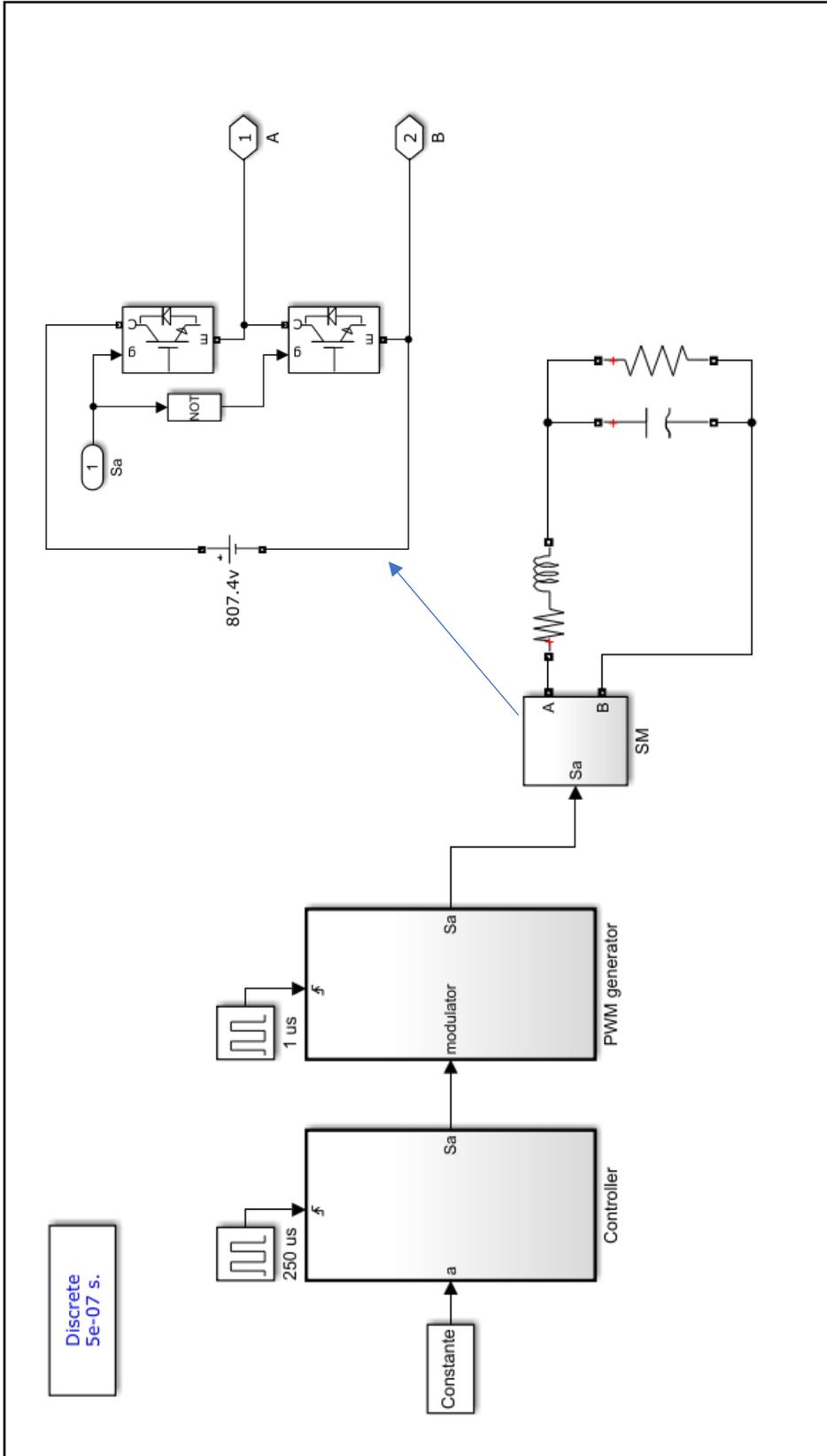


Ilustración 23 - Base para construir el MMC en Matlab/SIMULINK



Como se puede apreciar en la Ilustración 24, el modelo final consta del convertidor modular multinivel, el filtro y la carga.

Dentro del MMC se puede distinguir un controlador que se ejecuta cada 250 microsegundos y que envía las señales de control, sincronización, tipo de rampa y el cálculo de la corriente que inyectan las fuentes de corriente dependientes a cada una de las ramas de cada fase.

Se trata de un sistema trifásico con dos ramas: superior (se hará referencia a esta con la letra u o la palabra up) e inferior (se hará referencia a esta con la letra l o la palabra low). Estas ramas están conectadas situando entre ellas una bobina, denominada bobina de rama, y una resistencia de 0.1Ω que proporciona amortiguamiento. Cada rama consta de cuatro funciones embebidas de Matlab que implementan un generador de PWM respectivamente como se expone en la Ilustración 25. Así, se suma un total de 24 funciones embebidas que simulan el comportamiento de 24 generadores de PWM ejecutándose cada un microsegundo. Cada uno de estos es capaz de cambiar el estado de la señal de disparo de un módulo de conmutación denominados celda o SM (switch model) [Ilustración 27]. Éstas a su vez están compuestas por dos IGBT en serie conectados a un condensador en paralelo y a una fuente de corriente dependiente de la tensión del condensador que simula el comportamiento de una serie de 22 paneles fotovoltaicos, disposición previamente elegida.

Como aclaración, en la Ilustración 25 aparecen dos funciones embebidas. Una de ellas denominada 'SALIDA 1U' cuya finalidad es generar un vector con las tensiones de los condensadores para realimentarlo al controlador, y la otra 'I_{pv}' que se encarga de adquirir los valores correspondientes a la fase, rama y celda de la corriente calculada. La finalidad de ambos es clarificar el esquema general evitando la saturación por líneas.

Dentro de cada fase, las ramas están conectadas entre sí, colocando una impedancia en cada rama; y en el punto medio de ambas, el filtro y la carga [Ilustración 26].

Además, el neutro, es decir, el punto medio de las tres cargas está conectado al punto medio de continua (entre las dos baterías). La resistencia que se encuentra en medio permite decidir el tipo de neutro. En este caso, al ser de un $M\Omega$, se cuenta con neutro flotante. En relación a las tres resistencias de un $M\Omega$, se colocan para permitir la simulación numérica de las tres bobinas, las de rama y la de salida, que se encuentran en un punto. Al simularse esas tres bobinas como fuentes de corriente se necesita una rama adicional resistiva que permita una suma de corrientes no completamente nula.



En cuanto al bloque denominado ‘Filtro y carga’, contiene como su propio nombre indica el filtro y la carga que se han introducido. El filtro que se coloca es de tipo LC. Cabe destacar que se las bobinas llevan consigo resistencias de 0.1Ω con la finalidad de modelar todas las pérdidas y proporcionar amortiguamiento. Por otra parte, la carga que se coloca es resistiva.

Finalmente, el empleo de las dos baterías en la zona de continua tiene por objetivo conseguir que la tensión de continua se mantenga estable realizando la función equivalente a un regulador, procurando realizar cualquier ajuste cuando se produce una variación de potencia entre la tensión de continua que aportan los paneles fotovoltaicos y la tensión de alterna demandada por la carga. Además, para mejorar este procedimiento se han colocado dos resistencias de 5Ω con la finalidad de mantener las baterías débilmente acopladas al convertidor MMC.

El código empleado en el controlador y en los generadores de PWM se muestra de forma completa en los Anexos de este Trabajo Fin de Grado.

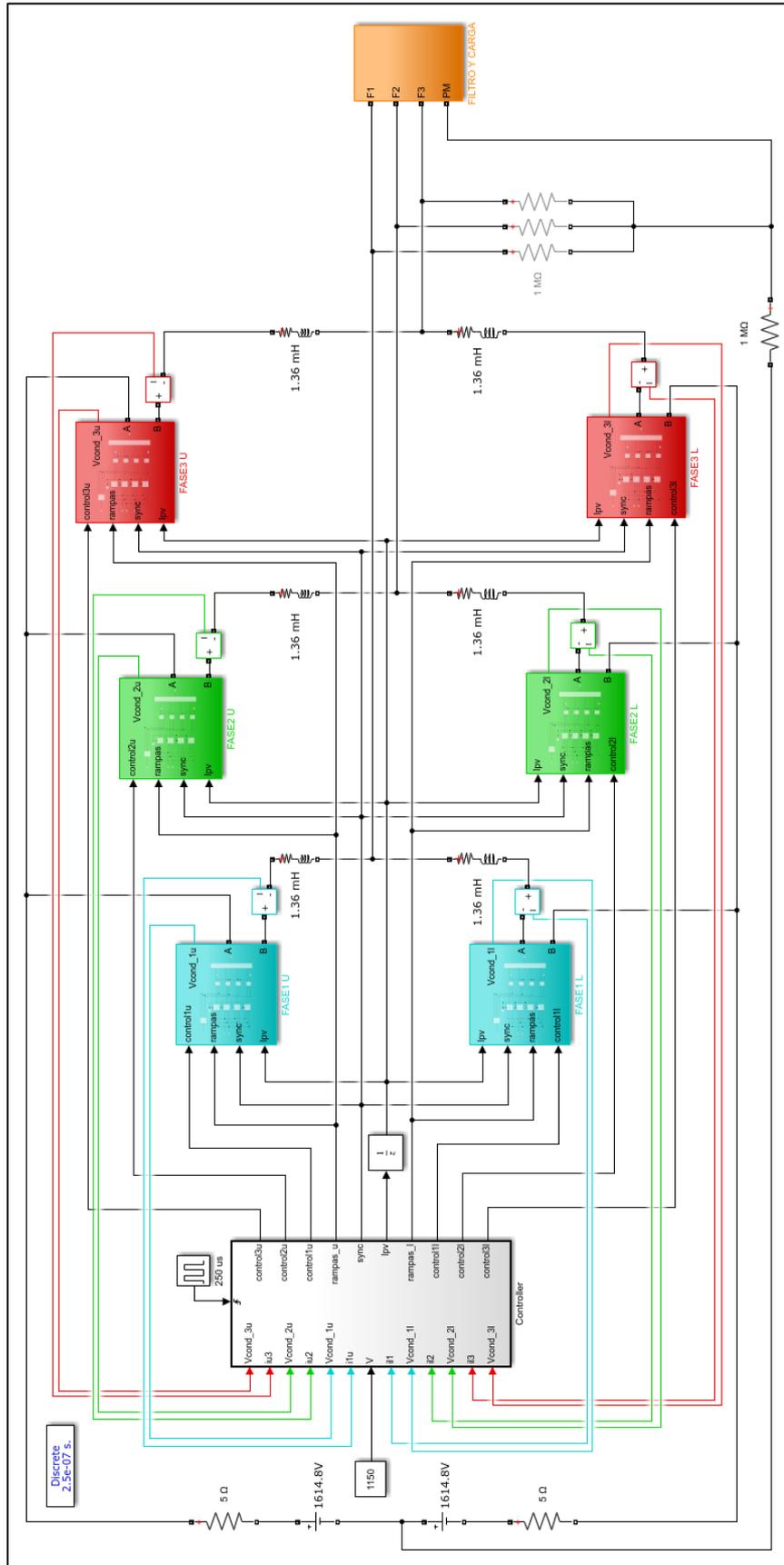


Ilustración 24 - MMC en Matlab/SIMULINK: Esquema general

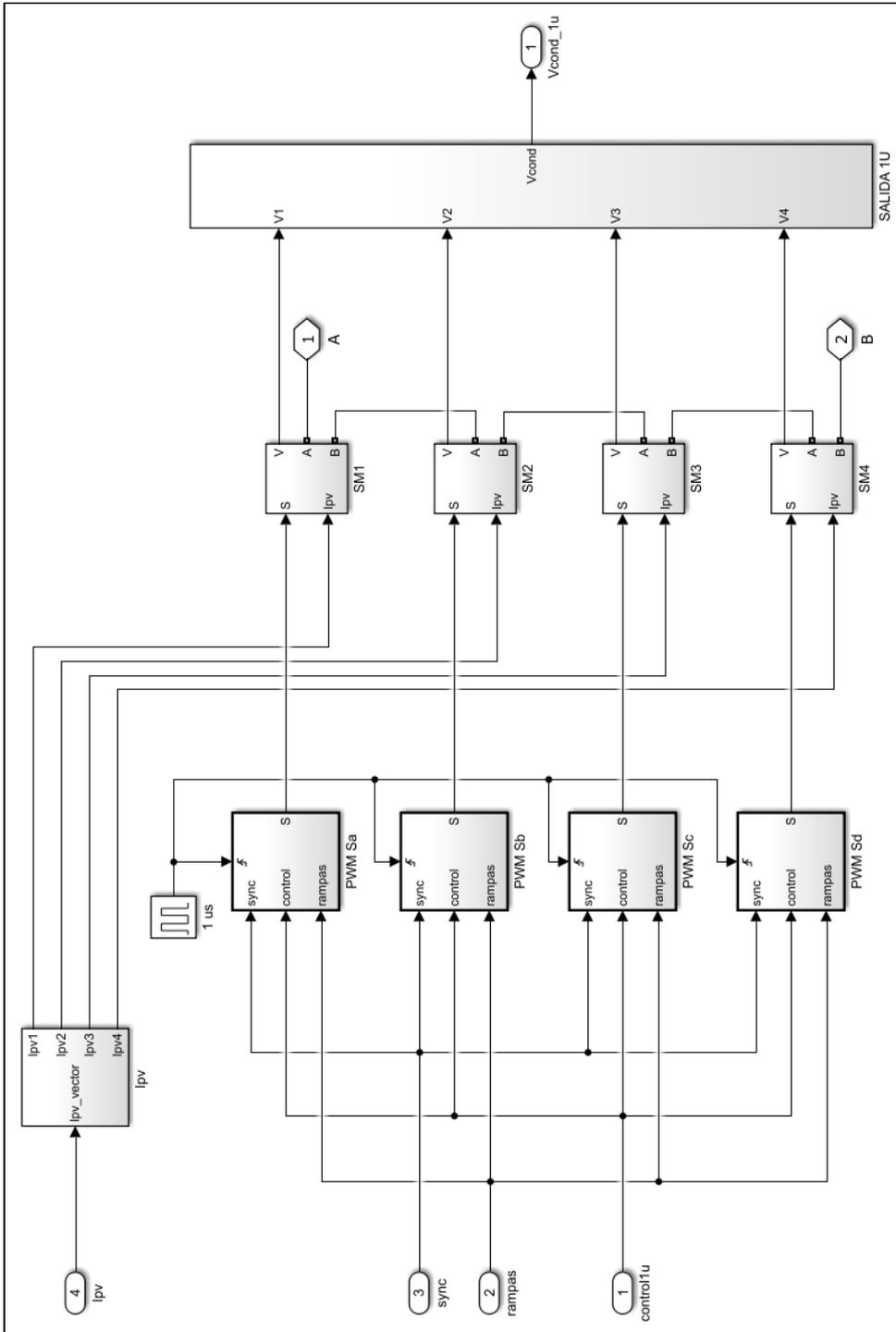


Ilustración 25 - MMC en Matlab/SIMULINK: Interior del bloque Fase 1 Rama U

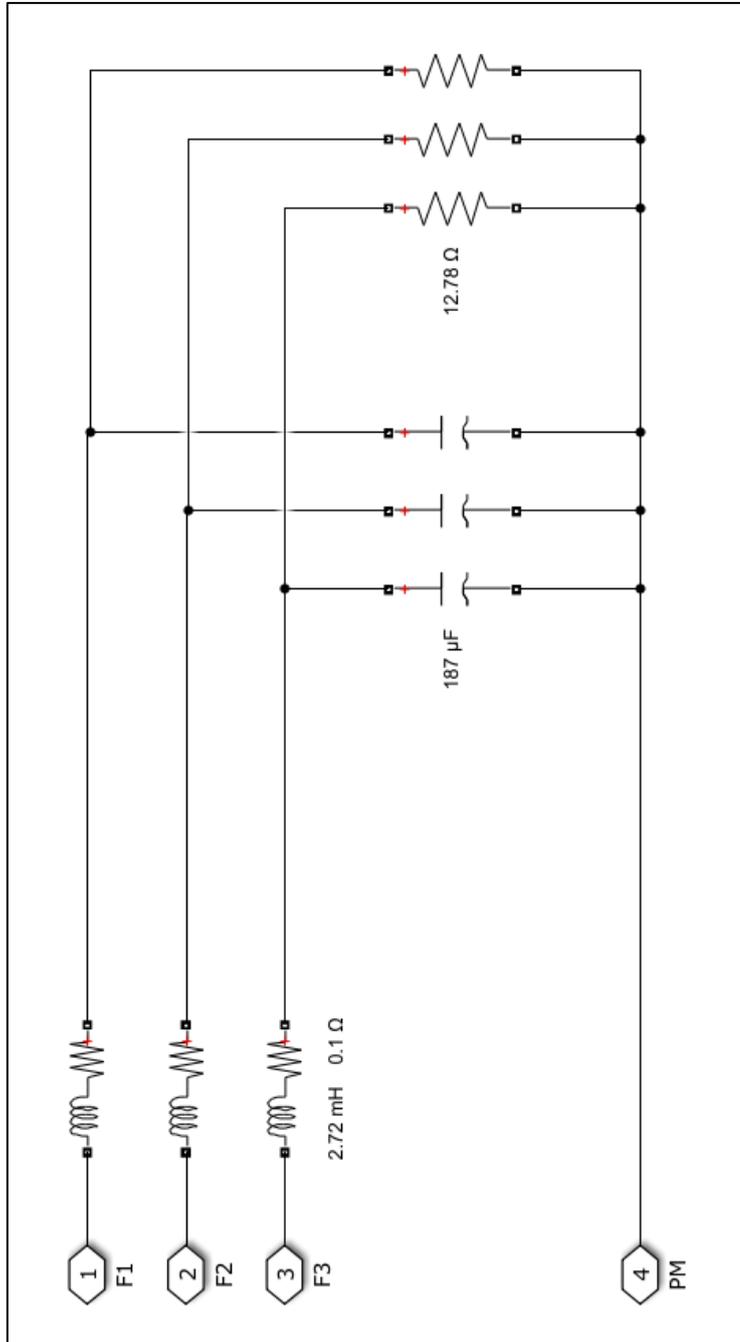


Ilustración 26 - MMC en Matlab/Simulink: Interior del bloque Filtro y carga

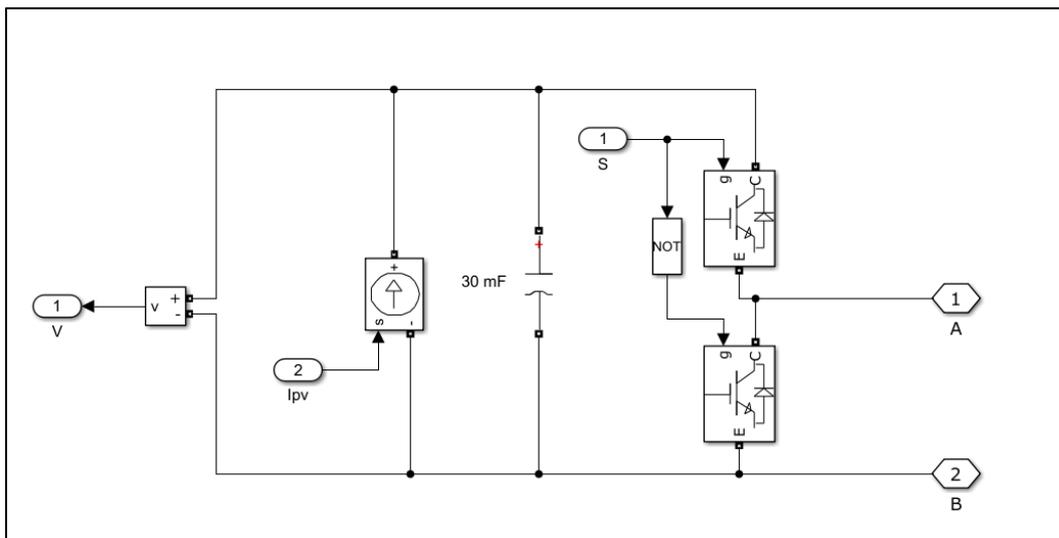


Ilustración 27 - SM (módulo de conmutación) o celda

3.2.2. GENERADOR FOTOVOLTAICO

Para la implementación del generador fotovoltaico se hace uso del modelo previamente desarrollado en el apartado 3.1.2. APROXIMACIÓN CURVA P-V DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO UTILIZADO con la finalidad de crear el código de la Ilustración 28 que calcula la corriente que ha de inyectar el generador fotovoltaico en una determinada celda. Como se puede apreciar se utiliza la ecuación de segundo o sexto orden en función de la tensión de la celda, o lo que es lo mismo, del generador.

Observando el código, se puede ver que se ha utilizado el algoritmo de Horner para la evaluación de las ecuaciones polinómicas. El motivo es la posterior implementación de este código en la simulación en tiempo real. Se detalla en mayor profundidad en el apartado 3.3.2. GENERADOR FOTOVOLTAICO.

Por lo tanto, este cálculo de la corriente es implantado en la fuente de corriente dependiente situada en cada celda [Ilustración 27], estableciendo la relación existente entre la tensión y la corriente del panel fotovoltaico empleado. Para ello, se ha introducido el valor de cada constante de la Tabla 9.

Cabe destacar que en esta simulación se está implementando un bucle puesto que se está calculando la corriente en función de la lectura de las tensiones de los condensadores, la cual experimenta modificaciones en función de la corriente impuesta. Por esto es necesario colocar un bloque de retardo en el esquema general [Ilustración 24].

```
% FUNCIÓN PARA CALCULAR LA CORRIENTE DE LOS  
PANELES FOTOVOLTAICOS:  
  
function Ipv = PanelPV(Vpv)  
    % Constantes ecuación de 2º orden:  
    cte_a = -0.001322673;  
    cte_b = 10.0523151;  
  
    % Constantes ecuación de 6º orden:  
    cte_d = 0.00000000000357988;  
    cte_e = -0.0000000142497;  
    cte_f = 0.0000222097;  
    cte_g = -0.017016857;  
    cte_h = 6.426997334;  
    cte_i = -949.7475378;  
  
    if (Vpv < 700)  
        Ipv = (cte_a * Vpv) + cte_b;  
    else  
        Ipv = (((cte_d * Vpv + cte_e) * Vpv +  
        cte_f) * Vpv + cte_g) * Vpv + cte_h) *  
        Vpv + cte_i;  
    end  
  
end
```

Ilustración 28 - Código para la implementación de la función que calcula la corriente que suministran los paneles fotovoltaicos en Matlab/SIMULINK

Una vez se ha creado la función mencionada, el siguiente paso es hacer uso de ella desde la función del controlador [Ilustración 29]. Se ha generado un vector con todos los valores de las corrientes de las celdas para no saturar el esquema general, convirtiéndose este vector en una de las salidas del controlador como se verá en los siguientes apartados.



```

% Corrientes de los pv de cada rama y fase
Ipv_1up1 = PanelPV(Vcondensador_1u(1));
Ipv_1up2 = PanelPV(Vcondensador_1u(2));
Ipv_1up3 = PanelPV(Vcondensador_1u(3));
Ipv_1up4 = PanelPV(Vcondensador_1u(4));

Ipv_1lw1 = PanelPV(Vcondensador_1l(1));
Ipv_1lw2 = PanelPV(Vcondensador_1l(2));
Ipv_1lw3 = PanelPV(Vcondensador_1l(3));
Ipv_1lw4 = PanelPV(Vcondensador_1l(4));

Ipv_2up1 = PanelPV(Vcondensador_2u(1));
Ipv_2up2 = PanelPV(Vcondensador_2u(2));
Ipv_2up3 = PanelPV(Vcondensador_2u(3));
Ipv_2up4 = PanelPV(Vcondensador_2u(4));

Ipv_2lw1 = PanelPV(Vcondensador_2l(1));
Ipv_2lw2 = PanelPV(Vcondensador_2l(2));
Ipv_2lw3 = PanelPV(Vcondensador_2l(3));
Ipv_2lw4 = PanelPV(Vcondensador_2l(4));

Ipv_3up1 = PanelPV(Vcondensador_3u(1));
Ipv_3up2 = PanelPV(Vcondensador_3u(2));
Ipv_3up3 = PanelPV(Vcondensador_3u(3));
Ipv_3up4 = PanelPV(Vcondensador_3u(4));

Ipv_3lw1 = PanelPV(Vcondensador_3l(1));
Ipv_3lw2 = PanelPV(Vcondensador_3l(2));
Ipv_3lw3 = PanelPV(Vcondensador_3l(3));
Ipv_3lw4 = PanelPV(Vcondensador_3l(4));

Ipv = [ Ipv_1up1  Ipv_1up2  Ipv_1up3  Ipv_1up4
        Ipv_1lw1  Ipv_1lw2  Ipv_1lw3  Ipv_1lw4
        Ipv_2up1  Ipv_2up2  Ipv_2up3  Ipv_2up4
        Ipv_2lw1  Ipv_2lw2  Ipv_2lw3  Ipv_2lw4
        Ipv_3up1  Ipv_3up2  Ipv_3up3  Ipv_3up4
        Ipv_3lw1  Ipv_3lw2  Ipv_3lw3  Ipv_3lw4
];

```

Ilustración 29 - Código para obtener la corriente que suministran los paneles fotovoltaicos en el controlador en Matlab/SIMULINK



3.2.3. OBTENCIÓN DEL CONVERTIDOR

Volviendo sobre el MMC que se ha desarrollado, se procede a explicar las distintas partes de las que consta en los siguientes subapartados.

3.2.3.1. CONTROLADOR

La principal finalidad del controlador es obtener la celda o módulo de conmutación (SM) más conveniente para ser insertado o retirado en función de la necesidad de cargar o descargar su correspondiente condensador. No obstante, también se encarga de realizar el cálculo de la corriente que se debe inyectar en cada celda en función de su tensión [3.2.2 GENERADOR FOTOVOLTAICO].

El controlador está implementado a través de la función embebida que se muestra en la Ilustración 30, cuyos argumentos de entrada son las tensiones de todos los condensadores de cada rama y fase, así como las corrientes de rama de cada fase y la tensión V . Esta constante se coloca para ajustar manualmente la tensión de salida. Y como salidas del bloque, cuenta con las señales de control, de sincronización y de rampas.

Se ejecuta cada 250 microsegundos ya que se quiere conseguir una frecuencia de conmutación de dos kHz, es decir, se pretende realizar un encendido y apagado de los condensadores cada 500 microsegundos con la posibilidad de cambiar de opinión en el punto intermedio.

Dentro de esta función embebida, se ejecuta el código del controlador, que consta de dos partes: Setup y Loop. Ambas se detallan a continuación.

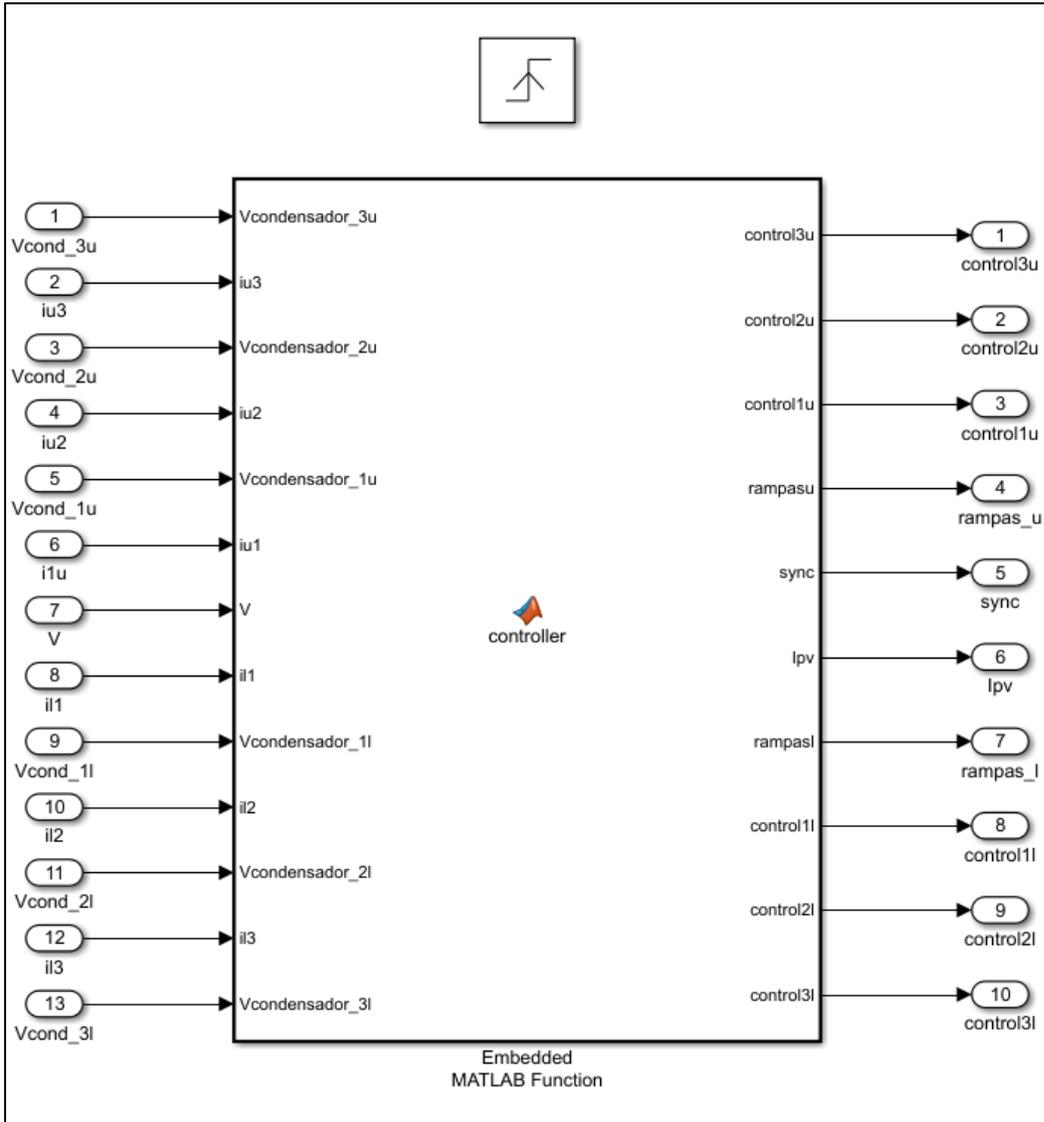


Ilustración 30 - Bloque de la función embebida del controlador

3.2.3.1.1. SETUP

Esta parte del controlador solo se realiza la primera vez que se ejecuta el código. En ella se definen los valores iniciales de las variables que se van a emplear [Ilustración 31].

```
function [control3u, control2u, control1u,
rampasu, sync, Ipv, rampas1,
control1l, control2l, control3l]
= controller ( Vcondensador_3u,
iu3, Vcondensador_2u,
iu2, Vcondensador_1u,
iu1, V,
il1, Vcondensador_1l,
il2, Vcondensador_2l,
il3, Vcondensador_3l )

persistent Ts myTime w
desfase2 desfase3 pSync
tension_base constDiv pS_1l
pS_1u pS_2u pS_2l
pS_3u pS_3l rampas1u
rampas2u rampas3u rampas1l
rampas2l rampas3l

if ( isempty(Ts) )
% El controlador se ejecuta cada 250 us:
Ts = 250e-6;
myTime = 0;
w = 2 * pi * 50; % 50 Hz
desfase2 = 2 * pi / 3; % -120°
desfase3 = 4 * pi / 3; % -240°
pSync = 0;
tension_base = 2 * 807.4;
% para normalizar la moduladora:
constDiv = 1/807.4;
pS_1u = [0 1 0 1];
pS_1l = [0 1 0 1];
pS_2u = [0 1 0 1];
pS_2l = [0 1 0 1];
pS_3u = [0 1 0 1];
pS_3l = [0 1 0 1];
rampas1u = 1;
rampas2u = 1;
rampas3u = 1;
rampas1l = 0;
rampas2l = 0;
rampas3l = 0;
end
```

Ilustración 31 - Setup del código del controlador en Matlab/SIMULINK



3.2.3.1.2. LOOP

A diferencia del Setup, el Loop se ejecuta de forma periódica cada 250 microsegundos como se ha indicado anteriormente. A su vez, dentro de ella se pueden diferenciar distintas partes. Se detallan en profundidad en los siguientes apartados.

A) SEÑAL DE SINCRONIZACIÓN

La señal de sincronización es una variable binaria que cambia de valor cada 250 μ s [Ilustración 32 e Ilustración 33] con la finalidad de sincronizar, como su propio nombre indica, todo el sistema. Esta señal se está generando en el controlador, pero se hace uso de ella principalmente en los generadores de PWM [Ilustración 45] para inicializar las portadoras de forma simultánea.

```
% Generación de la señal de sincronización
if ( pSync ~= 0 )
    pSync = 0;
else
    pSync = 1;
end
sync = pSync;
```

Ilustración 32 - Código de la generación de la señal de sincronización en Matlab/SIMULINK

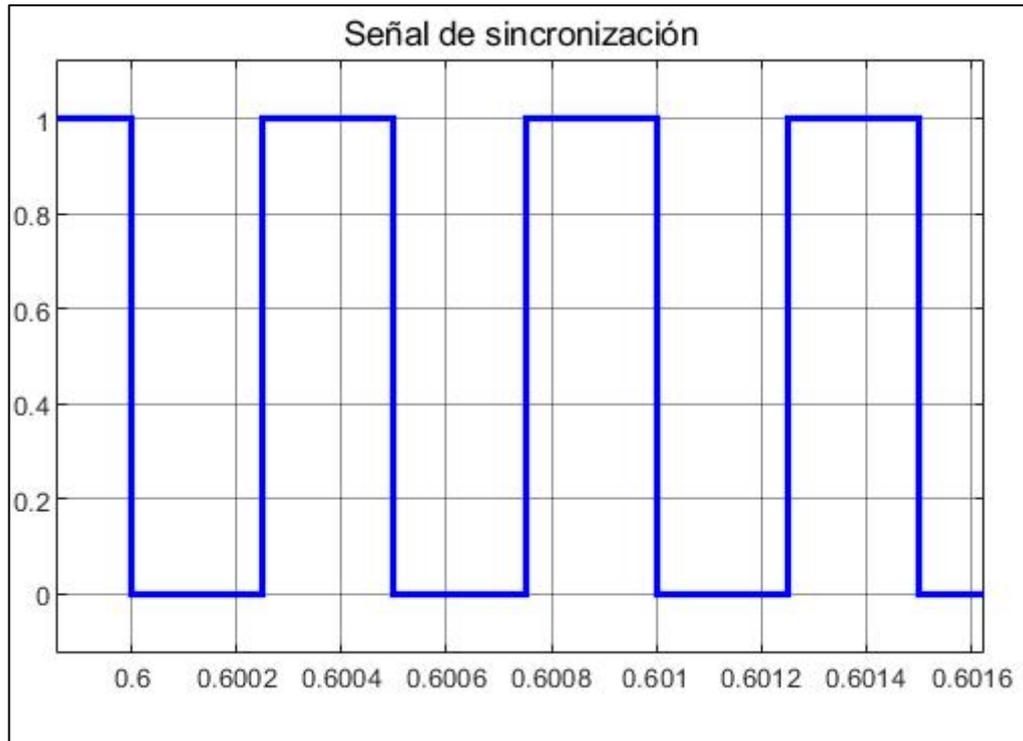


Ilustración 33 - Señal de sincronización en Matlab/Simulink

B) SEÑALES DE MODULACIÓN

Se generan 3 señales moduladoras senoidales desfasadas 120 grados por cada fase, y opuestas en cada rama [Ilustración 34 e Ilustración 35].

Se toma como tensión base la mitad de la tensión de continua que aporta cada fase, y se coloca una entrada al controlador denominada V que contiene el valor de la máxima variación de tensión sobre la tensión base.

Como se ha indicado anteriormente, el objetivo de colocar el valor de esta tensión como entrada al controlador es clarificar que se trata de una forma de ajustar manualmente esta tensión para conseguir la deseada en la salida.

```
% Actualización del tiempo
myTime = myTime + Ts;

% Generación de senoides
sinF1 = sin(w * myTime);
sinF2 = sin(w * myTime - desfase2);
sinF3 = sin(w * myTime - desfase3);

% Generación de la señal moduladora FASE1
moduladoru_F1 = tension_base - V * sinF1;
moduladorl_F1 = tension_base + V * sinF1;

% Generación de la señal moduladora FASE2
moduladoru_F2 = tension_base - V * sinF2;
moduladorl_F2 = tension_base + V * sinF2;

% Generación de la señal moduladora FASE3
moduladoru_F3 = tension_base - V * sinF3;
moduladorl_F3 = tension_base + V * sinF3;
```

Ilustración 34 - Código de las señales moduladoras en Matlab/SIMULINK

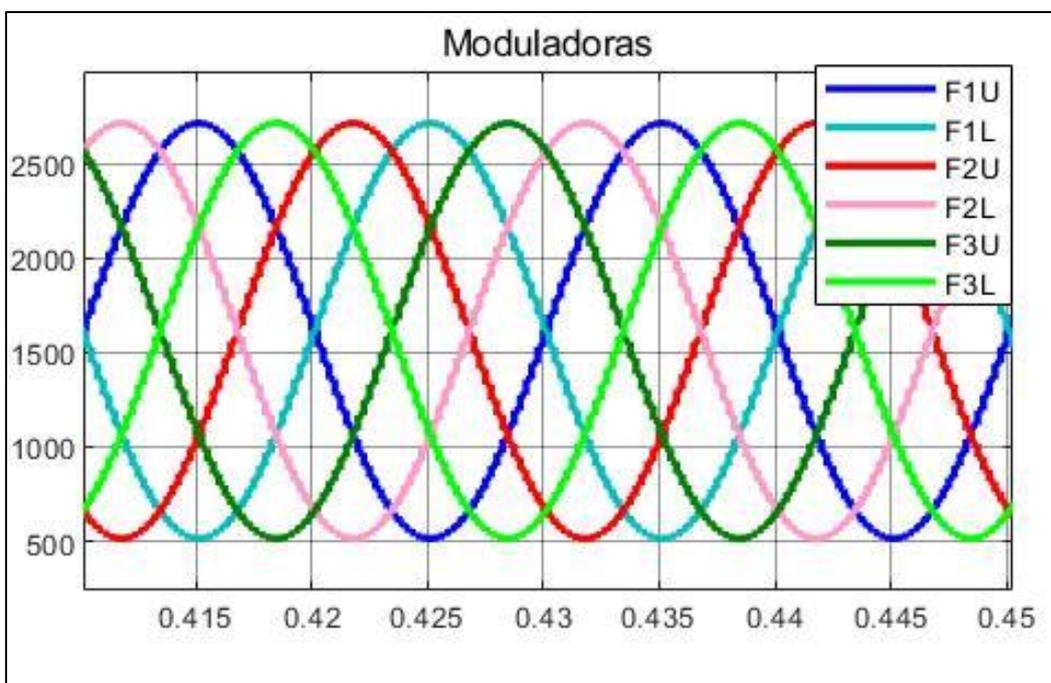


Ilustración 35 - Señales de modulación en Matlab/Simulink

C) SEÑALES DE CONTROL

En este apartado se procede a explicar a lo largo de las siguientes ilustraciones el proceso de control que se ha generado. Únicamente se mostrará el código relativo a la rama superior de la fase uno. El código del control de las demás fases y ramas se adjunta en los Anexos.

En primer lugar, para el desarrollo de la señal de control, se debe calcular el ciclo de trabajo o de servicio que se asignará a una de las cuatro celdas de cada rama, ya que el resto permanecerán a uno (insertadas) o a cero (retiradas) en función del nivel de tensión que se necesite. Este ciclo de trabajo determina el periodo de tiempo que la señal de disparo estará a uno, y por lo tanto la celda permanecerá insertada, o a cero, y la celda quedará retirada, necesario para conseguir seguir el valor de tensión requerido en ese instante [Ilustración 36]. La decisión de la señal de disparo será tomada por el generador de PWM.

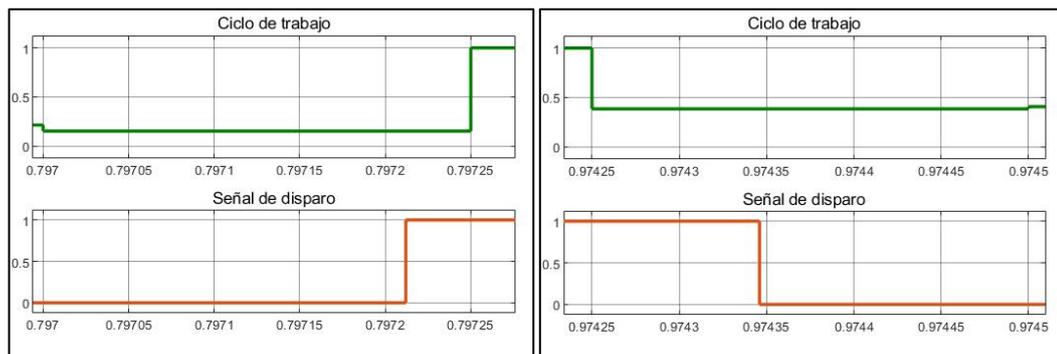


Ilustración 36 - Ciclos de trabajo y señales de disparo en diferentes situaciones. Izquierda: celda retirada al final del ciclo; Derecha: celda insertada al final del ciclo

```
% FASE 1 U:  
  
% Calculo el valor del ciclo de trabajo del PWM 1U:  
norm_1u           = modulatoru_F1 * constDiv;  
nivel_1u          = floor(norm_1u);  
porcentaje_1u     = norm_1u - nivel_1u;  
  
% Estado actual:  
estado_actual_1u = pS_1u (1) + pS_1u (2) + pS_1u (3)  
+ pS_1u (4);
```

Ilustración 37 - Código de la generación de señal de control de la fase 1 y rama superior en Matlab/SIMULINK (parte 1)



Recapitulando, para calcular el ciclo de trabajo se normaliza el valor de la moduladora, que posteriormente, con la función 'floor()' que redondea hacia el infinito negativo, se obtiene la parte entera, es decir, el nivel en el que se encuentra, y que restado al valor normalizado proporciona el ciclo del trabajo [Ilustración 37].

A continuación, se calcula el estado actual de las señales de disparo, puesto que, tras aplicar el ciclo de trabajo y en función de la necesidad, al final del ciclo las celdas estarán insertadas o retiradas. Por lo tanto, es posible conocer el número de condensadores que están activos en el momento actual simplemente sumando el estado de las señales de disparo. Para ello, más adelante se explicará la forma de hallar la señal de disparo al final de cada ejecución, y con el empleo de variables persistentes, se conserva su valor para la próxima ejecución siendo para entonces el estado actual [Ilustración 37].

Con esta información se puede conocer si se necesita activar un nuevo condensador, desactivar o mantener la situación actual simplemente comparando el valor instantáneo y normalizado de la moduladora con el estado actual de los condensadores.

No obstante, como se ha introducido previamente, el ciclo de trabajo solo se asigna a una de las cuatro celdas de cada rama. Por lo tanto, el siguiente paso es seleccionar la celda más adecuada para establecer el ciclo de servicio.

El motivo de establecer un algoritmo o control sobre la elección de la celda más adecuada es evitar la divergencia de las tensiones de los condensadores debido a su carga y descarga. Si no se estableciera ningún algoritmo o control sobre ello, las corrientes que circulan por los condensadores los estarían cargando y descargando de forma aleatoria pudiendo provocar grandes diferencias de tensiones.

Para evitarlo, se busca un sistema de equilibrado de los condensadores. Quizás la mejor decisión o la más sencilla de pensar habría sido la ordenación de las tensiones de todos los condensadores y la posterior elección de los más adecuados para cargar o descargar. Sin embargo, este desarrollo conlleva dos grandes desventajas. Presenta una carga computacional con un orden de magnitud elevado, $O(n^2)$, además de la aparición de conmutaciones innecesarias, puesto que no es imprescindible corregir la tensión de los condensadores ante variaciones despreciables. Por este motivo, se ha procedido a buscar una solución alternativa que requiera una menor carga computacional y evite las conmutaciones innecesarias.

El procedimiento es el siguiente: se busca la celda en función del estado de carga del condensador correspondiente a través del sentido de la corriente que circula por él, la cual indicara carga si la corriente es positiva o descarga en

caso contrario, y en función de la operación que se necesite realizar, es decir, encender o apagar.

En concreto, fijando la atención en la Ilustración 38, se pueden distinguir fácilmente los cuatro posibles escenarios. Cuando la señal de disparo tenga un valor igual a uno, la corriente circulará por la celda superior. Por el contrario, cuando esta valga cero, la corriente circulará por la celda inferior. En cuanto a la corriente, se considera positiva la corriente que circula de la conexión 'A' a la conexión 'B' y negativa en caso contrario. Por lo tanto, los posibles estados del condensador se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10 - Posibles estados de los condensadores

SEÑAL DE DISPARO	CORRIENTE POSITIVA	CORRIENTE NEGATIVA
1	Se carga el condensador	Se descarga el condensador
0	Mantiene su tensión	Mantiene su tensión

Entonces, en función de los estados del condensador se toman las diferentes decisiones. Todas las posibilidades se recogen en la Tabla 11 y cabe destacar que este algoritmo presenta una carga computacional de un orden de magnitud de $O(n)$.

Tabla 11 - Posibles estados para la elección del condensador adecuado

ESTADO	CORRIENTE POSITIVA	CORRIENTE NEGATIVA
ENCENDER	Tensión mínima de los que están en bypass	Tensión máxima de los que están en bypass
APAGAR	Tensión máxima de los que están insertados	Tensión mínima de los que están insertados

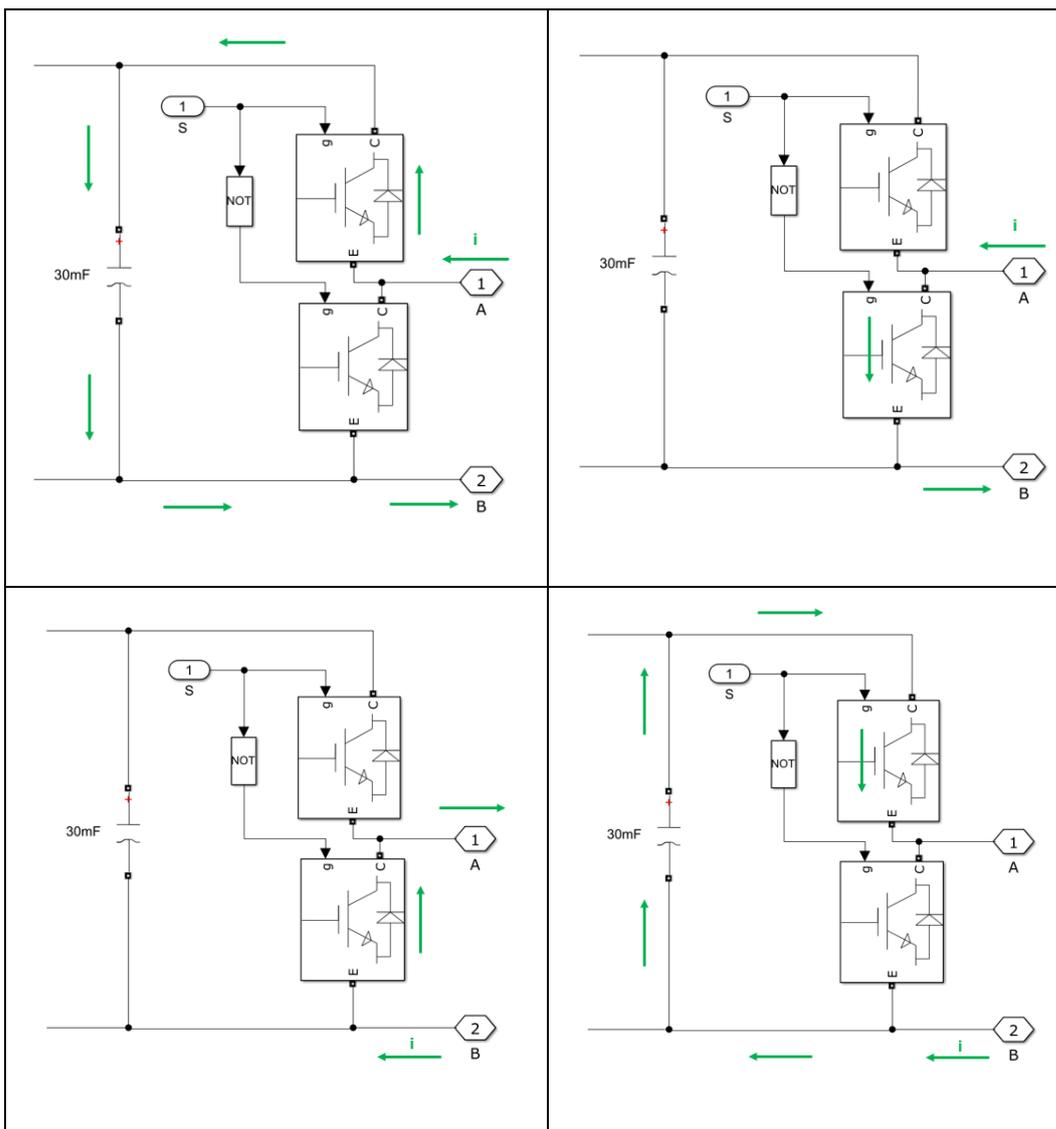


Ilustración 38 - Posibles estados de los módulos de conmutación (insertados o en bypass) y sentidos de la corriente (positiva o negativa)

Adicionalmente, con motivo de clarificar el código, se han implementado por separado las funciones de búsqueda del condensador más o menos cargado en función del estado de las señales de disparo [Ilustración 39] contemplando todas las posibilidades recogidas en la Tabla 11 y explicadas a continuación:

- Función posVmin: calcula la posición de la mínima tensión dentro de los polos que coincidan con 'estado_buscado', es decir, busca el condensador más descargado entre las celdas que se deseen, las que están insertadas o las que se encuentran en bypass.
- Función posVmax: calcula la posición de la máxima tensión dentro de los polos que coincidan con 'estado_buscado', es decir, busca el condensador más cargado de nuevo entre las celdas que se decidan.

```
% FUNCIONES PARA CALCULAR LAS POSICIONES

function pos = posVmin(estado_buscado, pS, Vcond)
    Vmin = +10000;
    pos = 0;
    for i = 1:4
        if (pS(i) == estado_buscado)
            if (Vcond(i) < Vmin)
                Vmin = Vcond(i);
                pos = i;
            end
        end
    end
end % function

function pos = posVmax(estado_buscado, pS, Vcond)
    Vmax = -10000;
    pos = 0;
    for i = 1:4
        if (pS(i) == estado_buscado)
            if (Vcond(i) > Vmax)
                Vmax = Vcond(i);
                pos = i;
            end
        end
    end
end %function
```

Ilustración 39 - Código de las funciones para buscar la posición de las tensiones máximas y mínimas de entre las señales de disparo que están en modo encendido o apagado en Matlab/SIMULINK

A modo aclaratorio, este algoritmo únicamente equilibra los cuatro condensadores que se encuentran en cada una de las seis ramas, es decir, los condensadores de las diferentes ramas y fases no se equilibran por este algoritmo, sino gracias al tipo de portadora elegido (PD).

Cabe resaltar una particularidad del control desarrollado, puesto que se presenta la posibilidad de que la moduladora se encuentre en un cambio en el que haya que realizar dos o más conmutaciones en el mismo ciclo. Ante este problema se ha optado por la solución de implementar un bucle para que repita el procedimiento tantas veces como sean necesarias, ya que esto no altera el orden de magnitud de la carga computacional [Ilustración 40].

Por otra parte, reflexionando sobre el código de la señal de control de la Ilustración 40, se puede apreciar la utilización de dos variables: 'control1u' y 'pS_1u'. El motivo de utilizar estas dos variables es la finalidad de su empleo.



La variable 'control1u' puede contener ceros, unos o el ciclo de servicio, de tal forma que esta será la señal que se enviará a las diferentes celdas; mientras que la variable 'pS_1u' únicamente puede contener ceros y unos, y está creada para predecir el estado de las señales de disparo al final de cada ciclo, por eso se emplea para calcular el estado actual de los polos. Si el valor normalizado de la señal moduladora es mayor que el estado actual, se va a necesitar insertar una celda, por lo que el estado del polo al final del ciclo será activado y por lo tanto se le asigna un 1. En caso contrario, se necesitará retirar y se asignará un 0.

Recapitulando, con este control implementado se consigue que todos los condensadores de cada rama y de cada fase vayan juntos y no diverjan como se puede ver en la Ilustración 41 e Ilustración 42.

También se puede ver en la Ilustración 41 e Ilustración 42 que cada rama no es capaz de mantener un valor constante, por ello, cada rama aportará diferentes tensiones. Esta diferencia se pretende resolver con las impedancias de rama, donde se producirá una variación de tensión que provocará la aparición de la corriente circulante. Se verá más en profundidad en el apartado 3.2.5 CORRIENTE CIRCULANTE.

```
% Elección del que cambia y asignación del
porcentaje
controllu = [pS_1u(1) pS_1u(2) pS_1u(3) pS_1u(4)];
estado_previo = estado_actual_1u;
while (norm_1u > estado_actual_1u)
    if (iu1 > 0)
        pos_1u = posVmin(celdas_bypass, pS_1u,
            Vcondensador_1u);
    else
        pos_1u = posVmax(celdas_bypass, pS_1u,
            Vcondensador_1u);
    end
    if (pos_1u == 0)
        break;
    end
    controllu(pos_1u) = porcentaje_1u;
    pS_1u(pos_1u) = 1;
    rampas1u = 0;
    estado_actual_1u = estado_actual_1u + 1;
    porcentaje_1u = 1;
end
estado_actual_1u = estado_previo;
while (norm_1u < estado_actual_1u)
    if (iu1 > 0)
        pos_1u = posVmax(celdas_insertadas, pS_1u,
            Vcondensador_1u);
    else
        pos_1u = posVmin(celdas_insertadas, pS_1u,
            Vcondensador_1u);
    end
    if (pos_1u == 0)
        break;
    end
    controllu(pos_1u) = porcentaje_1u;
    pS_1u(pos_1u) = 0;
    rampas1u = 1;
    estado_actual_1u = estado_actual_1u - 1;
    porcentaje_1u = 0;
end
```

Ilustración 40 - Código de la generación de señal de control de la fase 1 y rama superior en Matlab/SIMULINK (parte 2)

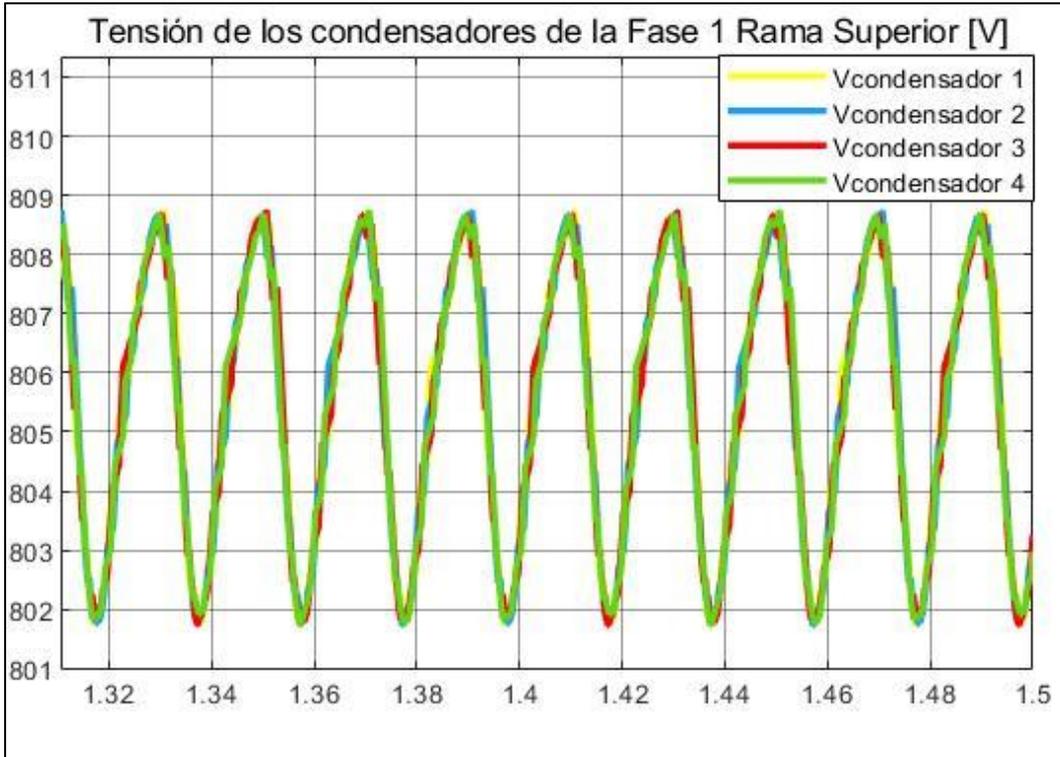


Ilustración 41 - Tensiones de los condensadores de la Fase 1 y Rama Superior en [V]

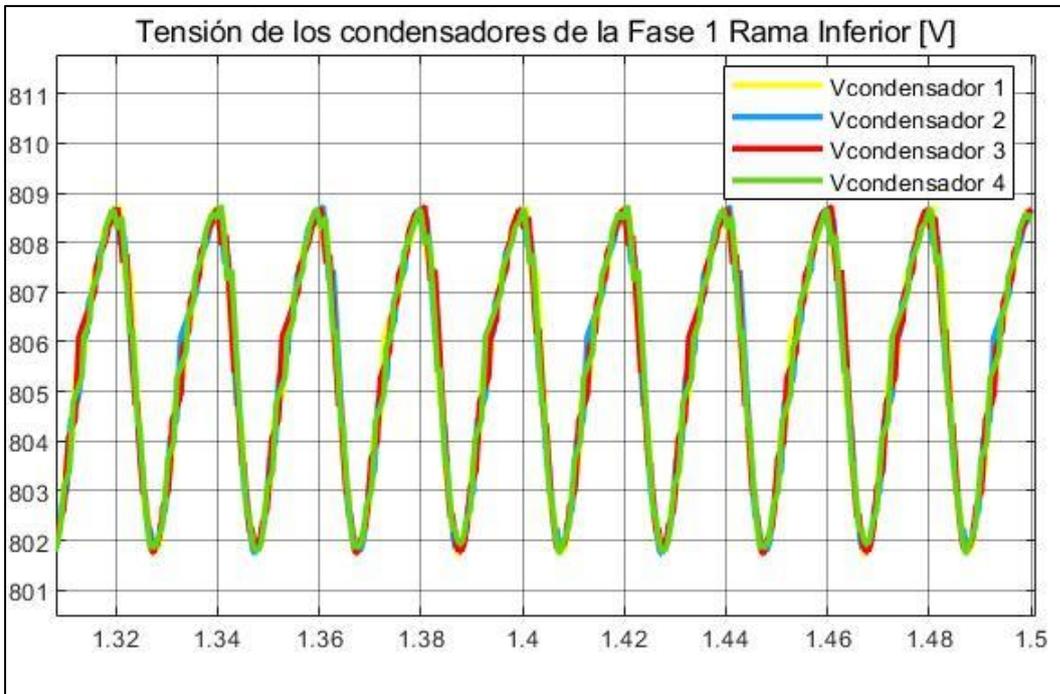


Ilustración 42 - Tensiones de los condensadores de la Fase 1 y Rama Inferior en [V]

D) PORTADORAS

El código correspondiente a la generación de las portadoras está dividido entre la función embebida del controlador y la de los generadores de PWM. El controlador se encarga de determinar mediante la señal de sincronización el instante en el que se debe reinicializar la portadora, además de imponer el tipo de rampa que va a seguir, es decir, envía un uno si la portadora es ascendente o un cero si es descendente. Sin embargo, es el generador de PWM el que implementa la portadora obedeciendo al controlador.

Se ha decidido utilizar portadoras de tipo PD (“Phase Disposition”) con una modificación [Ilustración 43]: se evalúa si es conveniente establecer una portadora ascendente o descendente en cada ciclo en función de la conmutación a realizar, es decir, si se va a producir un encendido, apagado o si se va a mantener su estado. Es por esto que el valor de la rampa cambia en el código que implementa la señal de control [Ilustración 40].

Esta ampliación no se traslada al simulador en tiempo real ya que las portadoras de tipo PD aportan unos resultados de gran calidad y presentan un código más sencillo de implementar.

El principal motivo de elegir las portadoras de tipo PD, aunque en este caso en concreto se haya introducido una pequeña modificación, es, como se ha podido comprobar, el auto equilibrado de energía que proporciona a las 6 ramas, además de la simplicidad de implementación que presenta y la calidad de los resultados obtenidos. Se conoce que esta estructura no es capaz de controlar la corriente circulante, pero lleva de forma natural y no controlada al convertidor a un estado estable. Los motivos exceden del alcance de este TFG.

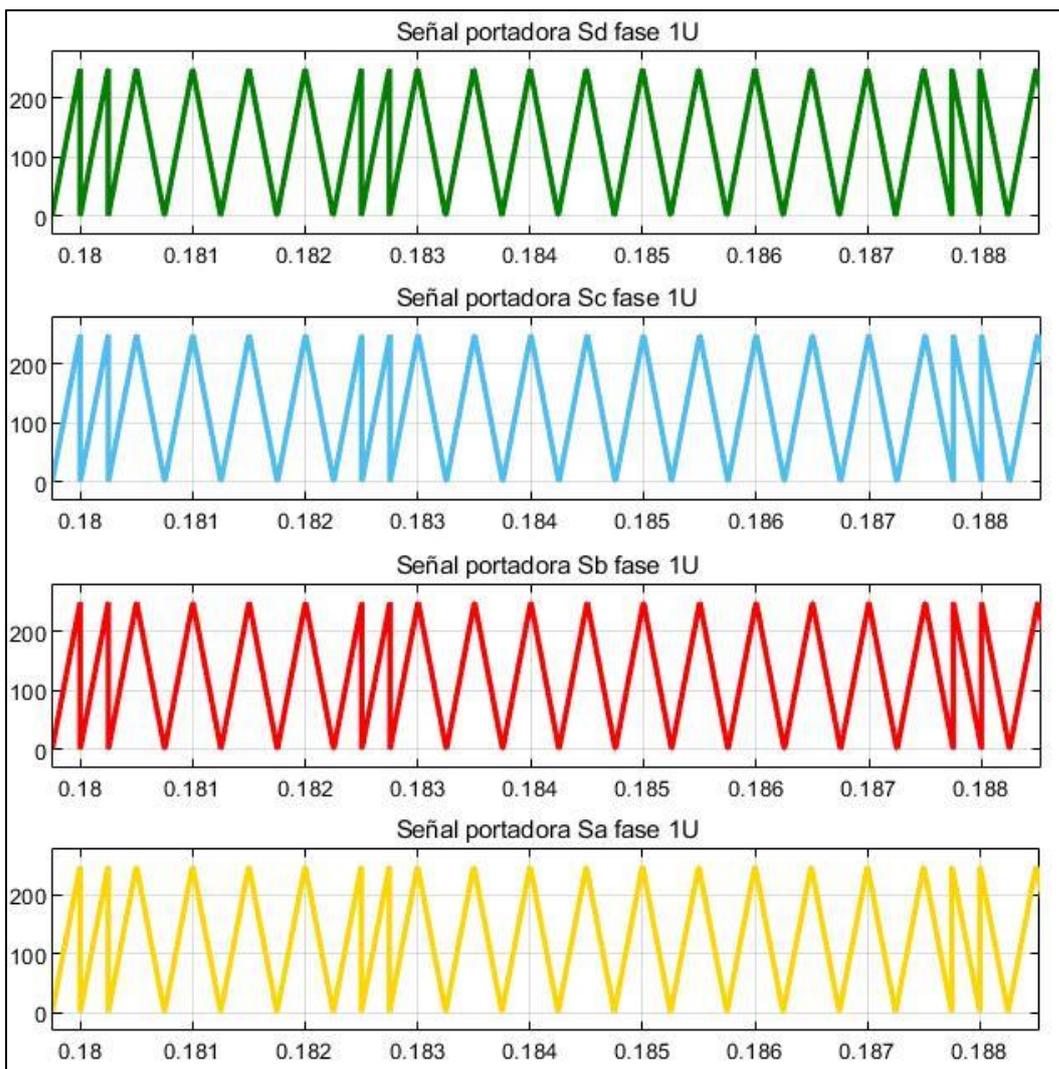


Ilustración 43 - Señales portadoras de la fase 1 y rama superior en Matlab/Simulink

3.2.3.2. GENERADOR DE PWM

El bloque generador de señales PWM se implementa también a través de una función embebida [Ilustración 44] cuyas entradas son las señales de sincronización, de control y de rampas correspondientes a la fase y rama en la que se encuentre. Estas señales de entrada son las salidas del bloque del controlador [Ilustración 30]. Y como salida, la señal de disparo de la celda correspondiente.

Dentro de este bloque se ejecuta su correspondiente código cada un microsegundo y también consta de dos partes.

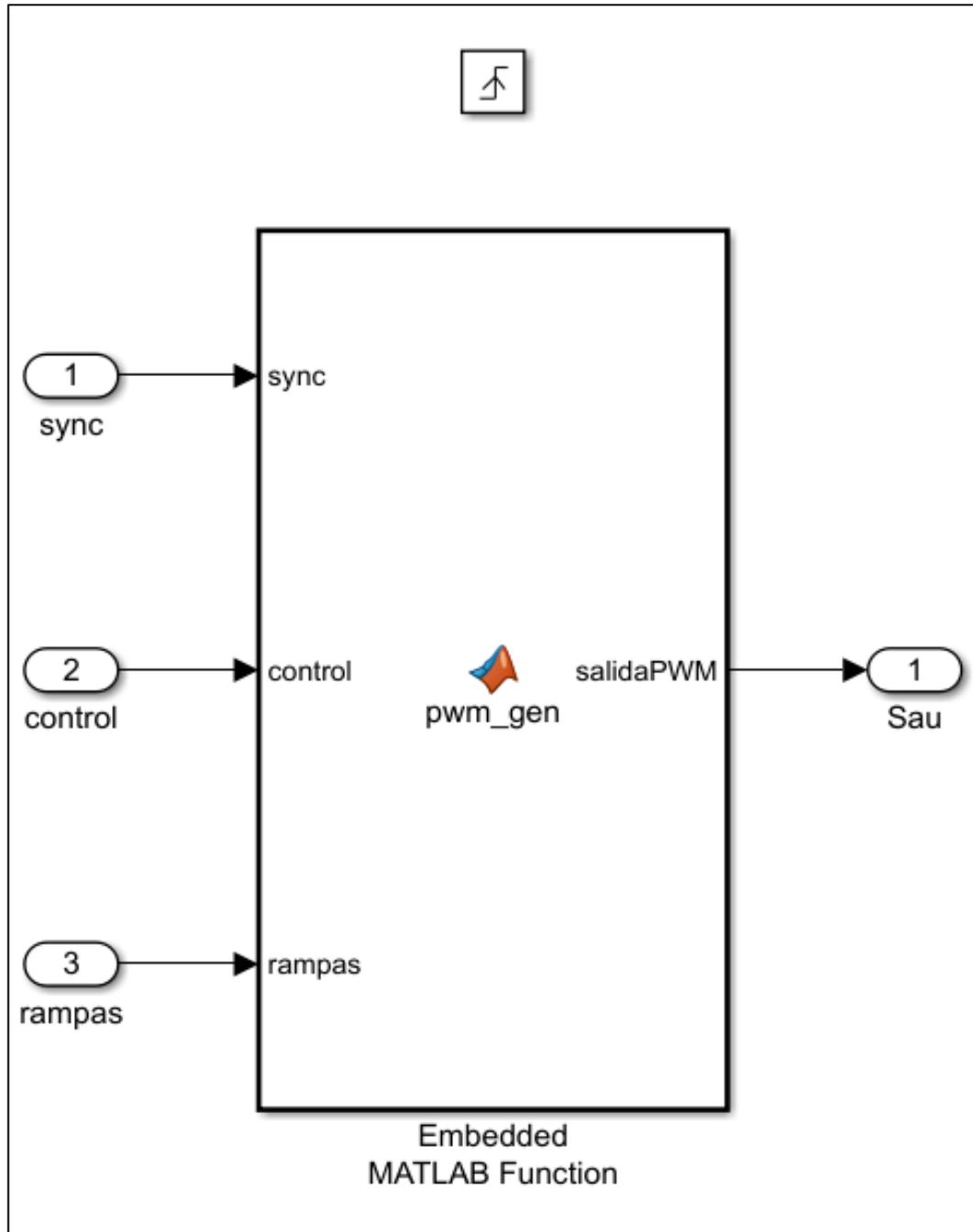


Ilustración 44 - Bloque de la función embebida del generador de PWM

El Setup, que como se ha indicado anteriormente, solo se implementa en el primer ciclo y sirve para dar un valor inicial a las variables que se van a emplear.

En cuanto al Loop, en este caso se ejecuta cada un microsegundo. Su finalidad es recibir los valores del controlador para generar la portadora y determinar la señal de disparo de la celda correspondiente.

Como se ha explicado en apartados anteriores, el controlador decide el instante en el que se debe reinicializar la portadora mediante la señal de sincronización, así como el tipo de rampa que va a tener, ascendente o descendente.

Por lo tanto, el generador de PWM se encarga de generar la portadora a partir de los datos que le llegan del controlador y comparar dicha portadora con la moduladora para definir la salida del PWM, es decir, el estado de la señal de disparo.

```
function salidaPWM = pwm_gen(sync, control, rampas)

persistent oldSync contador paso periodo fase celda;
if ( isempty(oldSync) )
    oldSync = 0;
    contador = -0.5;
    paso = +1;
    periodo = 250;
    fase = 1;
    celda = 1;
end

porcentajePWM = control(celda);
moduladora = porcentajePWM * periodo;
rampaControl = rampas(fase);
contador = contador + paso;

if ( sync ~= oldSync )
    if ( rampaControl == 1 ) %Rampa ascendente
        contador = 0.5;
        paso = 1;
    else %Rampa descendente
        contador = 249.5;
        paso = -1;
    end
end
oldSync = sync;

if ( moduladora > contador )
    salidaPWM = 1;
else
    salidaPWM = 0;
end
```

Ilustración 45 - Código de la función embebida del generador de PWM en Matlab

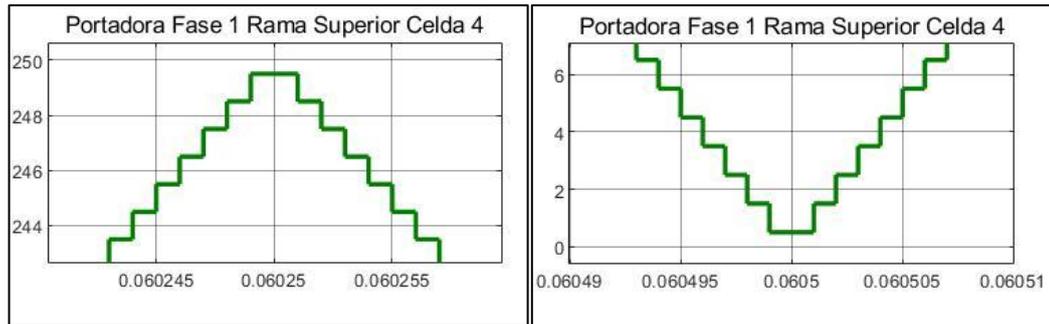


Ilustración 46 - Señal portadora de la fase 1 y rama superior con zoom en Matlab/Simulink

Como se puede observar en la Ilustración 45, se declaran una serie de variables persistentes con el fin de que su valor se mantenga en la siguiente ejecución del código. A continuación, se procede a explicar el sentido de algunas de las variables declaradas.

La variable 'paso' representa el incremento del contador o portadora. Sus valores pueden ser 1 o -1, en función de si se trata de rampa ascendente o descendente, porque cada 250 microsegundos llegan nuevos valores del controlador y dado que se está ejecutando cada un microsegundo, deberá dar 250 pasos.

En cuanto a la variable 'contador', simula la rampa del PWM. Se inicializa en -0.5 o 250.5 en función de la rama con la intención de comenzar en 0.5 y 249.5 tras sumarle el paso tal y como se aprecia en la Ilustración 46. Además, se desea que las rampas ascendentes y descendentes comiencen y terminen en dichos valores para dar el número de pasos de forma simétrica y sin llegar al límite superior ni inferior. De esta forma se evitan los posibles problemas al comparar sus valores límite con los de la moduladora.

También cabe mencionar la creación de las variables 'fase' y 'celda'. Estas se declaran para acceder a las posiciones correspondientes de los vectores que se reciben del controlador. La variable 'fase' sirve para seleccionar la posición del vector 'rampas' y depende como su nombre indica de la fase en la que se encuentre la celda. Por otra parte, la variable 'celda' sirve para acceder a la posición correspondiente del vector 'control' y varía en función de la celda en la que se encuentre dentro de cada rama.

3.2.3.3. COMPONENTES ELÉCTRICOS

A continuación, se procede a realizar una breve justificación de los valores propuestos en la Tabla 12 para los diferentes componentes eléctricos que se han utilizado.

Tabla 12 - Valores de los componentes eléctricos en Matlab/Simulink

COMPONENTE ELÉCTRICO	ABREVIATURA	VALOR
BOBINAS DE RAMA	L_{arm}	1.36 mH
CONDENSADOR (EN LAS CELDAS)	C_{sm}	30 mF
RESISTENCIA (EN LA SALIDA)	R_o	12.78 Ω
CONDENSADOR (EN LA SALIDA)	C_o	187 μ F
BOBINA DE FASE	L_o	2.72 mH
BATERÍAS (EN LA ENTRADA)	V_{dc}	1614.8 V

En primer lugar, debe verificarse la expresión de la Ecuación 15 puesto que los filtros que se han colocado reducen 40 dB por cada década, así, la frecuencia de resonancia debe ser menor del 10% de la frecuencia de conmutación para que resulten útiles dichos filtros. Además, conviene que la frecuencia de resonancia esté alejada de 50 Hz, la frecuencia fundamental, para evitar la posible resonancia. De esta forma, colocando esos filtros, para valores inferiores a la frecuencia de resonancia, se deja pasar el 100% de la señal.

Ecuación 15 - Valores de la frecuencia de resonancia entre los que puede estar comprendida

$$w_n \leq \frac{1}{10} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{sw} \quad y \quad w_n > 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ (Hz)}$$

Entonces, si se calculara el valor de la inductancia equivalente relativa a las impedancias de rama y de salida [Ilustración 60], se obtendría el valor mostrado en la Ecuación 16. En relación a los valores de la bobina de rama y de fase, estos se deducen a partir de realizar diversas pruebas y analizar que aportan resultados razonables a la potencia generada, proporcionando un rizado en la corriente de salida del convertidor del 12.4% aproximadamente [3.3.6 RIZADO DE LA CORRIENTE].

Ecuación 16 - Inductancia equivalente en cada fase

$$L_{eq} = L_o + \frac{1}{2} \cdot L_{arm} = 2.72 + \frac{1}{2} \cdot 1.36 = 3.4 \text{ mH}$$

Así, entre esta bobina equivalente y el condensador de salida habrá una frecuencia de resonancia en un circuito serie [Ecuación 17] que tomará un valor similar al que se describe en la Ecuación 18 .

Ecuación 17 - Frecuencia de resonancia en un circuito serie

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

Ecuación 18 - Frecuencia de resonancia en un circuito serie con la inductancia equivalente y la capacitancia de salida

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} \cdot C_o}} = \frac{1}{\sqrt{3.4 \cdot 10^{-3} \cdot 187 \cdot 10^{-6}}} = 1254.12 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

Ecuación 19 - Paso de rad/s a Hz de la frecuencia de resonancia en un circuito serie

$$F_n = \omega_n \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} = 199.59 \text{ Hz}$$

Por lo tanto, atendiendo a la Ecuación 19, se obtiene un valor para la frecuencia de resonancia de aproximadamente 200 Hz, corroborando las expresiones de la Ecuación 15 ya que, para una frecuencia de conmutación de 2000 Hz, la frecuencia de resonancia debería ser menor o igual a 1256.64 (rad/s), o lo que es lo mismo, 200 Hz.

Por otra parte, como se ha comentado anteriormente, la disposición de los paneles es una serie de 22 módulos fotovoltaicos colocados en cada celda, aportando así una potencia de corriente continua de 168960 W. Esta potencia es la que se va a transformar a potencia de corriente alterna gracias al convertidor desarrollado. A partir de este valor y junto a la Ecuación 20 y Ecuación 21 se puede llegar a la expresión mostrada en la Ecuación 22. Despejando el parámetro de interés, la resistencia en la salida, se obtiene un valor de 12.78 Ω [Ecuación 23].

Ecuación 20 - Potencia en un sistema trifásico

$$P_o = 3 \cdot V_{ef} \cdot I_{ef} = 3 \cdot \frac{V_o}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_o}{\sqrt{2}}$$

Ecuación 21 - Ley de Ohm

$$R_o = \frac{V_o}{I_o}$$

Ecuación 22 - Deducción ecuación de potencia en un sistema trifásico empleando la ley de Ohm

$$P_o = 3 \cdot \frac{V_o^2}{2 \cdot R_o}$$

Ecuación 23 - Cálculo del valor de la resistencia en la salida

$$R_o = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1200^2}{168960} = 12.78 \Omega$$

Por último, para determinar la capacidad de los condensadores de las celdas (C_{sm}) se tienen en cuenta una serie de aproximaciones. La primera es que en promedio solo estarán activos dos condensadores en cada rama [Ilustración 47], y al estar conectados en serie como se veía en la Ilustración 7, se puede calcular la capacitancia equivalente [Ecuación 24].

Ecuación 24 - Capacitancia equivalente en cada rama

$$\frac{1}{C_{eq-rama}} = \sum_i^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_{sm}} + \frac{1}{C_{sm}} \rightarrow C_{eq-rama} = \frac{1}{2} \cdot C_{sm}$$

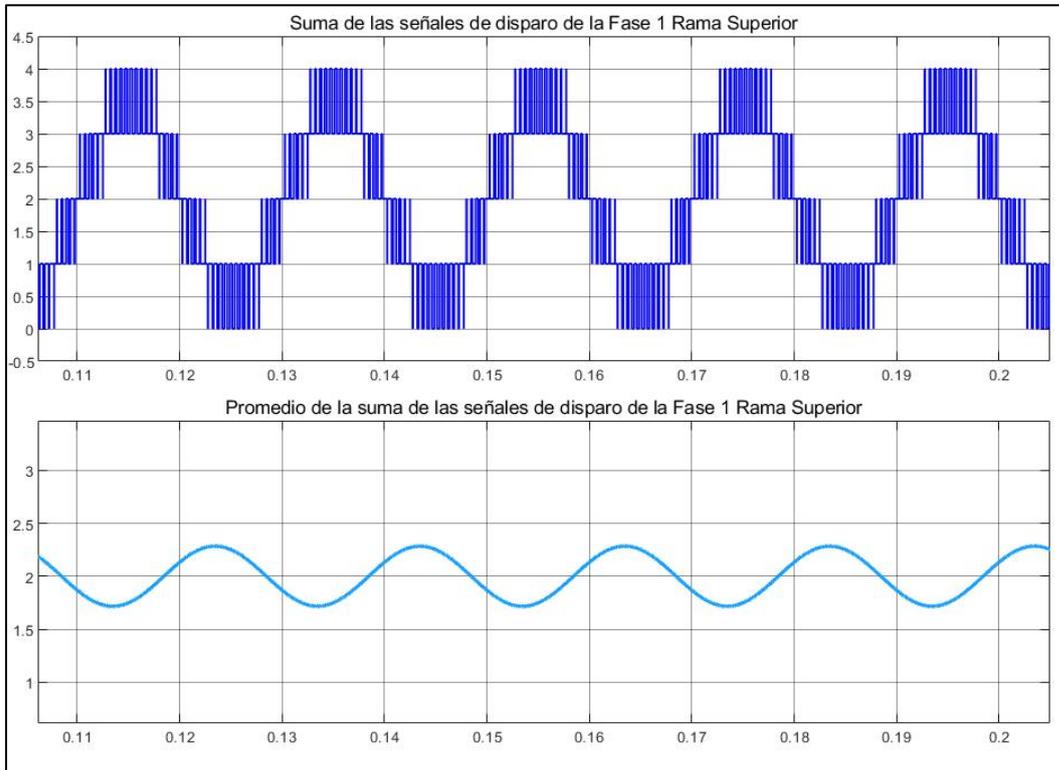


Ilustración 47 - Suma de las señales de disparo de la fase 1 y rama superior y el promedio de esta

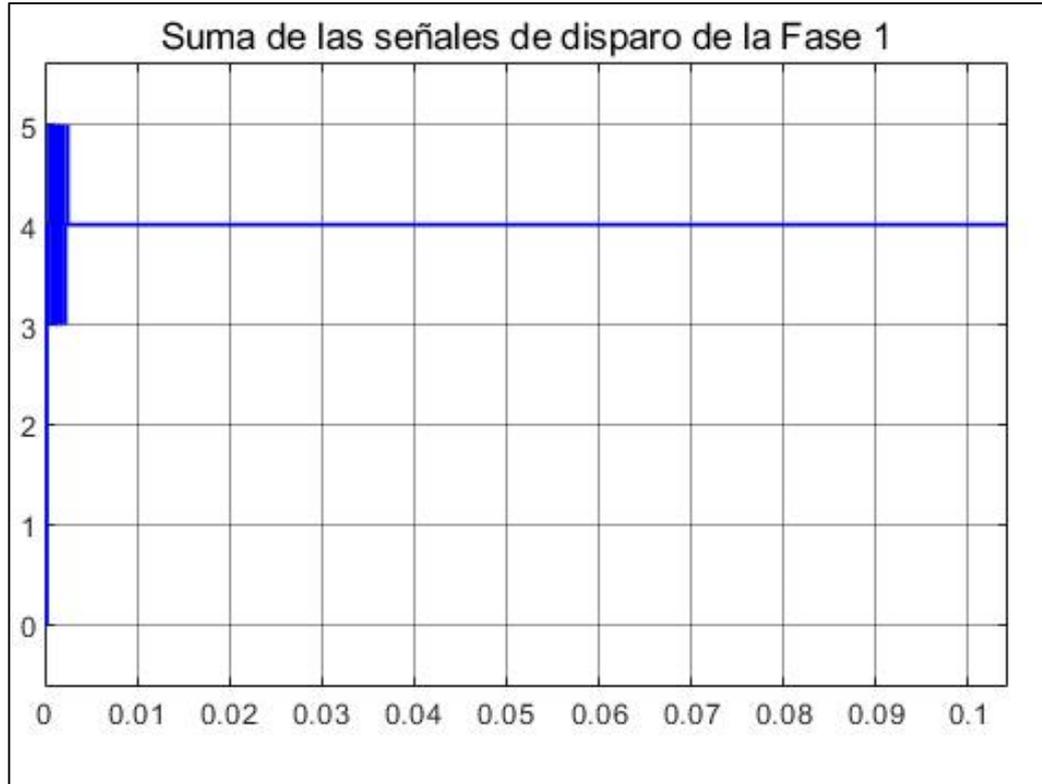


Ilustración 48 - Suma de las señales de disparo de la fase 1 de las dos ramas

Ocurre lo mismo en cada rama, por lo tanto, en cada fase se tiene un promedio de 4 condensadores activos [Ilustración 48], que equivaldría a un condensador de capacitancia C_{sm} [Ecuación 25].

Ecuación 25 - Capacidad equivalente en cada fase

$$C_{eq-fase} = 2 \text{ ramas} \cdot C_{eq-rama} = 2 \text{ ramas} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot C_{sm} \right) = C_{sm}$$

Buscando un valor, de nuevo mediante el procedimiento de prueba y error, se obtiene que para una capacitancia de 30 mF las señales de salida no presentan excesivo ruido y reutilizando la Ecuación 17 se obtiene una frecuencia de resonancia de 15.76 Hz en la Ecuación 26, valor alejado de la frecuencia fundamental de 50 Hz.

Ecuación 26 - Frecuencia de resonancia en un circuito serie con la inductancia equivalente y la capacitancia de celda

$$\begin{aligned} \omega_n &= \frac{1}{\sqrt{L_{eq} \cdot C_{eq-fase}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{\sqrt{3.4 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^{-3}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 15.76 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Esto indica que, si las aproximaciones son correctas, sería esperable encontrar oscilaciones a esa frecuencia en alguna de las señales de salida, lo cual no resultaría un problema ya que está suficientemente alejado de la frecuencia fundamental.

3.2.4. RESULTADOS

Con el modelo de convertidor que se acaba de exponer en esta memoria se consiguen una serie de resultados acordes con los valores deseados y calculados.

A la salida del convertidor, como tensiones de cada rama respecto del punto medio de continua se obtienen la Ilustración 49 y la Ilustración 50, en las cuales se puede apreciar el resultado de aplicar la modulación a las señales moduladoras dada la forma que presentan. Por lo tanto, la tensión de salida del MMC generada se muestra en la Ilustración 51.

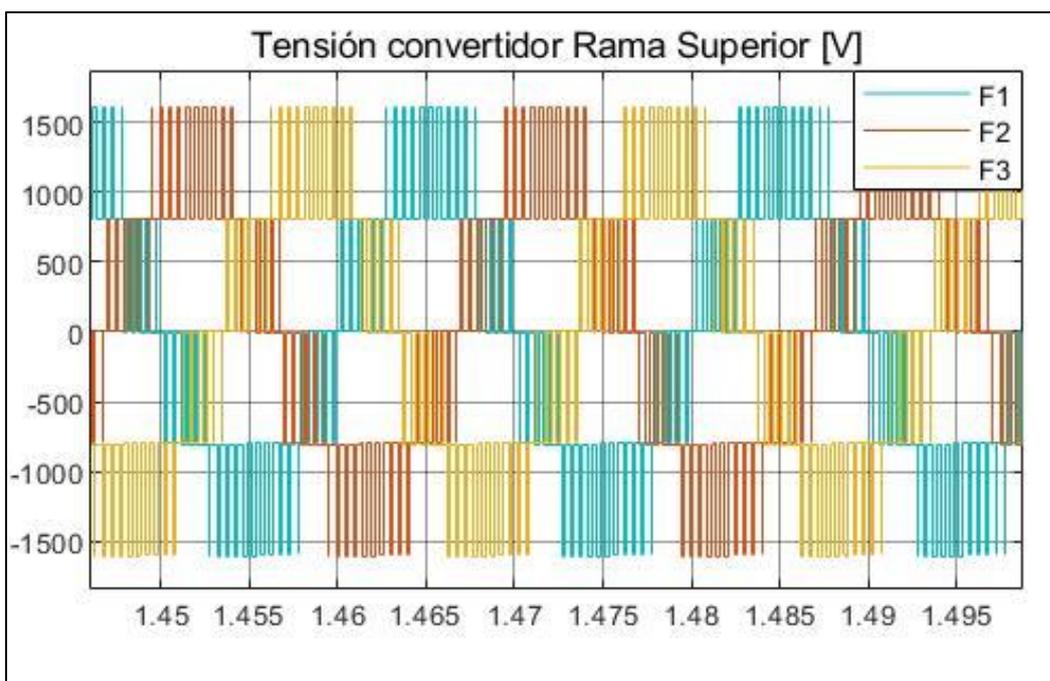


Ilustración 49 - Tensión del convertidor en la Rama Superior de las tres fases en Matlab/Simulink

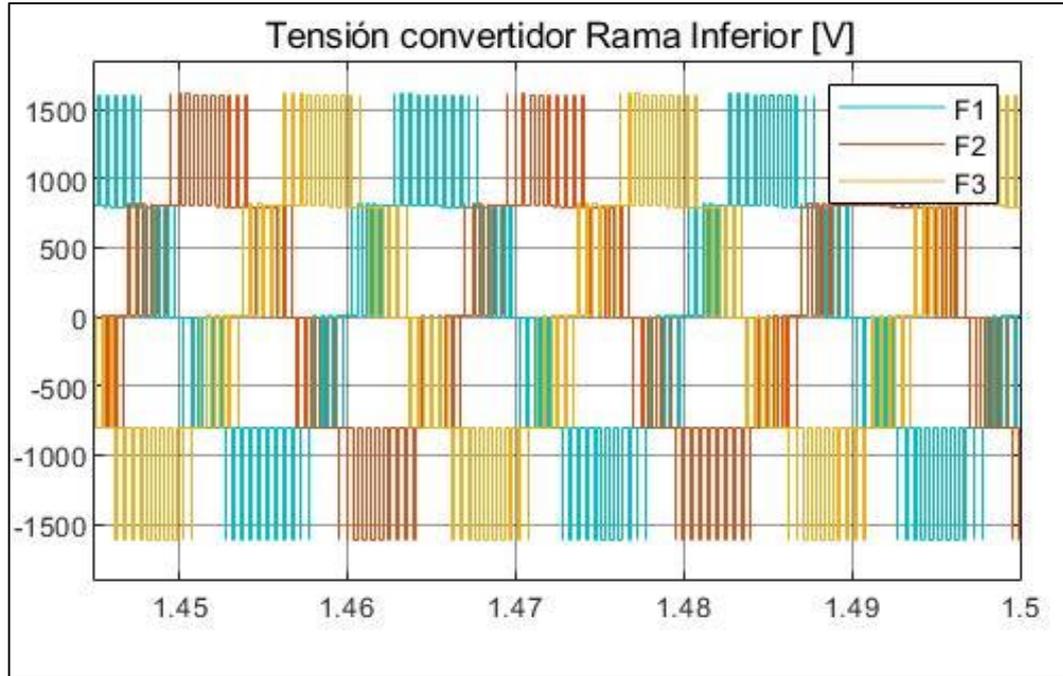


Ilustración 50 - Tensión del convertidor en la Rama Inferior de las tres fases en Matlab/Simulink

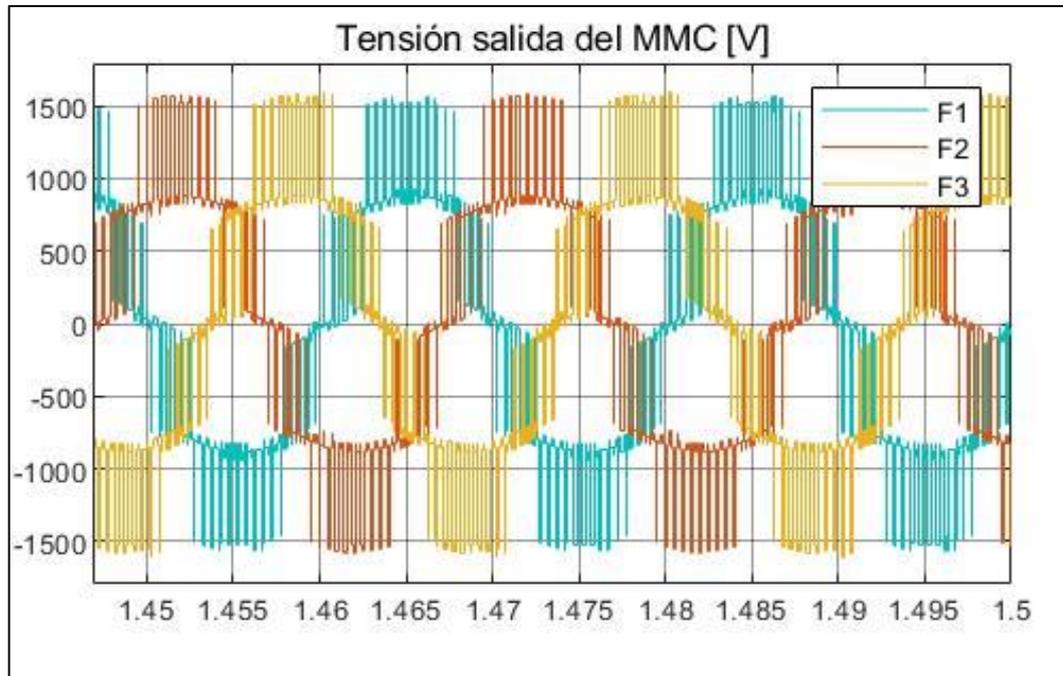


Ilustración 51 - Tensión a la salida del convertidor de las tres fases en Matlab/Simulink

A continuación, tras superar los filtros LC colocados, la tensión adquiere la forma de la Ilustración 52, siendo esta la tensión que finalmente se aporta a la carga resistiva.

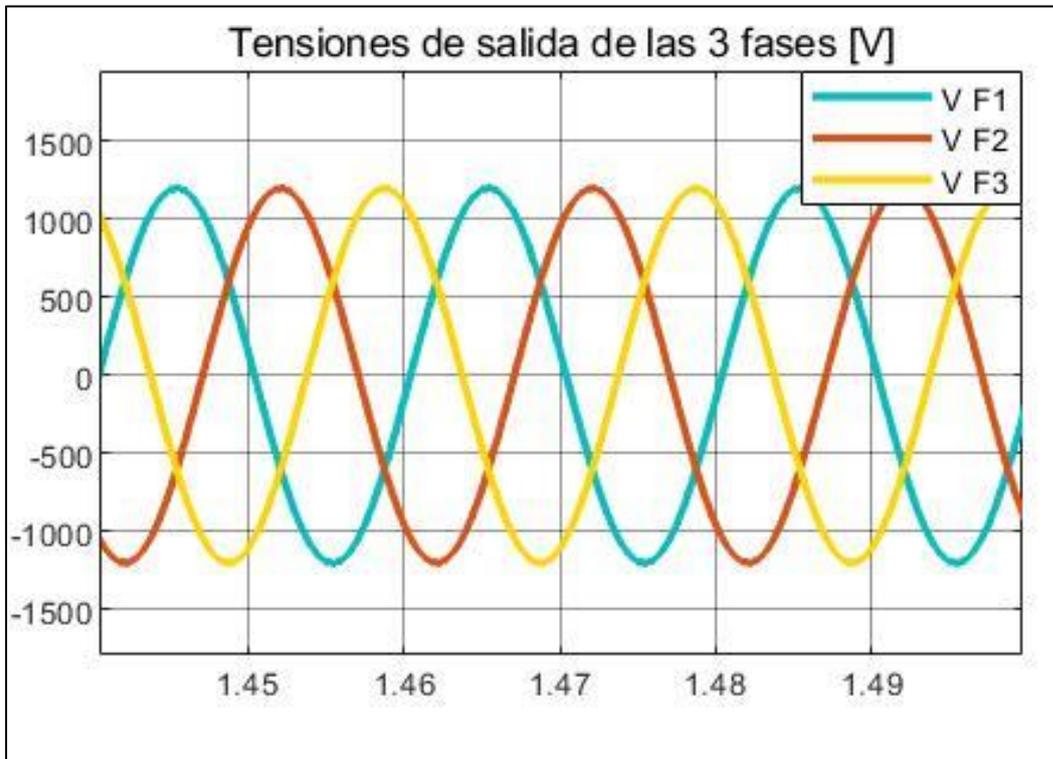


Ilustración 52 - Tensiones de salida de cada fase en Matlab/Simulink

Se ha representado en la Ilustración 53 las tensiones a la salida del convertidor y a la salida del conjunto, es decir, en la carga, de la fase 1 con la finalidad de apreciar el resultado de la modulación. La forma de onda en la carga sigue el valor medio de la tensión generada en el convertidor, consiguiendo una senoide muy similar a la de la señal moduladora.

En cuanto a las corrientes, en la Ilustración 54 e Ilustración 55 se muestran las corrientes que circulan por las ramas superior e inferior respectivamente. Se puede apreciar que estas corrientes son opuestas. Esto es debido a la orientación del amperímetro en el entorno de simulación.

Se obtiene una corriente a la salida del convertidor de la forma de la Ilustración 56 que, tras pasar el filtro, resulta la señal de la Ilustración 58, adquiriendo todo el rizado la corriente que circula por el condensador [Ilustración 57].

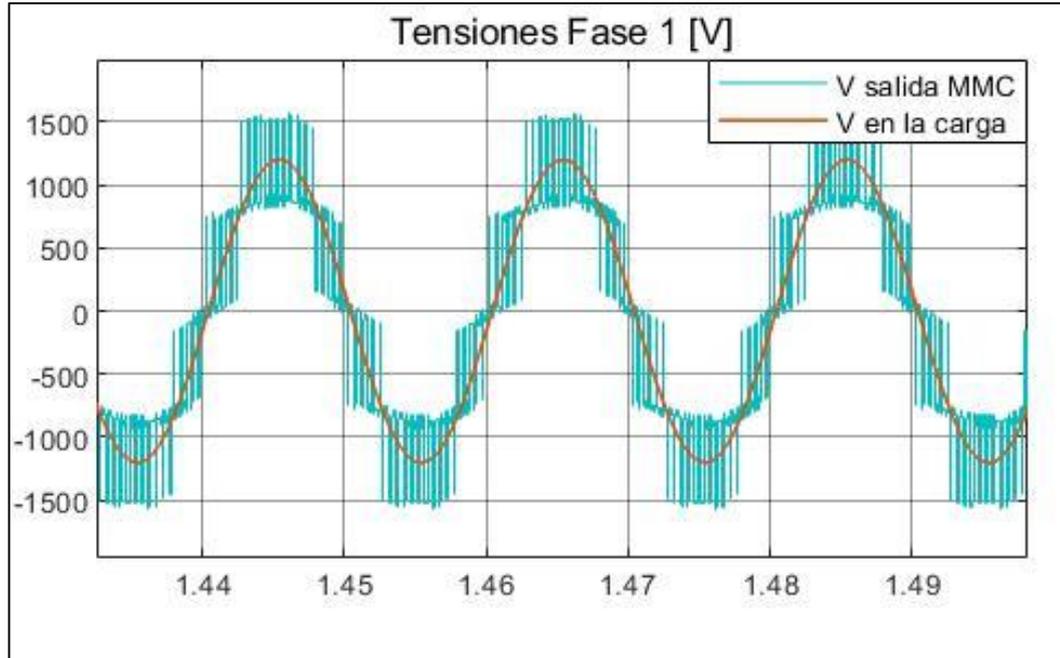


Ilustración 53 - Comparación de la tensión a la salida del MMC y la tensión en la carga para la Fase 1 en Matlab/Simulink

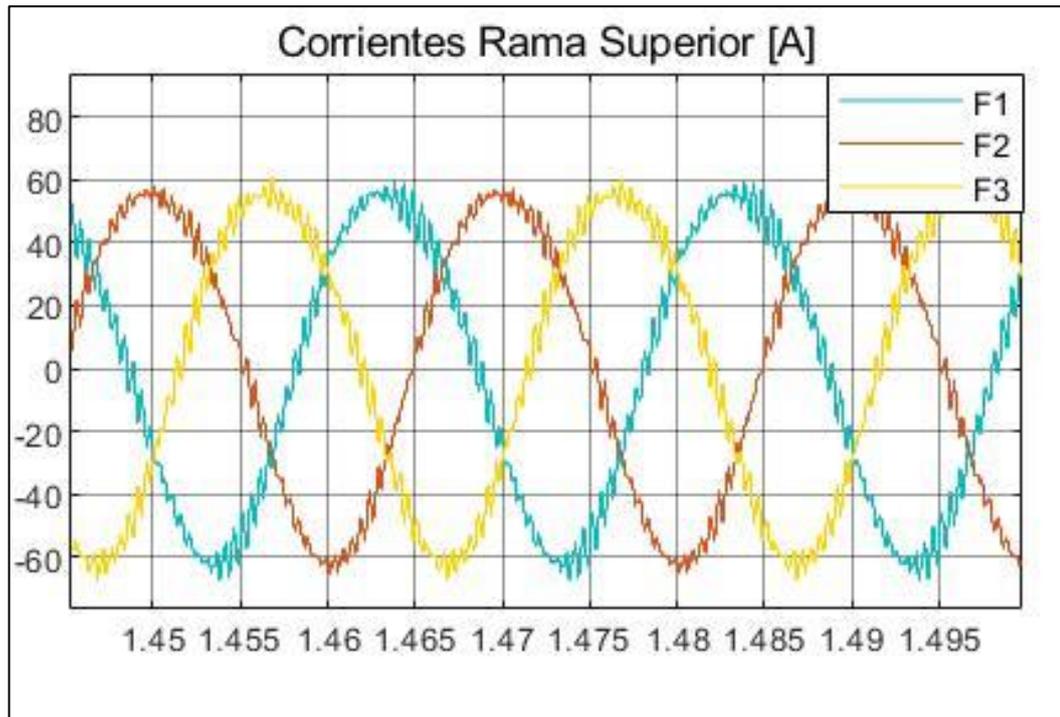


Ilustración 54 - Corrientes que circulan por las Ramas Superiores de las tres fases en Matlab/Simulink

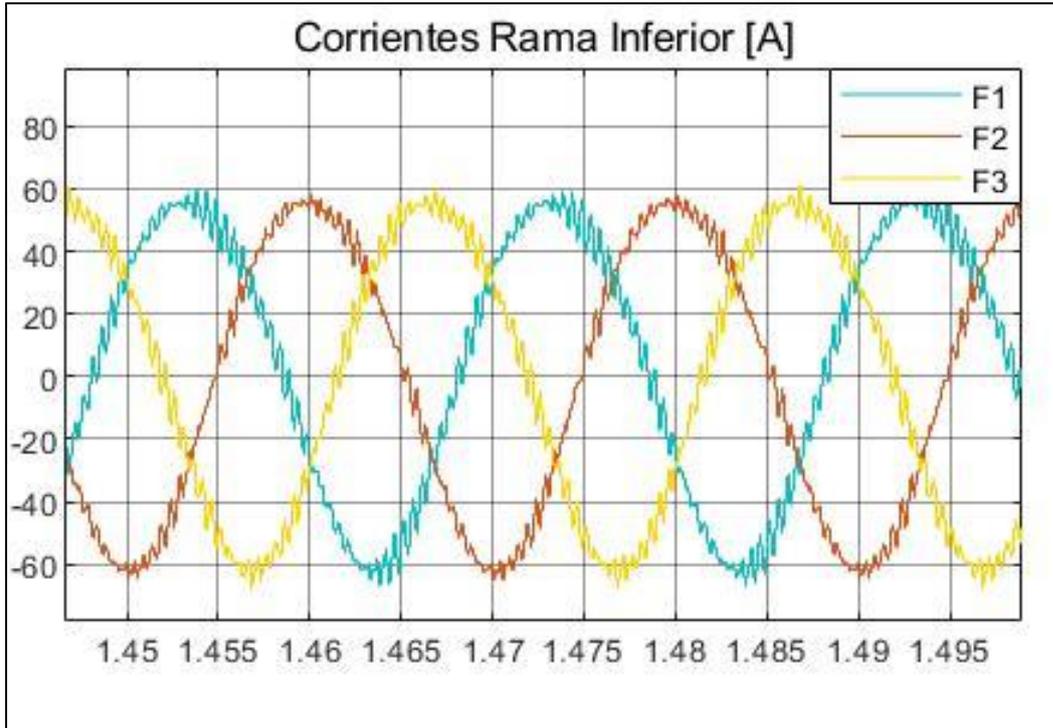


Ilustración 55 - Corrientes que circulan por las Ramas Inferiores de las tres fases en Matlab/Simulink

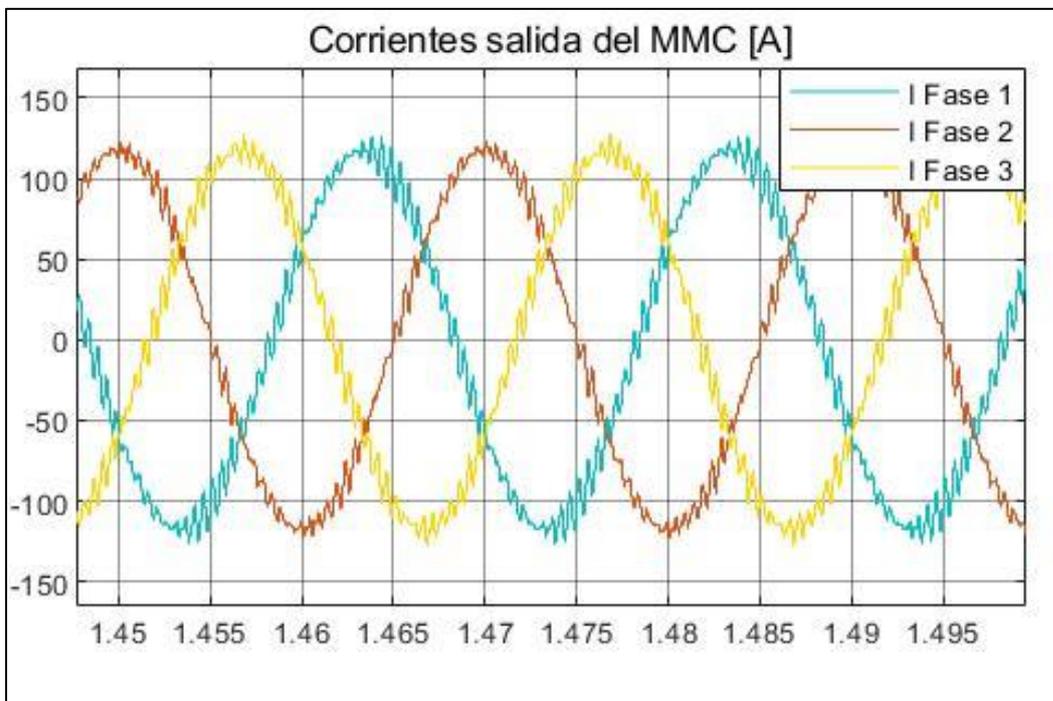


Ilustración 56 - Corrientes que circulan a la salida del convertidor de las tres fases en Matlab/Simulink

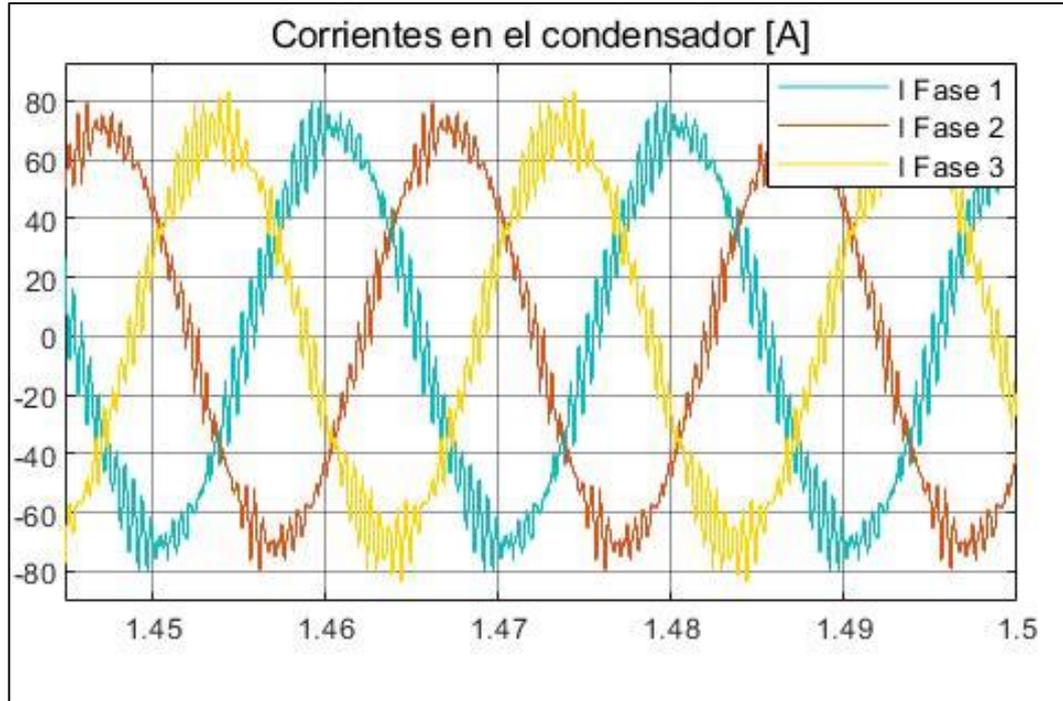


Ilustración 57 - Corrientes que circulan por los condensadores de salida de las tres fases en Matlab/Simulink

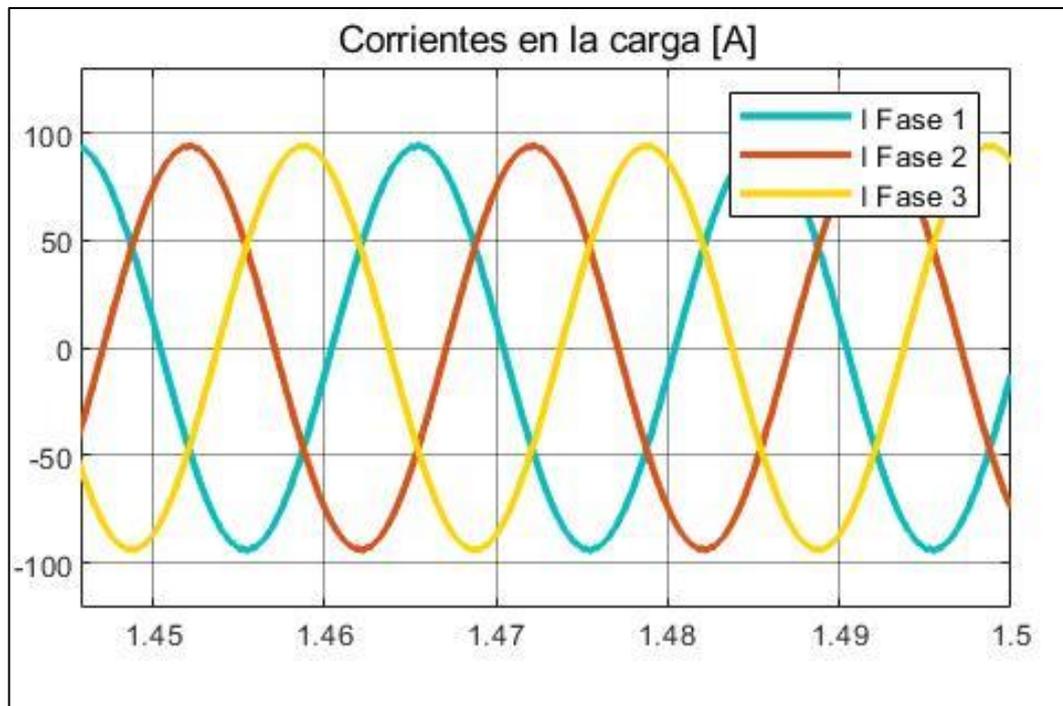


Ilustración 58 - Corrientes de salida de cada fase en Matlab/Simulink

Finalmente, se puede apreciar en la Ilustración 59 que, en promedio, se obtiene una potencia aproximada de 169 kW, valor muy cercano a los 168960 W que se buscaban. Al igual que la tensión de salida alcanza valores prácticamente iguales a ± 1200 V como se ve en la Ilustración 52. Así mismo, en esta misma gráfica se aprecia la estabilidad del sistema y la limpieza de la forma de onda.

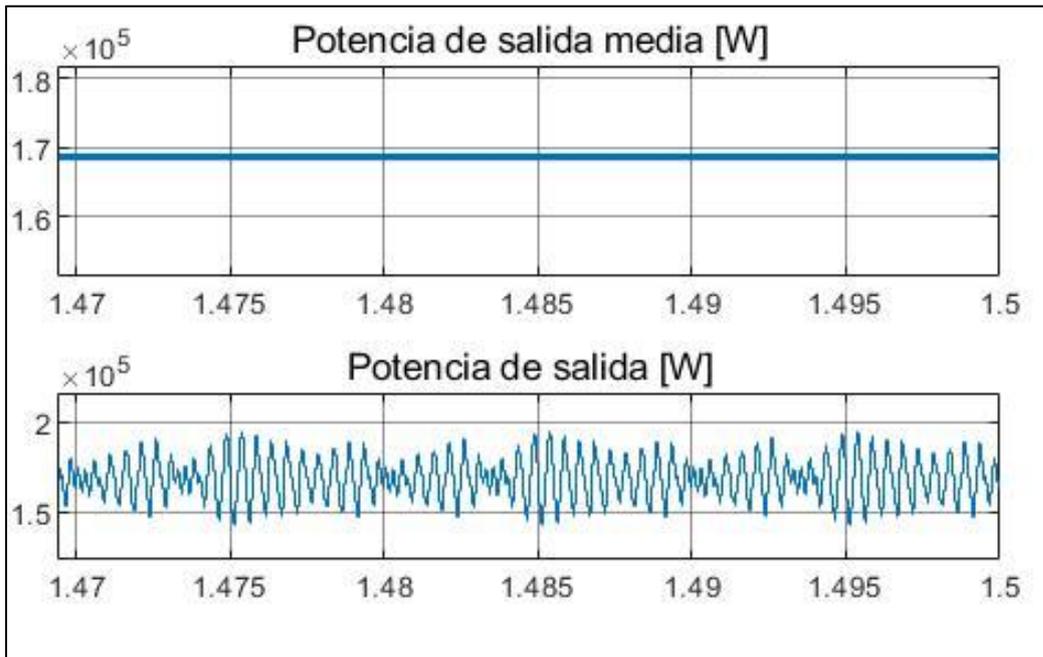


Ilustración 59 - Potencia media de salida total y real en Matlab/Simulink

3.2.5. CORRIENTE CIRCULANTE

Las corrientes que intervienen en una fase quedan reflejadas en la Ilustración 60. Se puede percibir la existencia de una corriente circulante. Esta se define como la suma de la corriente de cada rama en una fase entre dos [Ecuación 27], y es la responsable de transferir la energía entre fases o entre ramas.

Ecuación 27 - Corriente circulante

$$i_z = \frac{i_{up} + i_{lw}}{2}$$

Como se ha introducido en apartados anteriores, la diferencia de tensión de los condensadores provoca una variación de tensión en las bobinas de rama en

las distintas fases, ocasionando a su vez un gradiente de corriente circulante [Ecuación 28].

Ecuación 28 - Gradiente de corriente circulante

$$\Delta V_{arm} = L_{arm} \cdot \frac{di_z}{dt}$$

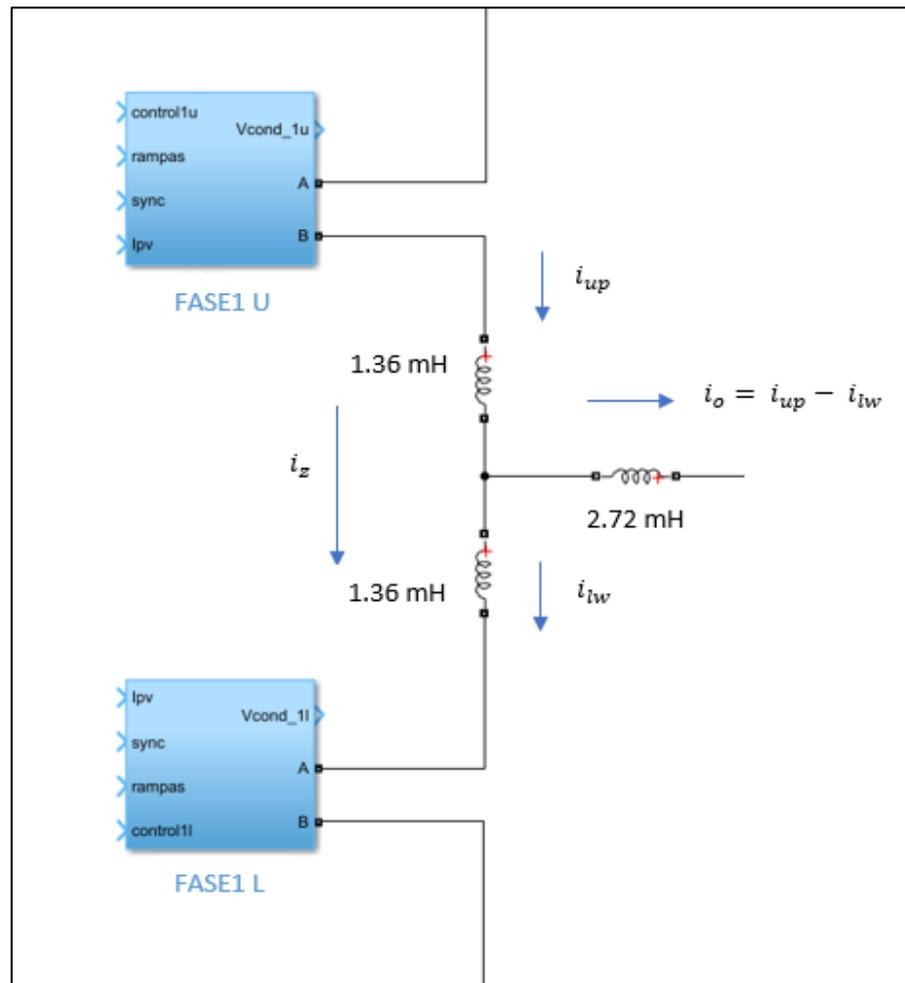


Ilustración 60 - Corrientes en una fase

Esta corriente circulante consta de 3 partes:

- Transferencia de potencia de fase a fase por la componente continua que presenta
- Transferencia de potencia de rama a rama por la parte alterna de 50 Hz
- Pérdidas provocadas por los semiconductores

No se procede a profundizar más en este tema ya que se sale fuera del alcance de este TFG, pero sí se ha tenido en cuenta ya que se conoce que la reducción

de su magnitud ayuda a reducir las pérdidas. Además, supone una reducción en los posibles problemas de estabilidad debidos a las caídas de tensión en los condensadores.

A continuación, se muestra esa transferencia de energía que se está mencionando. Como aclaración, la potencia demandada por la carga es de 168960 W, aportando cada fase una potencia de 56320 W, y la tensión que aporta el generador fotovoltaico es de 3220 V por fase.

Además, se procede a representar diferentes tensiones. Se denomina 'potencia por I_z' a la potencia que se genera como consecuencia de las corrientes circulantes, y se calcula como la multiplicación de dicha corriente por la tensión de continua o lo que es lo mismo, la tensión de cada fase; 'potencia aportada por fase' a la que potencia que propaga cada fase calculada como la multiplicación entre la corriente de salida de la fase y la tensión de la fase; 'potencia de las baterías de continua' a la que generan las baterías y se calcula como el producto de la corriente que circula a través de ellas y la tensión de continua.

- Se inyectan 0 A en todas las celdas.

En este escenario, al no inyectar corriente en las celdas, la potencia que recibe cada fase es la potencia que recibe de las baterías del lado de continua, es decir, del exterior al MMC y, por lo tanto, se aprecia una componente continua de corriente circulante de 17.44 A en cada una de las fases calculada en la Ecuación 29. Esta corriente se puede observar en la Ilustración 61, Ilustración 63 e Ilustración 65.

Ecuación 29 - Cálculo de corriente circulante al inyectar 0A en todas las celdas

$$\frac{168960 \frac{W}{fase}}{3230 \frac{V}{fase}} = 52.31 A \rightarrow \frac{53.47 A}{3 fases} = 17.44 Ac$$

Analizando la Ilustración 62, Ilustración 64 e Ilustración 66, se puede ver que efectivamente se está generando por fase la potencia requerida. No obstante, gran parte de esa potencia se está produciendo por la corriente circulante, ya que ante 3230 V y 17.44 A de corriente circulante, se consigue la potencia que se muestra en las figuras.

En cuanto a la corriente y la potencia de continua, si se observa la Ilustración 67, se puede ver que las baterías de continua generan una corriente de alrededor a 50 A y una potencia de 170 kW, valores que se corresponden con

las sumas de las corrientes y potencias cuyo origen pertenece a las corrientes circulantes.

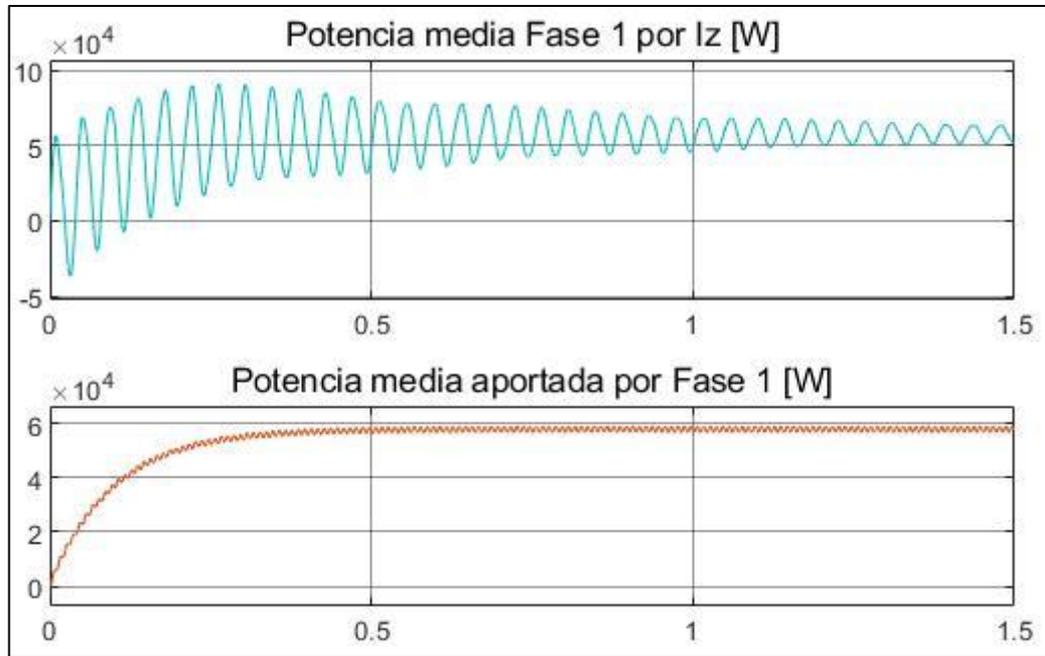


Ilustración 61 - Corriente circulante de la Fase 1 al inyectar 0 A en todas las celdas

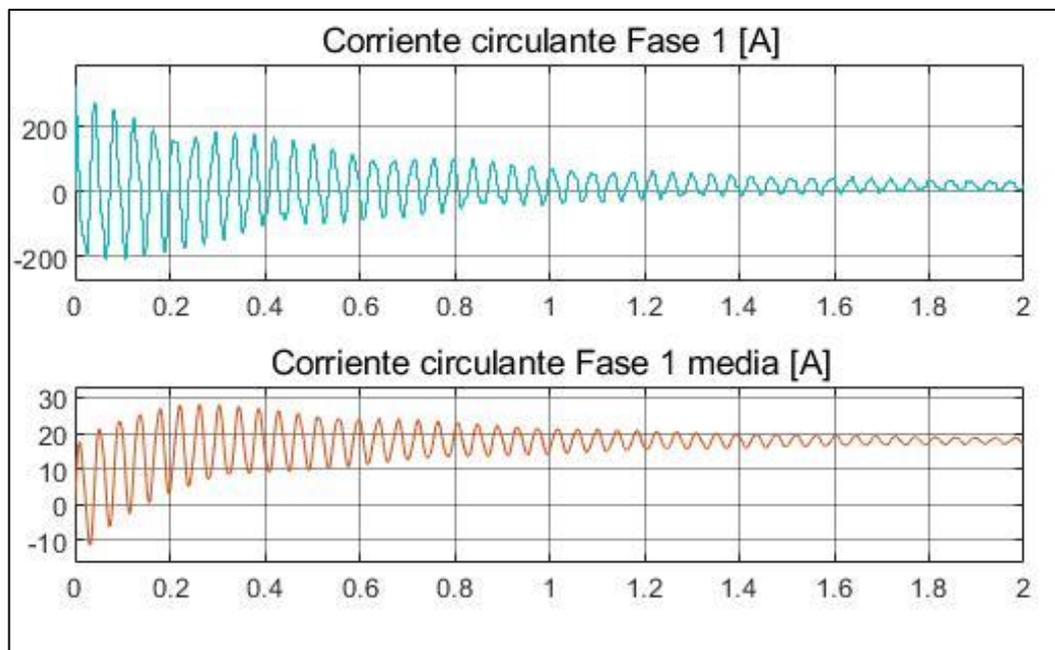


Ilustración 62 - Potencias medias de la Fase 1 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 0 A aproximadamente en todas las celdas

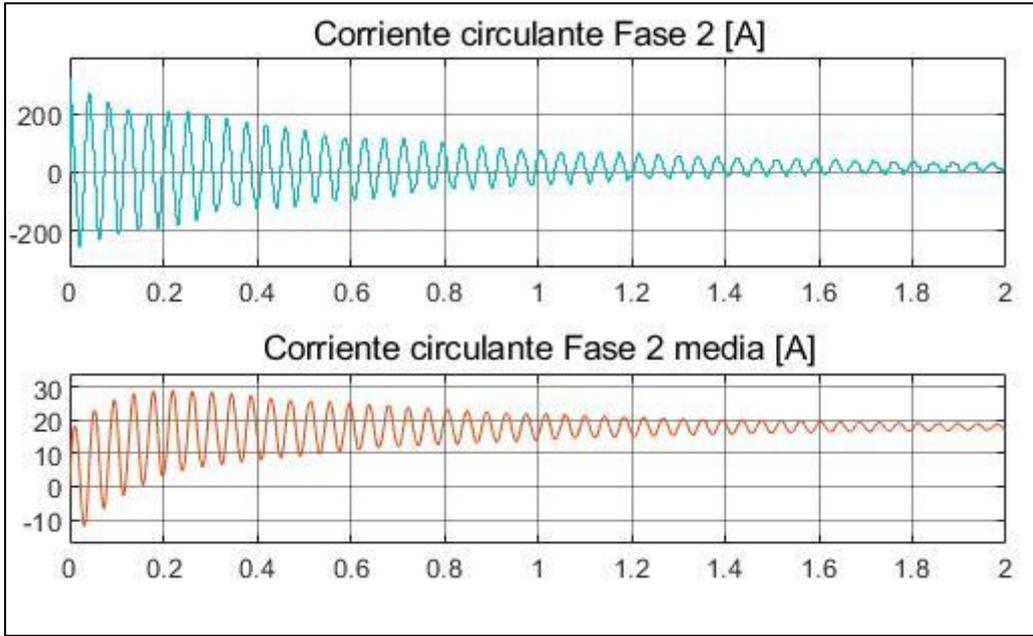


Ilustración 63 - Corriente circulante de la Fase 2 al inyectar 0 A en todas las celdas

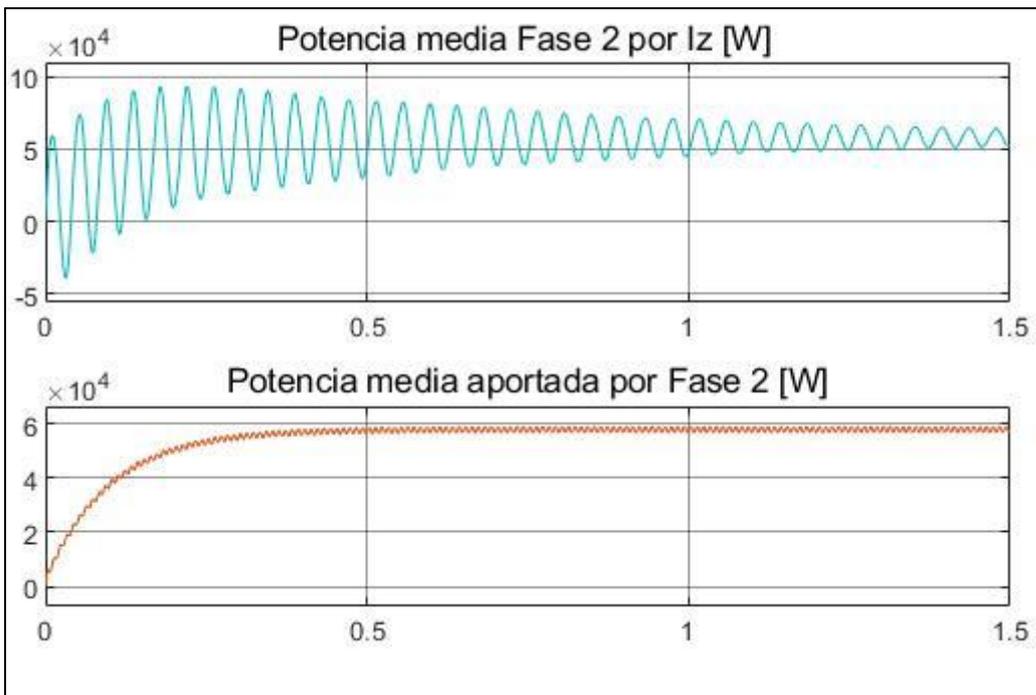


Ilustración 64 - Potencias medias de la Fase 2 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 0 A aproximadamente en todas las celdas

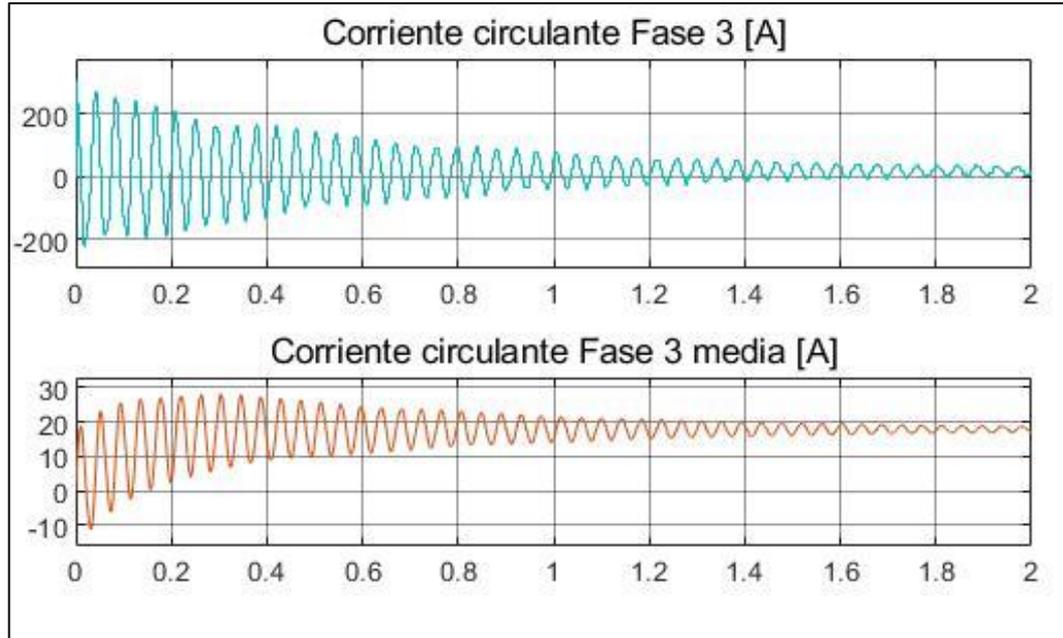


Ilustración 65 - Corriente circulante de la Fase 3 al inyectar 0 A en todas las celdas

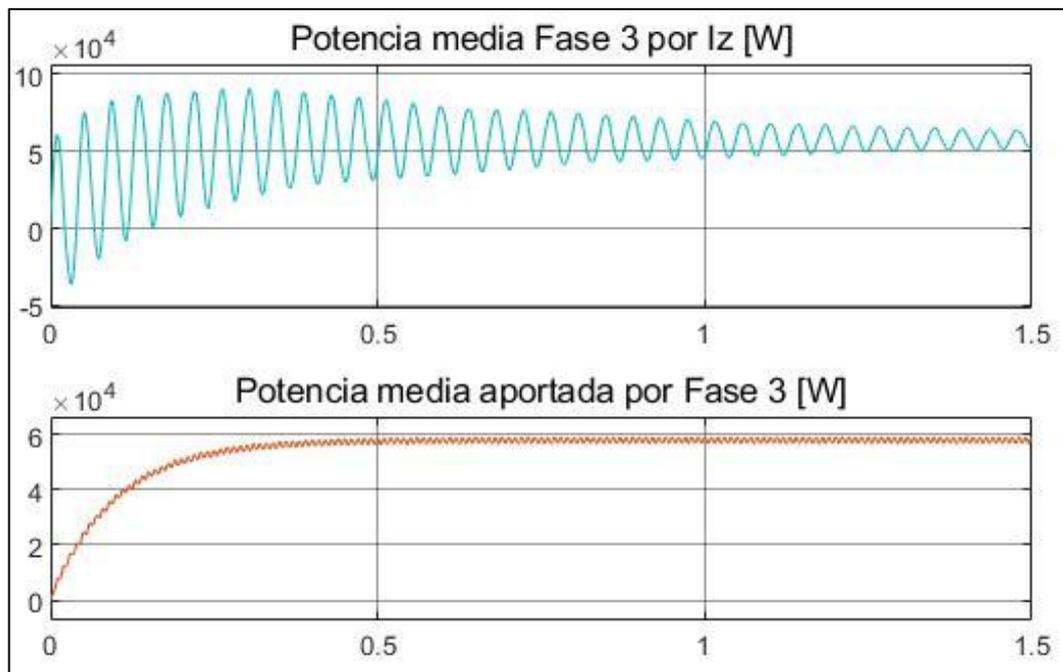


Ilustración 66 - Potencias medias de la Fase 3 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 0 A aproximadamente en todas las celdas

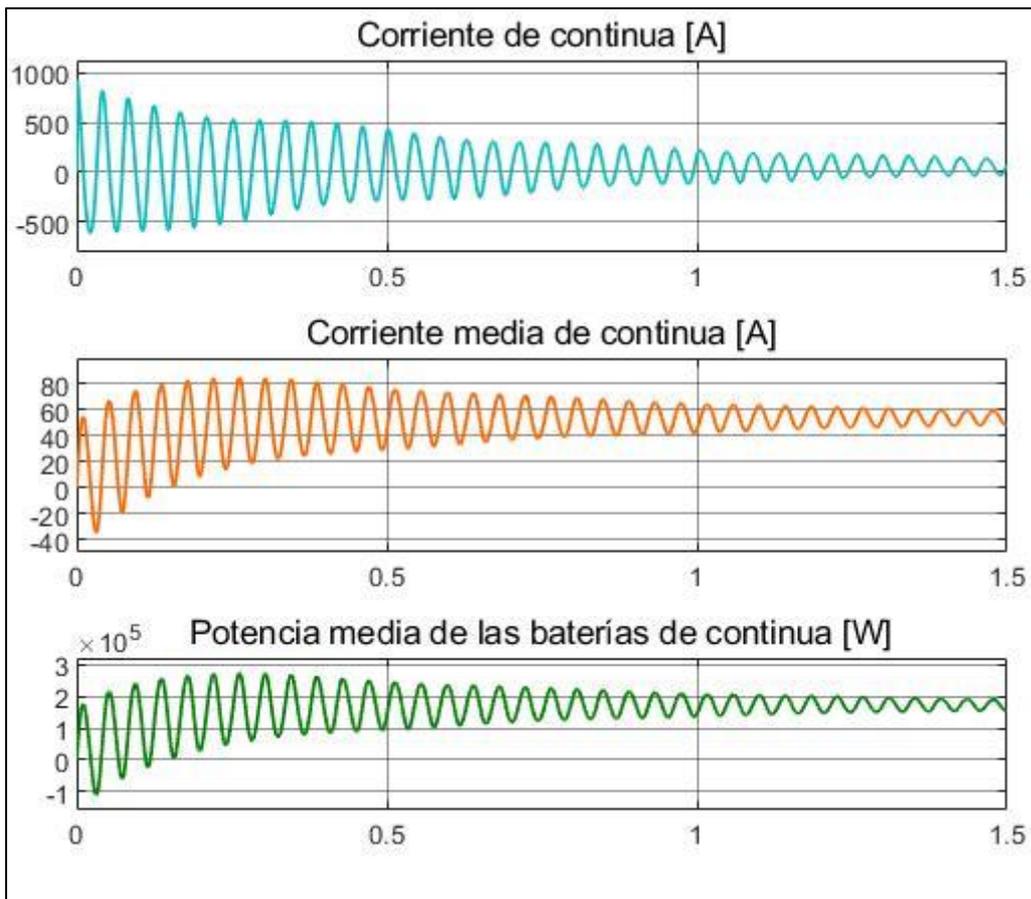


Ilustración 67 - Corriente que circula por el lado de continua, su media y la potencia media de las baterías situadas en la zona de continua cuando se inyectan 0 A en las celdas del MMC en Matlab/Simulink [W]

- Se inyectan aproximadamente 8.72 A en todas las celdas

En este caso, por cada celda circula la corriente que suministran los módulos fotovoltaicos colocados en cada una de ellas, valor cercano a 8.72 A [Ilustración 68]. Entonces, el MMC no estaría recibiendo potencia del exterior y como consecuencia se conseguiría una componente continua de corriente circulante nula, aunque como se puede ver en la Ilustración 69, Ilustración 71 e Ilustración 73, esta toma un valor residual inferior a un amperio.

En cuanto a la potencia que aporta cada fase, se puede apreciar que cada una otorga aproximadamente 57 kW como estaba previsto [Ilustración 70, Ilustración 72, Ilustración 74], y que como consecuencia de la corriente circulante residual se están entregando aproximadamente 1000 W en todas las fases, puesto que ante una tensión de 3230 V por fase y una corriente circulante de aproximadamente 0.3 A en cada fase, se genera una potencia similar a la que se está observando.

Además, si se analiza la corriente y la potencia de continua [Ilustración 75], se aprecia que las baterías de continua están aportando una corriente de un

amperio y una potencia de alrededor de 3000 W, valores que de nuevo se corresponden con las sumas de las corrientes y potencias cuyo origen pertenece a las corrientes circulantes.

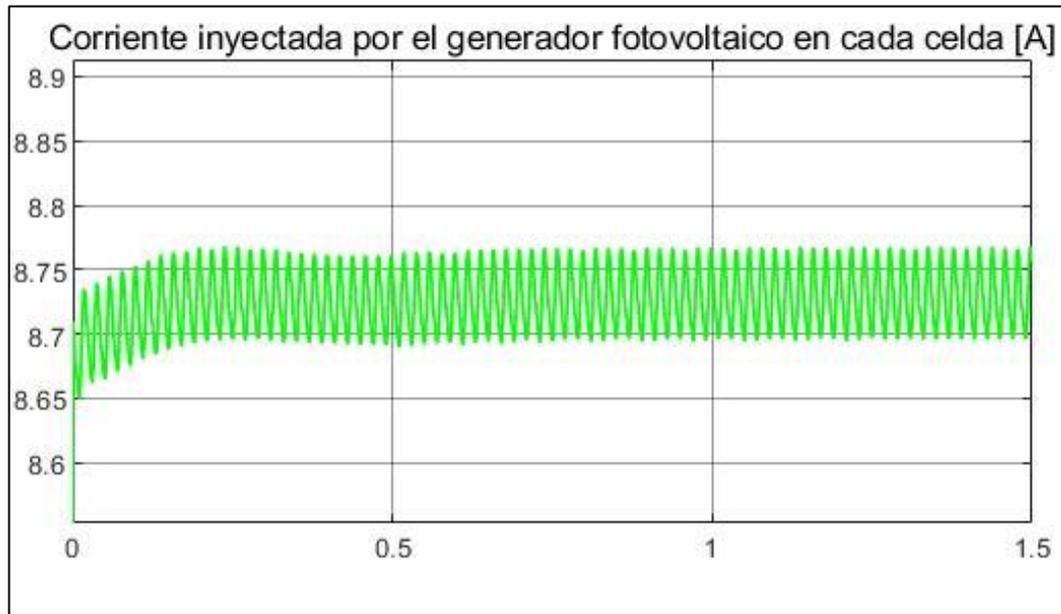


Ilustración 68 - Corriente inyectada por el generador fotovoltaico en la celda 1 de la Fase 1 y Rama Superior en Matlab/Simulink

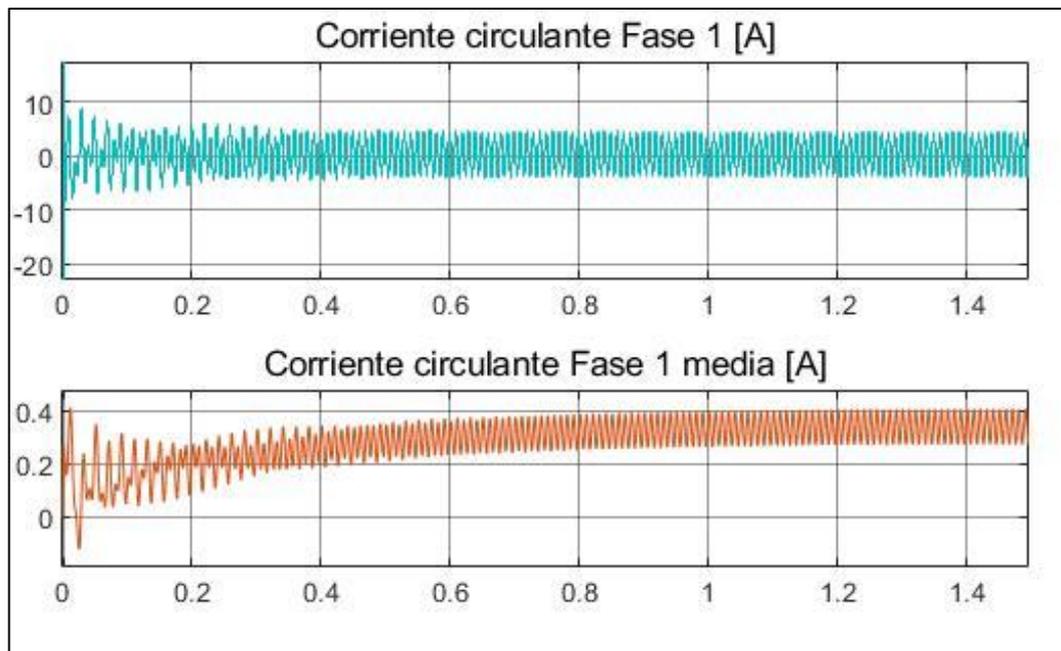


Ilustración 69 - Corriente circulante de la Fase 1 al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas

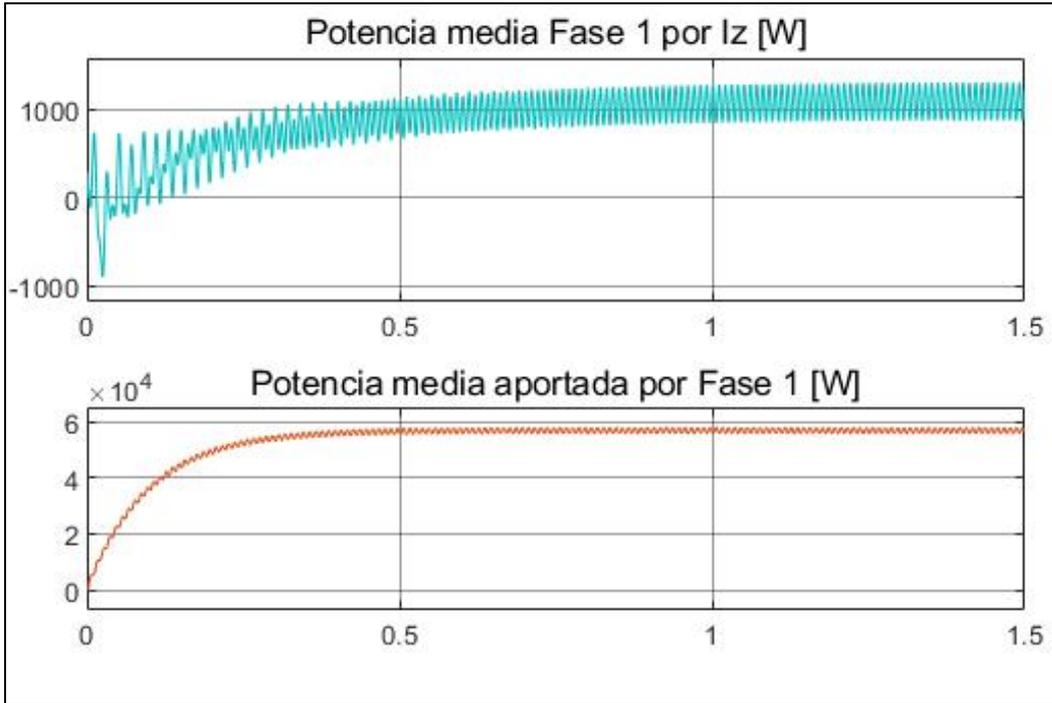


Ilustración 70 - Potencias medias de la Fase 1 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas

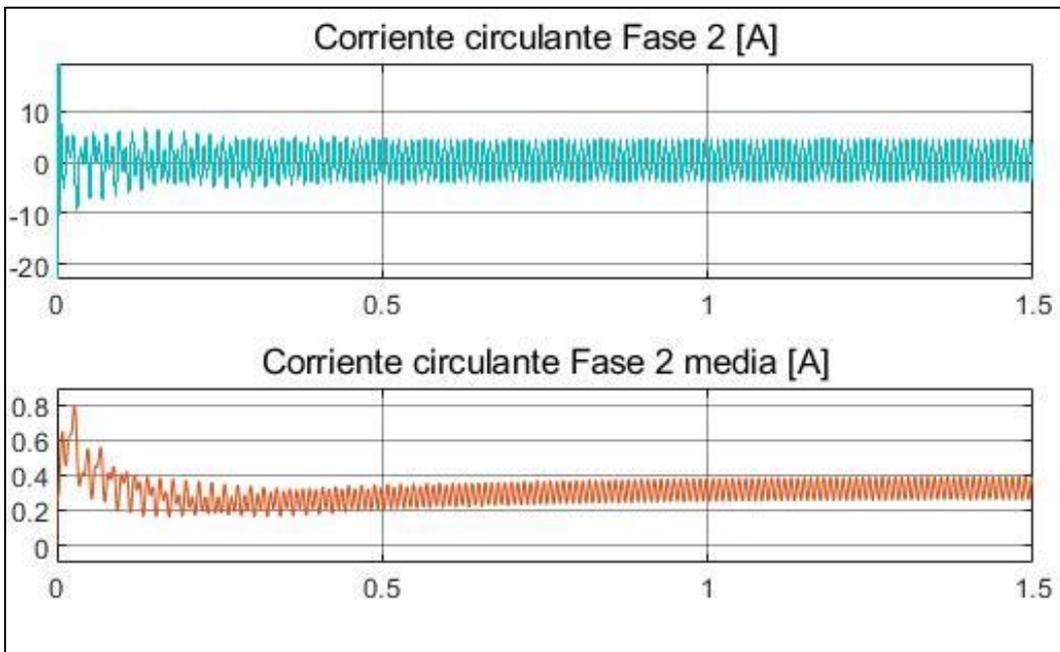


Ilustración 71 - Corriente circulante de la Fase 2 al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas

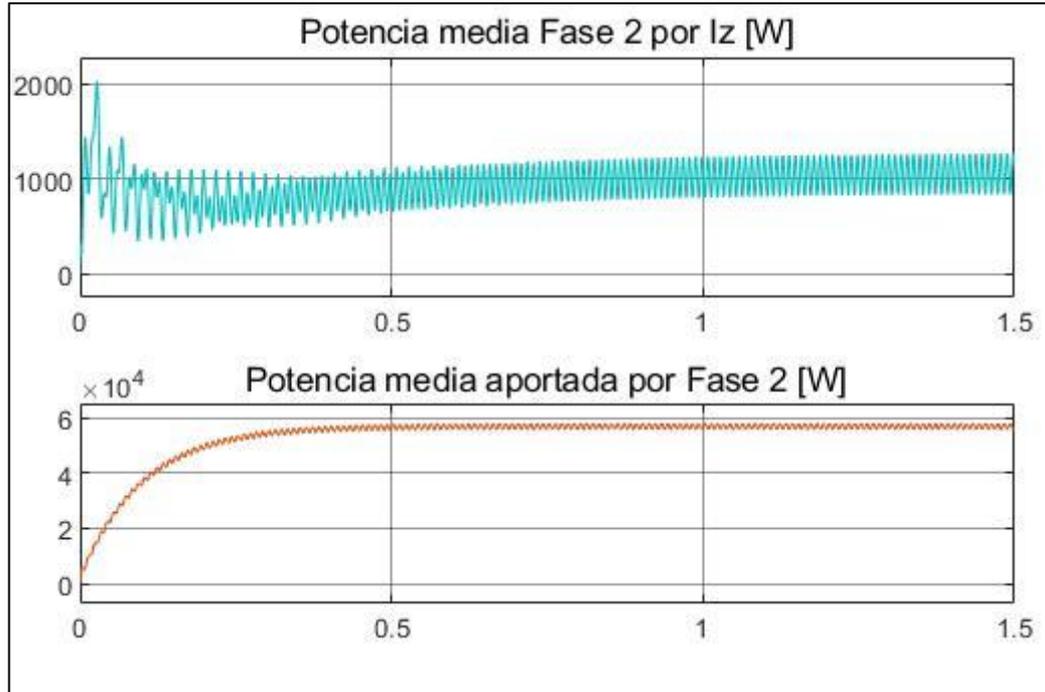


Ilustración 72 - Potencias medias de la Fase 2 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas

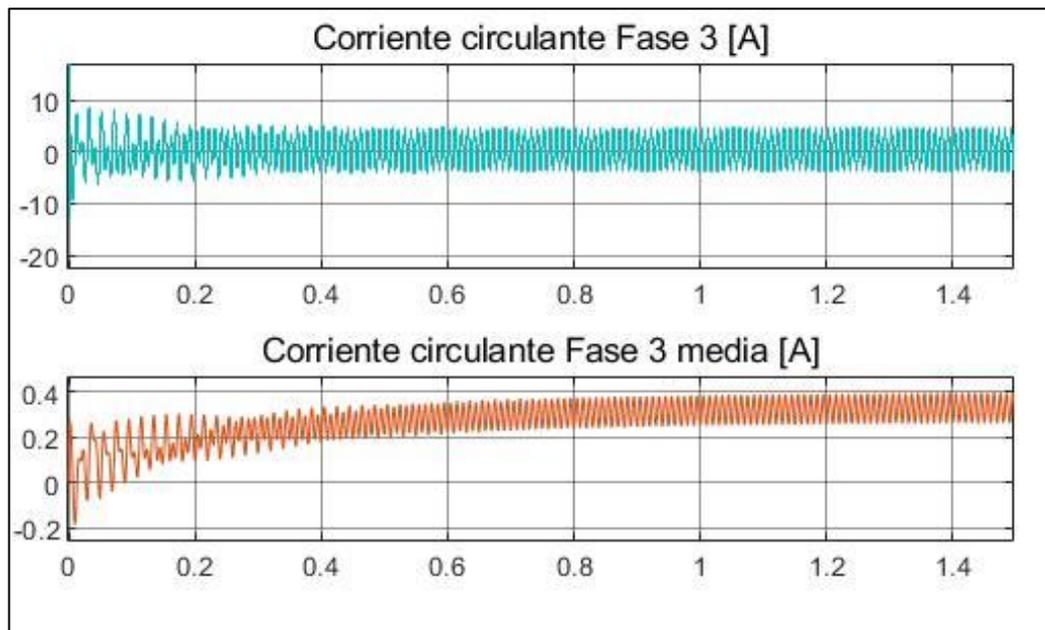


Ilustración 73 - Corriente circulante de la Fase 3 al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas

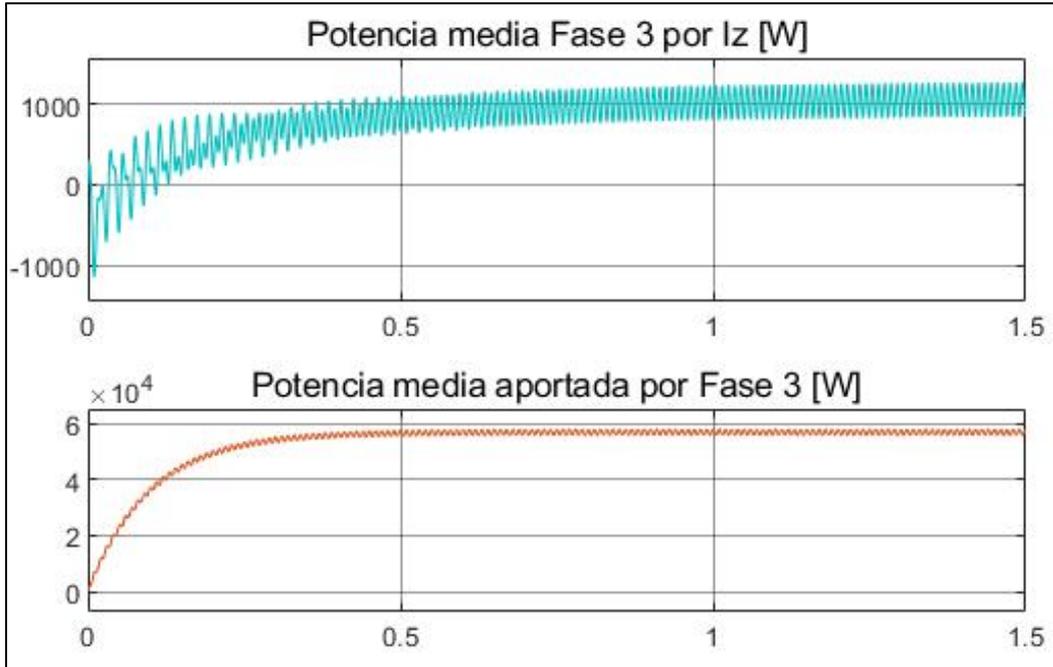


Ilustración 74 - Potencias medias de la Fase 3 del lado de continua y aportadas a la carga al inyectar 8.72 A aproximadamente en todas las celdas

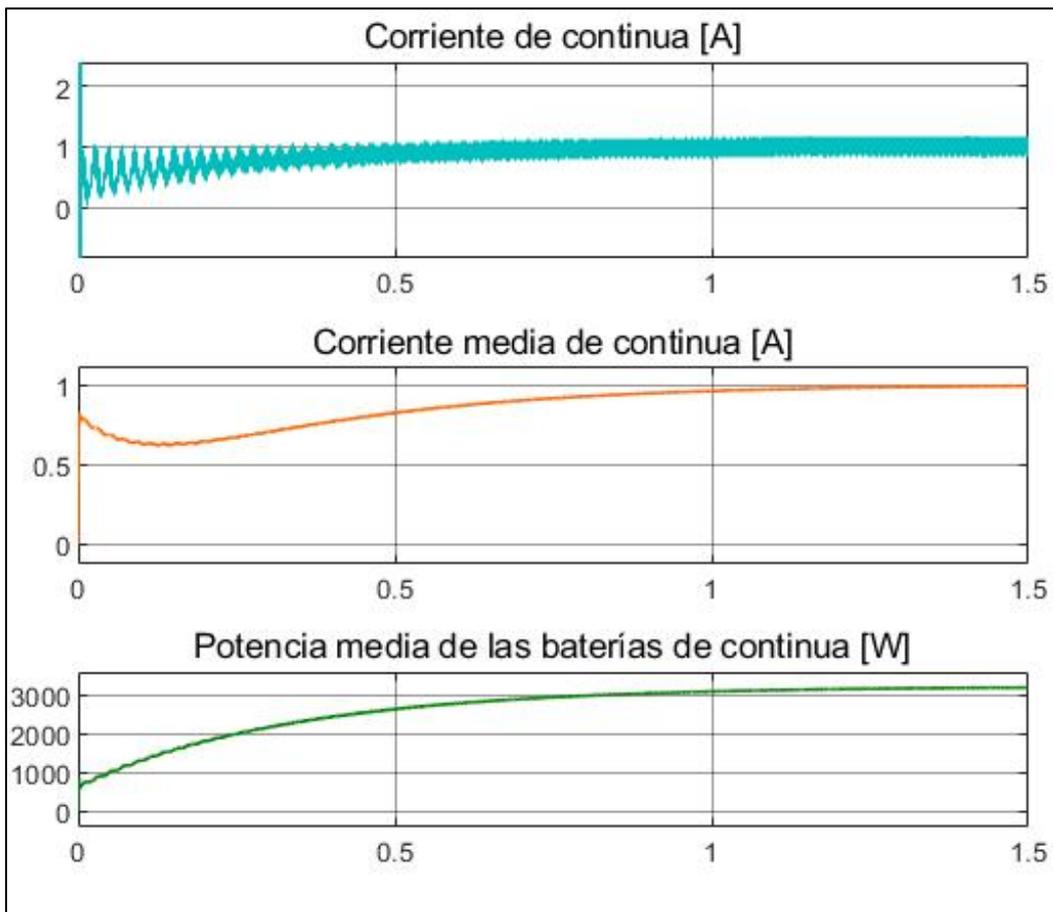


Ilustración 75 - Corriente que circula por el lado de continua, su media y la potencia media de las baterías situadas en la zona de continua cuando se inyectan 8.72 A en las celdas del MMC en Matlab/Simulink [W]



3.3. SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL

En este apartado se desarrolla la simulación realizada en tiempo real a través de la FPGA.

El esquema empleado es el que se muestra en la Ilustración 76, que como se puede apreciar, se compone de diferentes partes que se profundizan a continuación.

Al igual que en la simulación en Matlab/Simulink, seguidamente se procede a explicar el esquema utilizado, el código implementado, los resultados obtenidos y ciertas características a destacar del desarrollo.

3.3.1. ESQUEMA DEL CONVERTIDOR

En este caso, se parte del esquema final del convertidor modular multinivel de CC/CA conectado a un filtro y a una carga trifásica mostrado en la Ilustración 76. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Elección del tipo de portadora
- Desarrollar el código de control para el sistema alimentado con baterías
- Modelo alimentado con condensadores y fuentes de corrientes

Como se puede observar, en el lado AC del MMC se conecta el filtro y la carga, mientras que en el lado DC se unen dos baterías en serie.

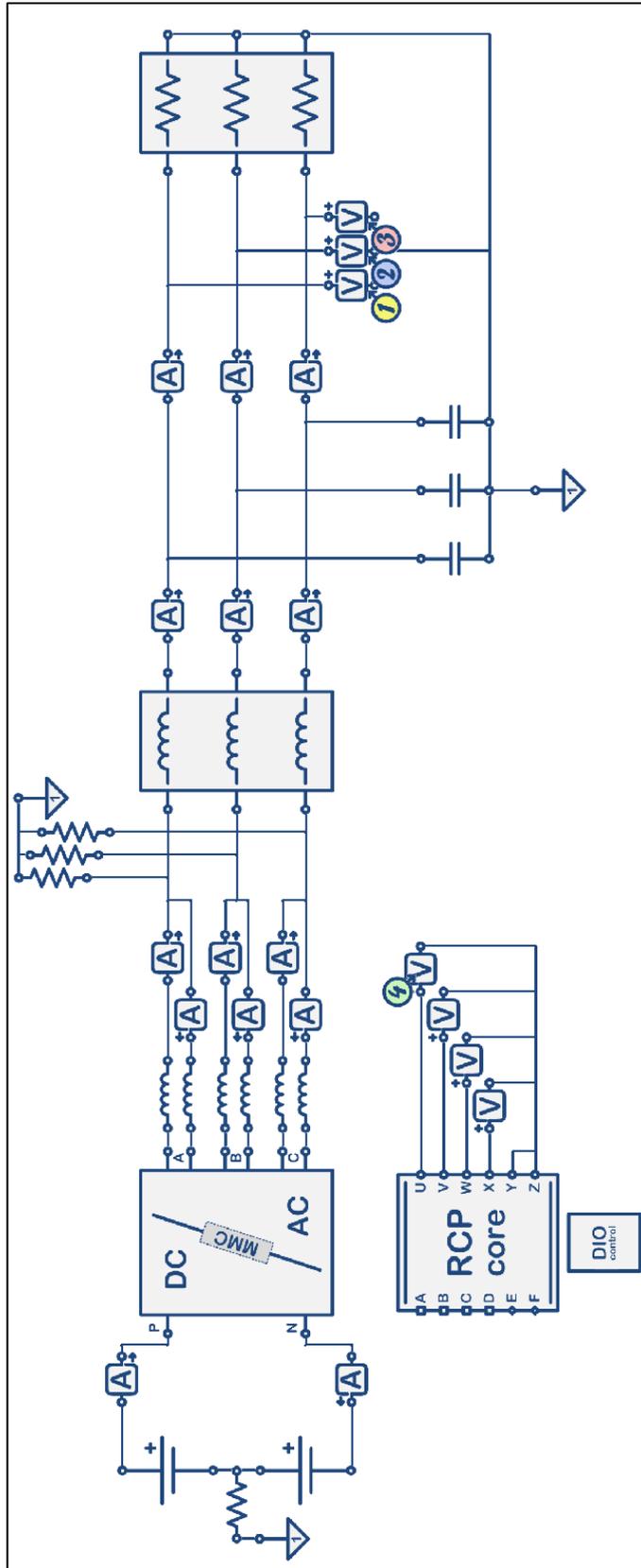


Ilustración 76 - MMC en FPGA: esquema general



3.3.2. GENERADOR FOTOVOLTAICO

En la simulación en tiempo real, la obtención del generador fotovoltaico es muy similar a la realizada en Matlab/Simulink detallada en el apartado 3.2.2 GENERADOR FOTOVOLTAICO.

Como ya se introdujo en el apartado previamente referenciado, se ha decidido utilizar el algoritmo de Horner para evaluar las ecuaciones polinómicas ya que minimiza el número de multiplicaciones y reduce la carga computacional.

Se conoce que un polinomio de grado n requiere al menos $(n^2+n) / 2$ multiplicaciones, calculando las potencias como repetición de multiplicaciones, y n sumas. Empleando el método de Horner, estas operaciones se ven reducidas a n sumas y n multiplicaciones.

Además, este método proporciona una especial ventaja en este caso en concreto ya que, para evaluar la corriente, algunos de los valores intermedios necesarios para obtener el resultado son del orden de 10^{14} . Esto resulta un impedimento ya que excede los límites de representación porque se han destinado para la parte entera 32 bits y para la parte fraccionaria 48 bits, siendo el máximo representable del orden de 10^9 y el mínimo de 10^{-15} . Usando el algoritmo de Horner se evita la necesidad de utilizar valores intermedios excesivamente altos, como la potencia quinta de la tensión calculada para el panel fotovoltaico, algo que excedería los límites representables.

Por lo tanto, en la pestaña de Global, se implementa la función que calcula la corriente que será implantada por la fuente de corriente situada en cada celda [Ilustración 77], estableciendo la relación existente entre la tensión y la corriente del panel fotovoltaico. Para su utilización, se realizan distintas llamadas a la función creada desde la pestaña de Loop como se puede ver en la Ilustración 78.

```
// Valores de las constantes
#define CONSTANTE_A      -0.00132267304167
#define CONSTANTE_B      10.0523151
#define CONSTANTE_D      0.0000000000003579875
#define CONSTANTE_E      -0.00000001424970833
#define CONSTANTE_F      0.00002220967
#define CONSTANTE_G      -0.017016857
#define CONSTANTE_H      6.42699733
#define CONSTANTE_I      -949.7475379167

// Función que calcula la corriente aportada por los
paneles fotovoltaicos

double panelPV(double Vpv)
{
    double Ipv;

    if (Vpv < 700) {
        Ipv = (CONSTANTE_A * Vpv) + CONSTANTE_B;
    }
    else {
        Ipv = (((CONSTANTE_D * Vpv + CONSTANTE_E)
        * Vpv + CONSTANTE_F) * Vpv + CONSTANTE_G)
        * Vpv + CONSTANTE_H) * Vpv + CONSTANTE_I;
    }
    return Ipv;
}
```

Ilustración 77 - Código para la implementación de la función [en pestaña Global] que calcula la corriente que suministran los paneles fotovoltaicos en RTSim

```
// Corriente Paneles Fotovoltaicos

mmc01_phA_Iup[0] = panelPV (Vcond_UP_A_1);
mmc01_phA_Iup[1] = panelPV (Vcond_UP_A_2);
mmc01_phA_Iup[2] = panelPV (Vcond_UP_A_3);
mmc01_phA_Iup[3] = panelPV (Vcond_UP_A_4);

mmc01_phA_Ilw[0] = panelPV (Vcond_LW_A_1);
mmc01_phA_Ilw[1] = panelPV (Vcond_LW_A_2);
mmc01_phA_Ilw[2] = panelPV (Vcond_LW_A_3);
mmc01_phA_Ilw[3] = panelPV (Vcond_LW_A_4);

mmc01_phB_Iup[0] = panelPV (Vcond_UP_B_1);
mmc01_phB_Iup[1] = panelPV (Vcond_UP_B_2);
mmc01_phB_Iup[2] = panelPV (Vcond_UP_B_3);
mmc01_phB_Iup[3] = panelPV (Vcond_UP_B_4);

mmc01_phB_Ilw[0] = panelPV (Vcond_LW_B_1);
mmc01_phB_Ilw[1] = panelPV (Vcond_LW_B_2);
mmc01_phB_Ilw[2] = panelPV (Vcond_LW_B_3);
mmc01_phB_Ilw[3] = panelPV (Vcond_LW_B_4);

mmc01_phC_Iup[0] = panelPV (Vcond_UP_C_1);
mmc01_phC_Iup[1] = panelPV (Vcond_UP_C_2);
mmc01_phC_Iup[2] = panelPV (Vcond_UP_C_3);
mmc01_phC_Iup[3] = panelPV (Vcond_UP_C_4);

mmc01_phC_Ilw[0] = panelPV (Vcond_LW_C_1);
mmc01_phC_Ilw[1] = panelPV (Vcond_LW_C_2);
mmc01_phC_Ilw[2] = panelPV (Vcond_LW_C_3);
mmc01_phC_Ilw[3] = panelPV (Vcond_LW_C_4);
```

Ilustración 78 - Código para obtener la corriente que suministran los paneles fotovoltaicos en RTSim [en pestaña Loop]

Como aclaración, la comunicación entre la planta donde se encuentran los paneles fotovoltaicos y el controlador que evalúa la corriente en función de la tensión de los condensadores se realiza a través de la memoria compartida tal y como se muestra en la Ilustración 79. Profundizando un poco más, el Core #1 se encarga de evaluar la tensión de los condensadores de las celdas y escribir sus valores en la memoria compartida para que el Core #2, que implementa el controlador, lea sus valores y use estos datos para equilibrar la tensión de las celdas. Por otra parte, el Core #2 calcula también la corriente aportada por cada panel fotovoltaico y escribe estos valores en la memoria compartida para

que el Core #1 los lea y aplique esas corrientes a los condensadores de las celdas.

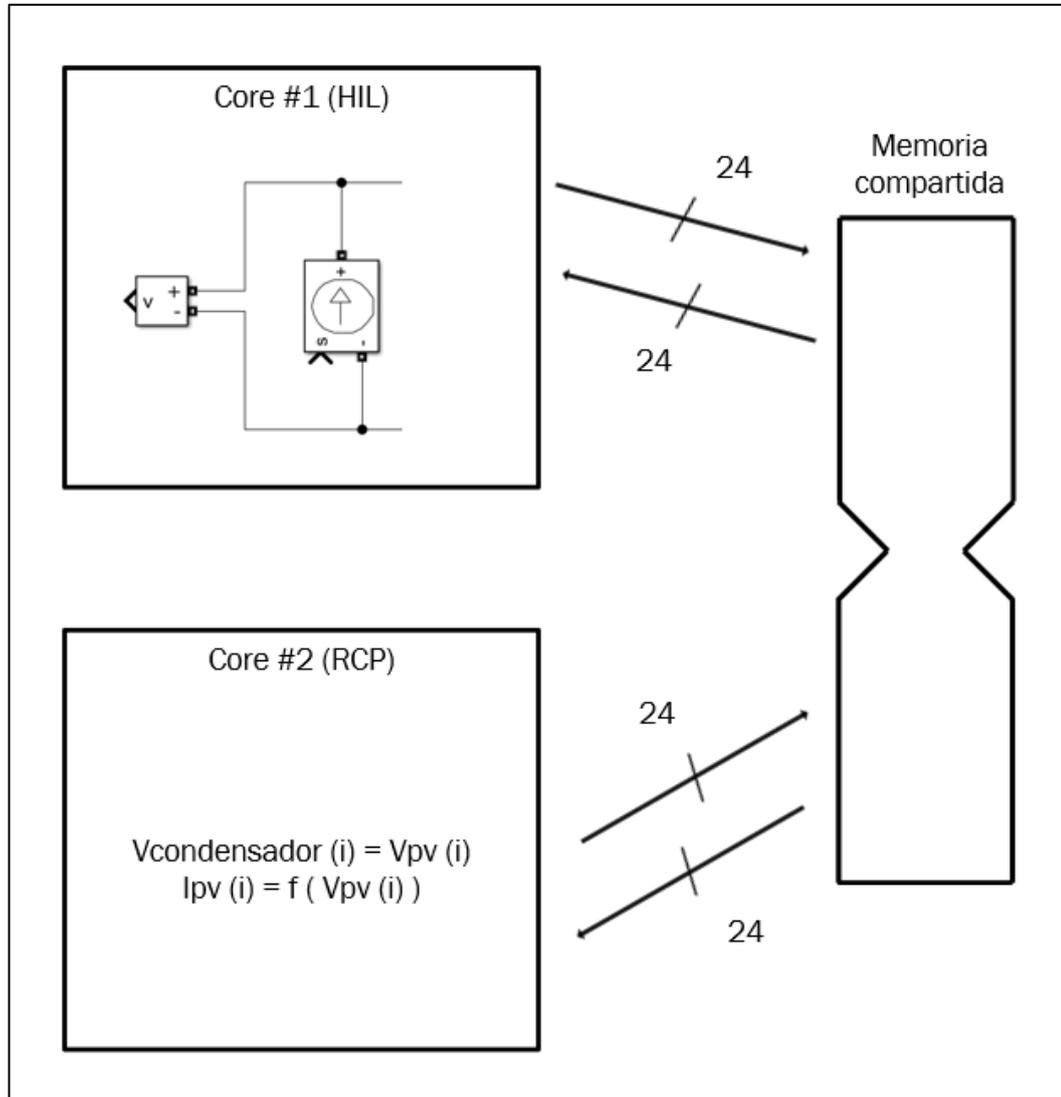


Ilustración 79 - Comunicación HIL Core y RCP Core en RTSim

3.3.3. OBTENCIÓN DEL CONVERTIDOR

A continuación, se procede a mostrar los resultados obtenidos en el desarrollo de la simulación en tiempo real.

En una primera instancia, se muestra en la Ilustración 80 las líneas de código que se han empleado en el desarrollo en este entorno, así como las variables disponibles en los dos procesadores, y los ciclos de reloj utilizados y los

microsegundos necesarios para ejecutar todo el código para el procesador que simula la planta.

```
Core #1 needs 331 code words and runs every 4 us (requires a period greater than 3.41 us) [218 clock cycles / free RPK = 64,24,44].  
Core #2 needs 3233 code words and must run every 250 us [free RPK = 26,48,5].  
Successful compilation!
```

Ilustración 80 - Información aportada por la interfaz de RTSim sobre la compilación

Se puede observar que para el HIL quedan disponibles 64 variables tipo R, 24 términos de producto y 44 constantes, es decir, se utilizan 32, 40 y 20 variables respectivamente; mientras que el RCP deja disponible 25 variables tipo R, 48 tipo P y 5 tipo K, o lo que es lo mismo, emplea 71, 16 y 59 variables respectivamente. Se puede apreciar la cercanía al límite en cuanto a uso de variables constantes se refiere, así como la diferencia de utilización de variables. El Core #1 emplea un mayor número de términos de producto en relación con el Core #2, al igual que este supera en número las variables tipo R y K usadas.

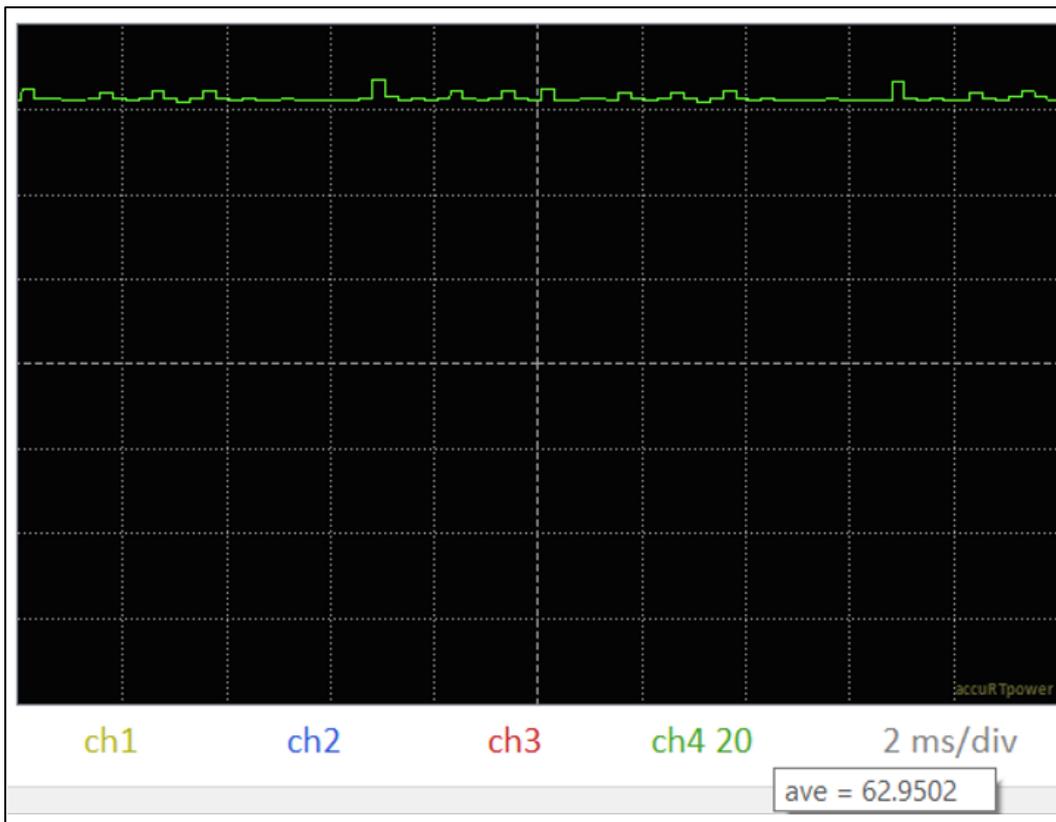


Ilustración 81 - Microsegundos empleados en ejecutar el código del Core#2 en RTSim

En cuanto a la Ilustración 81, en ella se muestran los microsegundos que ha necesitado el procesador desde que se empezó a ejecutar el código hasta donde se ha colocado la función 'loopMicroseconds ()', en este caso al final del código y, por lo tanto, proporciona los microsegundos totales para ejecutar todo el código del RCP. Por lo tanto, se obtiene un valor medio de 62.95 microsegundos, aunque en algunos momentos requerirá más. Lo que queda claro es que no parece necesitar más de 80 microsegundos, siendo 250 microsegundos el límite.

3.3.3.1. RCP CORE

El código implementado en el Core#2 que simula el controlador se explica en los siguientes apartados, haciendo una distinción en función de la pestaña en la que se encuentre [Ilustración 17].

3.3.3.1.1. PESTAÑA GLOBAL

En esta parte del controlador es donde se declaran las diferentes variables que se utilizarán a lo largo del control:

- #define: estos sirven para que se pueda utilizar una variable o constante con otro nombre. Su finalidad es aclarar el código y conseguir que resulte más comprensible. En la Ilustración 82 se puede ver que resulta muy útil para, entre otras cosas, dar un nombre a las lecturas de los amperímetros conectados después de las impedancias de rama [Ilustración 83]
- Variables destinadas a las lecturas de la memoria compartida [Ilustración 84]. Los dos Cores pueden acceder a estas variables, ya que tienen el mismo nombre y tamaño y, por lo tanto, se les asigna la misma posición en memoria
- Variables globales que se almacenan en los registros internos [Ilustración 85]
- Variables temporales cuyo valor no es imprescindible conservar y se emplean para almacenar dicho valor con la finalidad de ser utilizado en operaciones próximas [Ilustración 86]. Suelen utilizarse para almacenar el valor de las componentes de un vector ya que existen determinadas funciones que se ejecutan más rápido si utilizan variables escalares
- Variables vectoriales que se almacenan en la memoria externa compartida [Ilustración 87]



- Funciones para clarificar el código [Ilustración 77, Ilustración 88 e Ilustración 89]

```
//Global
#define TPWM 500

#define UP_A_1 1
#define UP_A_2 2
#define UP_A_3 3
#define UP_A_4 4
#define LW_A_1 5
#define LW_A_2 6
#define LW_A_3 7
#define LW_A_4 8
#define UP_B_1 9
#define UP_B_2 10
#define UP_B_3 11
#define UP_B_4 12
#define LW_B_1 13
#define LW_B_2 14
#define LW_B_3 15
#define LW_B_4 16
#define UP_C_1 17
#define UP_C_2 18
#define UP_C_3 19
#define UP_C_4 20
#define LW_C_1 21
#define LW_C_2 22
#define LW_C_3 23
#define LW_C_4 24

#define A_UP 0
#define B_UP 1
#define C_UP 2
#define A_LW 3
#define B_LW 4
#define C_LW 5

#define V_DC_HALF 1614.8

#define I_UP_A readAO(1)
#define I_LW_A readAO(2)
#define I_UP_B readAO(3)
#define I_LW_B readAO(4)
#define I_UP_C readAO(5)
#define I_LW_C readAO(6)

#define INSERTED 1
#define BYPASS 0
```

Ilustración 82 - Código con #defines en la parte Global de la RTSim

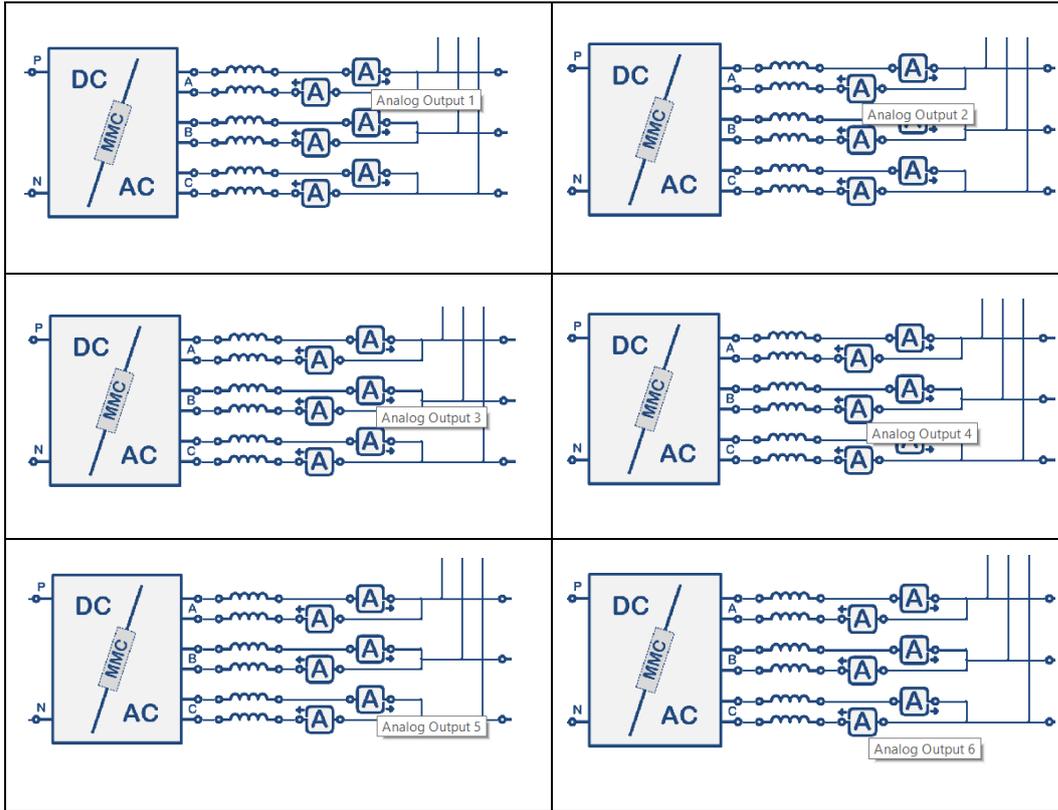


Ilustración 83 - Nombres de las señales analógicas leídas por los amperímetros conectados en cada rama en RTSim

```
double    mmc01_phA_Vup[4];
double    mmc01_phA_Vlw[4];

double    mmc01_phB_Vup[4];
double    mmc01_phB_Vlw[4];

double    mmc01_phC_Vup[4];
double    mmc01_phC_Vlw[4];

double    mmc01_phA_Iup[4];
double    mmc01_phA_Ilw[4];

double    mmc01_phB_Iup[4];
double    mmc01_phB_Ilw[4];

double    mmc01_phC_Iup[4];
double    mmc01_phC_Ilw[4];
```

Ilustración 84 - Código para la declaración de variables destinadas a la lectura de las tensiones de los condensadores situados en la planta en la parte Global de la RTSim

```
// Global variables

int      syncP, syncN;

double   phase, incPhase;

double   Valpha_ref, Vbeta_ref;
double   Va_ref, Vb_ref, Vc_ref;

double   Va_up_ref, Vb_up_ref, Vc_up_ref;
double   Va_lw_ref, Vb_lw_ref, Vc_lw_ref;

int      ESTADO_ACTUAL_A_UP, ESTADO_ACTUAL_B_UP,
         ESTADO_ACTUAL_C_UP, ESTADO_ACTUAL_A_LW,
         ESTADO_ACTUAL_B_LW, ESTADO_ACTUAL_C_LW;

double   Vcond_UP_A_1, Vcond_UP_A_2, Vcond_UP_A_3,
         Vcond_UP_A_4, Vcond_LW_A_1, Vcond_LW_A_2,
         Vcond_LW_A_3, Vcond_LW_A_4;

double   Vcond_UP_B_1, Vcond_UP_B_2, Vcond_UP_B_3,
         Vcond_UP_B_4, Vcond_LW_B_1, Vcond_LW_B_2,
         Vcond_LW_B_3, Vcond_LW_B_4;

double   Vcond_UP_C_1, Vcond_UP_C_2, Vcond_UP_C_3,
         Vcond_UP_C_4, Vcond_LW_C_1, Vcond_LW_C_2,
         Vcond_LW_C_3, Vcond_LW_C_4;

double   porcentaje_A_UP, porcentaje_B_UP,
         porcentaje_C_UP, porcentaje_A_LW,
         porcentaje_B_LW, porcentaje_C_LW;
```

Ilustración 85 - Código para la declaración de variables globales en la parte Global de la RTSim

```
// Temporales para operar por fallos del
compilador/optimizador

int      nivel;
int      pos;
int      ESTADO_PREVIO;
double   pos_vector;
double   Vpv;

double   dutyCycle_1, dutyCycle_2, dutyCycle_3,
         dutyCycle_4;
```

Ilustración 86 - Código para la declaración de variables temporales en la parte Global de la RTSim



```
// Variables vectoriales (double anotherOne[2040])  
  
int      pS[25];  
double  Iph[6];  
double  dutyCycle[25];
```

Ilustración 87 - Código para la declaración de variables vectoriales en la parte Global de la RTSim

Se puede apreciar la diferencia entre el código de Matlab y el implementado en la simulación en tiempo real para desarrollar las funciones que calculan las posiciones de las tensiones máximas y mínimas de las celdas que están insertadas o no.

En el de la FPGA [Ilustración 88 e Ilustración 89] no se ha hecho uso de ningún bucle, a diferencia de en Matlab [Ilustración 39]. El principal motivo es que el compilador no admite que se envíe un vector entero a través de los argumentos, deben comunicarse sus componentes uno a uno. Por ello es más sencillo trabajar directamente con los componentes de los vectores. Además, de esta forma se le permite al compilador medir con mayor facilidad la duración del código. Cuando se introducen bucles como 'for' o 'while', el compilador no es capaz de medir, ni tampoco estimar, los ciclos de reloj que se requieren ya que no dispone del número de veces que se va a repetir el bucle.

Destacar que se ha comentado en el último 'if' la asignación de la tensión del condensador a la tensión 'Vmin'. El motivo es que no es necesario porque ya no hay más 'if' en los que poder verificar la condición.

```
// Funciones para calcular posiciones de Vmin y Vmax

int posVmin (int estado_buscado, double Vcond_1,
double Vcond_2, double Vcond_3, double Vcond_4,
double pS_1, double pS_2, double pS_3, double pS_4)
{
    double Vmin;
    Vmin = 1600;

    int pos;
    pos = 0;

    if ((pS_1 == estado_buscado) && (Vcond_1 <
Vmin)) {
        pos = 0;
        Vmin = Vcond_1;
    }

    if ((pS_2 == estado_buscado) && (Vcond_2 <
Vmin)) {
        pos = 1;
        Vmin = Vcond_2;
    }

    if ((pS_3 == estado_buscado) && (Vcond_3 <
Vmin)) {
        pos = 2;
        Vmin = Vcond_3;
    }

    if ((pS_4 == estado_buscado) && (Vcond_4 <
Vmin)) {
        pos = 3;
        //Vmin = Vcond_4;
    }

    return pos;
}
```

Ilustración 88 - Código para implementar la función posVmin en la parte Global de RTSim



```
int posVmax (int estado_buscado, double Vcond_1,
double Vcond_2, double Vcond_3, double Vcond_4,
double pS_1, double pS_2, double pS_3, double pS_4)
{
    double Vmax;
    Vmax = -1600;

    int pos;
    pos = 0;

    if ((pS_1 == estado_buscado) && (Vcond_1 >
Vmax)) {
        pos = 0;
        Vmax = Vcond_1;
    }

    if ((pS_2 == estado_buscado) && (Vcond_2 >
Vmax)) {
        pos = 1;
        Vmax = Vcond_2;
    }

    if ((pS_3 == estado_buscado) && (Vcond_3 >
Vmax)) {
        pos = 2;
        Vmax = Vcond_3;
    }

    if ((pS_4 == estado_buscado) && (Vcond_4 >
Vmax)) {
        pos = 3;
        //Vmax = Vcond_4;
    }

    return pos;
}
```

Ilustración 89 - Código para implementar la función posVmax en la parte Global de RTSim

3.3.3.1.2. PESTAÑA SETUP

En esta parte de código que solo se ejecuta en el primer ciclo, se da un valor inicial a cada variable declarada anteriormente [Ilustración 90, Ilustración 91 e Ilustración 92].

```
// Setup

Vuz = 0;
Vvz = 0;
Vwz = 0;
Vxz = 0;

syncP = 1;
syncN = 0;

phase = 0.0;

dutyCycle_1 = 0;
dutyCycle_2 = 1;
dutyCycle_3 = 0;
dutyCycle_4 = 1;
```

Ilustración 90 - Código del setup de la RTSim (parte 1)

Como se puede apreciar en la Ilustración 90, Ilustración 91 e Ilustración 92 se ha decidido inicializar las variables correspondientes a las señales de disparo y los ciclos de trabajo al 50% entre cero y uno con la finalidad de no provocar un transitorio inicial excesivamente violento.



```
dutyCycle[UP_A_1] = 0;  
dutyCycle[UP_A_2] = 1;  
dutyCycle[UP_A_3] = 0;  
dutyCycle[UP_A_4] = 1;  
  
dutyCycle[LW_A_1] = 0;  
dutyCycle[LW_A_2] = 1;  
dutyCycle[LW_A_3] = 0;  
dutyCycle[LW_A_4] = 1;  
  
dutyCycle[UP_B_1] = 0;  
dutyCycle[UP_B_2] = 1;  
dutyCycle[UP_B_3] = 0;  
dutyCycle[UP_B_4] = 1;  
  
dutyCycle[LW_B_1] = 0;  
dutyCycle[LW_B_2] = 1;  
dutyCycle[LW_B_3] = 0;  
dutyCycle[LW_B_4] = 1;  
  
dutyCycle[UP_C_1] = 0;  
dutyCycle[UP_C_2] = 1;  
dutyCycle[UP_C_3] = 0;  
dutyCycle[UP_C_4] = 1;  
  
dutyCycle[LW_C_1] = 0;  
dutyCycle[LW_C_2] = 1;  
dutyCycle[LW_C_3] = 0;  
dutyCycle[LW_C_4] = 1;  
  
ESTADO_ACTUAL_A_UP = 0;  
ESTADO_ACTUAL_B_UP = 0;  
ESTADO_ACTUAL_C_UP = 0;  
ESTADO_ACTUAL_A_LW = 0;  
ESTADO_ACTUAL_B_LW = 0;  
ESTADO_ACTUAL_C_LW = 0;  
  
ESTADO_PREVIO = 0;
```

Ilustración 91 - Código del setup de la RTSim (parte 2)

```
pS[UP_A_1] = 0;  
pS[UP_A_2] = 1;  
pS[UP_A_3] = 0;  
pS[UP_A_4] = 1;  
  
pS[LW_A_1] = 0;  
pS[LW_A_2] = 1;  
pS[LW_A_3] = 0;  
pS[LW_A_4] = 1;  
  
pS[UP_B_1] = 0;  
pS[UP_B_2] = 1;  
pS[UP_B_3] = 0;  
pS[UP_B_4] = 1;  
  
pS[LW_B_1] = 0;  
pS[LW_B_2] = 1;  
pS[LW_B_3] = 0;  
pS[LW_B_4] = 1;  
  
pS[UP_C_1] = 0;  
pS[UP_C_2] = 1;  
pS[UP_C_3] = 0;  
pS[UP_C_4] = 1;  
  
pS[LW_C_1] = 0;  
pS[LW_C_2] = 1;  
pS[LW_C_3] = 0;  
pS[LW_C_4] = 1;  
  
porcentaje_A_UP = 0;  
porcentaje_B_UP = ;  
porcentaje_C_UP = 0;  
porcentaje_A_LW = 0;  
porcentaje_B_LW = 0;  
porcentaje_C_LW = 0;
```

Ilustración 92 - Código del setup de la RTSim (parte 3)

3.3.3.1.3. PESTAÑA LOOP

En esta pestaña se recoge la parte de código que se repite de forma periódica, como ya se ha mencionado a lo largo de este trabajo.

Se procede a realizar una pequeña distinción en el código implementado en función de la finalidad de cada parte del desarrollo.

A) PORTADORAS

Para la generación de las señales portadoras se ha implementado el código que se muestra en la Ilustración 93. Solamente se muestra el correspondiente a la primera fase ya que el de las demás es muy similar y se adjunta en los Anexos de este TFG.

Como se puede observar se utiliza el tipo de portadora PD sin realizar ninguna modificación, dada la simplicidad de su implementación y la calidad de sus resultados.

```
// Generar salidas de PWM sincronizadas

dutyCycle_1 = dutyCycle[UP_A_1];
dutyCycle_2 = dutyCycle[UP_A_2];
dutyCycle_3 = dutyCycle[UP_A_3];
dutyCycle_4 = dutyCycle[UP_A_4];
pwmConfig(UP_A_1, TPWM, syncP, dutyCycle_1);
pwmConfig(UP_A_2, TPWM, syncP, dutyCycle_2);
pwmConfig(UP_A_3, TPWM, syncP, dutyCycle_3);
pwmConfig(UP_A_4, TPWM, syncP, dutyCycle_4);

dutyCycle_1 = dutyCycle[LW_A_1];
dutyCycle_2 = dutyCycle[LW_A_2];
dutyCycle_3 = dutyCycle[LW_A_3];
dutyCycle_4 = dutyCycle[LW_A_4];
pwmConfig(LW_A_1, TPWM, syncN, dutyCycle_1);
pwmConfig(LW_A_2, TPWM, syncN, dutyCycle_2);
pwmConfig(LW_A_3, TPWM, syncN, dutyCycle_3);
pwmConfig(LW_A_4, TPWM, syncN, dutyCycle_4);
```

Ilustración 93 - Código de la generación de las señales portadoras de la fase 1 y rama superior e inferior en RTSim

También se puede destacar el uso de la función `pwmConfig` con la finalidad de reiniciar la portadora en cada ciclo y asegurar la sincronización del sistema.

Además, se puede apreciar en la Ilustración 93 el empleo de variables temporales para asignarlas los valores de las variables vectoriales con el fin de utilizar variables escalares en la función de `pwmConfig`. El motivo es reducir el Jitter o fluctuación de retardo, es decir, el desfase temporal entre dos eventos de sincronización que se supone que deberían ser simultáneos. Lo deseable sería que todos los generadores de PWM se sincronizaran en el mismo ciclo de reloj, ya que cualquier demora provoca retrasos no deseados entre las señales de PWM, pero esto no es posible porque se sincroniza cada canal con su orden de `pwmConfig()`. Dichas demoras pueden ocasionar distorsiones en las señales de salida, así como gradientes de corriente circulante originados por la variación de tensión que se produce en las bobinas de rama durante ese periodo de tiempo que transcurre entre que cambia el estado de las señales de disparo de una rama y las de su opuesta. Empleando variables temporales se reduce la diferencia temporal en la sincronización de todas las celdas de cada rama del convertidor.

Con esta misma finalidad, aumentar la simultaneidad de conmutación entre ambas ramas, se decide también colocar portadoras opuestas en cada una de las celdas de cada rama ya que las moduladoras también son opuestas en cada rama.

B) LECTURA DE LA MEMORIA COMPARTIDA

Como se sabe y se realizó en la parte de 3.2 SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK, es necesario conocer y utilizar las tensiones de los condensadores de cada celda para poder realizar el control.

En este caso, se hace uso de la memoria compartida que posee la FPGA y se accede a la escritura de las tensiones de los condensadores por parte del Core#1 o HIL [Ilustración 94]. Se puede apreciar que la lectura de todas las tensiones de los condensadores se realiza a la vez para evitar en la medida de lo posible que se obtengan valores de diferentes periodos de muestreo de la planta, la cual se está ejecutando mucho más rápido que el controlador; y en todo caso, se leen una única vez para actuar desde el controlador empleando un único valor para dichas tensiones, con la finalidad de trabajar en cada ciclo con los mismos valores.

```
// Lectura de las tensiones de los condensadores de
cada celda

Vcond_UP_A_1 = mmc01_phA_Vup[0];
Vcond_UP_A_2 = mmc01_phA_Vup[1];
Vcond_UP_A_3 = mmc01_phA_Vup[2];
Vcond_UP_A_4 = mmc01_phA_Vup[3];

Vcond_LW_A_1 = mmc01_phA_Vlw[0];
Vcond_LW_A_2 = mmc01_phA_Vlw[1];
Vcond_LW_A_3 = mmc01_phA_Vlw[2];
Vcond_LW_A_4 = mmc01_phA_Vlw[3];

Vcond_UP_B_1 = mmc01_phB_Vup[0];
Vcond_UP_B_2 = mmc01_phB_Vup[1];
Vcond_UP_B_3 = mmc01_phB_Vup[2];
Vcond_UP_B_4 = mmc01_phB_Vup[3];

Vcond_LW_B_1 = mmc01_phB_Vlw[0];
Vcond_LW_B_2 = mmc01_phB_Vlw[1];
Vcond_LW_B_3 = mmc01_phB_Vlw[2];
Vcond_LW_B_4 = mmc01_phB_Vlw[3];

Vcond_UP_C_1 = mmc01_phC_Vup[0];
Vcond_UP_C_2 = mmc01_phC_Vup[1];
Vcond_UP_C_3 = mmc01_phC_Vup[2];
Vcond_UP_C_4 = mmc01_phC_Vup[3];

Vcond_LW_C_1 = mmc01_phC_Vlw[0];
Vcond_LW_C_2 = mmc01_phC_Vlw[1];
Vcond_LW_C_3 = mmc01_phC_Vlw[2];
Vcond_LW_C_4 = mmc01_phC_Vlw[3];
```

Ilustración 94 - Código para la lectura de las tensiones de los condensadores de las celdas en RTSim

C) SEÑAL DE SINCRONIZACIÓN

De nuevo, se precisa de una señal de sincronización [Ilustración 95] que, como su propio nombre indica, sincronice todo el sistema.

Para su implementación se realiza una comparación [línea tres de la Ilustración 95]. En caso de ser cierta se asigna un uno, y en caso contrario un cero. De esta forma su valor va alternando entre cero y uno.

```
// Generación de la señal de sincronización  
syncP = syncN;  
syncN = (syncN == 0);
```

Ilustración 95 - Código para la generación de la señal de sincronización en RTSim

Cabe destacar que, en la simulación en tiempo real, al implementar unas portadoras de tipo PD, se ha decidido eliminar la variable 'rampas' e utilizar directamente esta señal de sincronización.

D) SEÑALES DE MODULACIÓN

Para la generación de las señales moduladoras, se hace uso de unas funciones específicas [Ilustración 96]. En primer lugar, se ajusta la fase inicial más el incremento de fase a $\pm\pi$. Posteriormente se hallan las tensiones Alpha y Beta, y mediante la función `ab2uvw`, que permite realizar la transformada de Park inversa, obtener directamente las moduladoras senoidales desfasadas 120° . Finalmente se calculan directamente los valores normalizados multiplicando por 0.00125, o lo que es lo mismo, dividiendo entre 807.4.

```
// Actualización de la fase (de -pi a +pi)  
// 2pi x 50Hz x Ts  
incPhase = 314.1592654 * loopPeriod()  
phase     = wrapToPI(phase + incPhase);  
  
// Obtención de las componentes alpha y beta  
Valpha_ref = 1200.0 * cos(phase);  
Vbeta_ref  = 1200.0 * sin(phase);  
  
// Obtención de la tensión fase (a-b-c) neutro  
ab2uvw(Valpha_ref, Vbeta_ref, Va_ref, Vb_ref,  
        Vc_ref);  
  
// Obtención tensiones de referencia superior e  
inferior para las celdas del MMC con 807.4 V  
Va_up_ref = V_DC_HALF * 0.00125 - Va_ref * 0.00125;  
Vb_up_ref = V_DC_HALF * 0.00125 - Vb_ref * 0.00125;  
Vc_up_ref = V_DC_HALF * 0.00125 - Vc_ref * 0.00125;  
Va_lw_ref = V_DC_HALF * 0.00125 + Va_ref * 0.00125;  
Vb_lw_ref = V_DC_HALF * 0.00125 + Vb_ref * 0.00125;  
Vc_lw_ref = V_DC_HALF * 0.00125 + Vc_ref * 0.00125;
```

Ilustración 96 - Código para la generación de las señales moduladoras en RTSim

E) CONTROL

En este apartado se muestra la parte de código destinada al control, es decir, el cálculo del ciclo de servicio, la valoración de encender o apagar un número determinado de celdas y la elección del condensador más apropiado a cargar o descargar.

En primer lugar, se comienza calculando el ciclo de servicio. Para ello se hace uso de la función 'floor()' que calcula el nivel en el que se encuentra. Con esta información se puede obtener el ciclo de trabajo que se almacenará en un vector llamado 'porcentaje' [Ilustración 97].

```
// Obtención de los ciclos de trabajo de cada rama
nivel = floor(Va_up_ref);
porcentaje_A_UP = Va_up_ref - nivel;

nivel = floor(Vb_up_ref);
porcentaje_B_UP = Vb_up_ref - nivel;

nivel = floor(Vc_up_ref);
porcentaje_C_UP = Vc_up_ref - nivel;

nivel = floor(Va_lw_ref);
porcentaje_A_LW = Va_lw_ref - nivel;

nivel = floor(Vb_lw_ref);
porcentaje_B_LW = Vb_lw_ref - nivel;

nivel = floor(Vc_lw_ref);
porcentaje_C_LW = Vc_lw_ref - nivel;
```

Ilustración 97 - Código para calcular el ciclo de servicio en RTSim

Después se procede a calcular el estado actual de los polos simplemente sumándolos. Así se obtiene el número de celdas insertadas en cada rama y en cada fase [Ilustración 98], de tal manera que se pueda evaluar la necesidad de activar, desactivar o mantener los condensadores, eligiendo los más apropiados [Ilustración 99], ya que de igual manera que en el apartado C) SEÑALES DE CONTROL de la simulación en Matlab/Simulink, el ciclo de trabajo previamente calculado solamente se asignará a una de las cuatro celdas de cada rama.

```
// Estado actual
ESTADO_ACTUAL_A_UP = pS[UP_A_1] + pS[UP_A_2] +
                    pS[UP_A_3] + pS[UP_A_4];

ESTADO_ACTUAL_B_UP = pS[UP_B_1] + pS[UP_B_2] +
                    pS[UP_B_3] + pS[UP_B_4];

ESTADO_ACTUAL_C_UP = pS[UP_C_1] + pS[UP_C_2] +
                    pS[UP_C_3] + pS[UP_C_4];

ESTADO_ACTUAL_A_LW = pS[LW_A_1] + pS[LW_A_2] +
                    pS[LW_A_3] + pS[LW_A_4];

ESTADO_ACTUAL_B_LW = pS[LW_B_1] + pS[LW_B_2] +
                    pS[LW_B_3] + pS[LW_B_4];

ESTADO_ACTUAL_C_LW = pS[LW_C_1] + pS[LW_C_2] +
                    pS[LW_C_3] + pS[LW_C_4];
```

Ilustración 98 - Código para calcular el estado actual en RTSim

En resumen, se realiza lo siguiente: se asigna a cada ciclo de servicio el estado de los polos actual para mantener el estado y solamente cambiar los necesarios. A continuación, se realiza un bucle como se ha visto en C) SEÑALES DE CONTROL para activar o desactivar tantos condensadores como sea necesario. El razonamiento es exactamente igual que en la simulación realizada con Matlab/Simulink. Se escoge el condensador a encender o apagar en función del sentido de la corriente, y se le asigna el ciclo de servicio. Después, se actualiza el estado actual, se calcula el estado de los polos al final del ciclo con el cambio introducido y se cambia el valor del porcentaje, en función de si se están encendiendo o apagando, para no volver a asignar un ciclo de servicio en caso de tener que activar o desactivar más de una celda.

En este apartado solamente se ha incluido el código relativo a la fase A y rama superior. Para las demás fases y ramas el código es prácticamente igual y se adjunta en los Anexos de la memoria.



```
// ***** A_UP *****

pos = 0;
ESTADO_PREVIO = ESTADO_ACTUAL_A_UP;
dutyCycle[UP_A_1] = pS[UP_A_1];
dutyCycle[UP_A_2] = pS[UP_A_2];
dutyCycle[UP_A_3] = pS[UP_A_3];
dutyCycle[UP_A_4] = pS[UP_A_4];

while (Va_up_ref > ESTADO_ACTUAL_A_UP) {
    if (I_UP_A > 0) {
        pos = posVmin (BYPASS, Vcond_UP_A_1,
            Vcond_UP_A_2, Vcond_UP_A_3, Vcond_UP_A_4,
            pS[UP_A_1], pS[UP_A_2], pS[UP_A_3],
            pS[UP_A_4]);
    } else {
        pos = posVmax (BYPASS, Vcond_UP_A_1,
            Vcond_UP_A_2, Vcond_UP_A_3, Vcond_UP_A_4,
            pS[UP_A_1], pS[UP_A_2], pS[UP_A_3],
            pS[UP_A_4]);
    }
    ESTADO_ACTUAL_A_UP = ESTADO_ACTUAL_A_UP + 1;
    pos_vector = UP_A_1 + pos;
    dutyCycle[pos_vector] = porcentaje_A_UP;
    pS[pos_vector] = 1;
    porcentaje_A_UP = 1;
}
ESTADO_ACTUAL_A_UP = ESTADO_PREVIO;
while (Va_up_ref < ESTADO_ACTUAL_A_UP) {
    if (I_UP_A > 0) {
        pos = posVmax (INSERTED, Vcond_UP_A_1,
            Vcond_UP_A_2, Vcond_UP_A_3, Vcond_UP_A_4,
            pS[UP_A_1], pS[UP_A_2], pS[UP_A_3],
            pS[UP_A_4]);
    } else {
        pos = posVmin (INSERTED, Vcond_UP_A_1,
            Vcond_UP_A_2, Vcond_UP_A_3, Vcond_UP_A_4,
            pS[UP_A_1], pS[UP_A_2], pS[UP_A_3],
            pS[UP_A_4]);
    }
    ESTADO_ACTUAL_A_UP = ESTADO_ACTUAL_A_UP - 1;
    pos_vector = UP_A_1 + pos;
    dutyCycle[pos_vector] = porcentaje_A_UP;
    pS[pos_vector] = 0;
    porcentaje_A_UP = 0;
}
}
```

Ilustración 99 - Código de control de la fase A y rama superior en RTSim

3.3.3.1.4. PESTAÑA ASM

Conforme se ha indicado previamente, en esta pestaña se almacena el código ensamblador generado por el compilador a partir del código en lenguaje C implementado en el Core#1 de la FPGA.

A modo de comprobación de la compilación del lenguaje C, se adjunta en los Anexos el código completo correspondiente al ensamblador.

Allí se puede encontrar código como el que se muestra en la Ilustración 100. Para la primera instrucción, la asignación del valor de una variable a otra, se puede apreciar que el ensamblador únicamente requiere una instrucción. También cabe mencionar la utilización del símbolo '\$'. Este actúa de forma similar al #define, de tal forma que se pueda hacer referencia a un registro a través del nombre de la variable precedido del símbolo '\$'.

En cuanto a la segunda instrucción de la Ilustración 100, la cual realiza una comparación y en función del resultado devuelve un uno o un cero, se puede ver cómo realiza la resta haciendo referencia, de nuevo, a los registros en los que se encuentran a través del nombre y el símbolo '\$'. Destacar que la variable '\$k1' toma el valor de cero en el 'init', por eso se emplea en la resta. En este caso, no se almacena el resultado de la resta ni el del flag EQ, sino que se utiliza directamente para asignar a la variable '\$syncN' un uno si es cierta, o un cero en caso contrario. La aparición del 'nop' es debido a la segmentación del procesador, el cual necesita evaluar el flag una instrucción después de realizar la resta.

```
// #460: syncP = syncN;  
$syncP = $syncN  
// #461: syncN = (syncN == 0);  
r0 = $syncN - $k1  
nop * 1  
$syncN = EQ ? __ONE__ : __ZERO__
```

Ilustración 100 - Asignación de valor constante a una variable global en ensamblador

3.3.3.2. COMPONENTES ELÉCTRICOS

Para la simulación en tiempo real se han heredado los valores propuestos en el sistema desarrollado previamente en Matlab/Simulink del apartado 3.2.3.3 COMPONENTES ELÉCTRICOS.

3.3.4. RESULTADOS

A continuación, se muestran las gráficas temporales obtenidas en el simulador en tiempo real. Para obtener mayor exactitud se hace uso de una característica propia del simulador que permite hacer una captura de los datos.

Se comienza analizando las tensiones del sistema.

Tabla 13 - Valores de la tensión en diferentes colocaciones del Voltímetro para una frecuencia de 50 Hz obtenido en RTSim

COLOCACIÓN VOLTÍMETRO	TENSIÓN FASE 1 [V]	TENSIÓN FASE 2 [V]	TENSIÓN FASE 3 [V]
ANTES BOBINA RAMA SUPERIOR - NEUTRO	1165,88652	1165,21163	1163,95621
ANTES BOBINA RAMA INFERIOR - NEUTRO	1164,89567	1165,51095	1164,3254
SALIDA MMC - NEUTRO	1173,31432	1172,96885	1173,88995
CARGA - NEUTRO	1221,99011	1221,99384	1221,98361

En la Tabla 13 se puede ver la pequeña diferencia de tensiones que hay en las bobinas de rama, la cual provocaría un pequeño gradiente de corriente circulante.

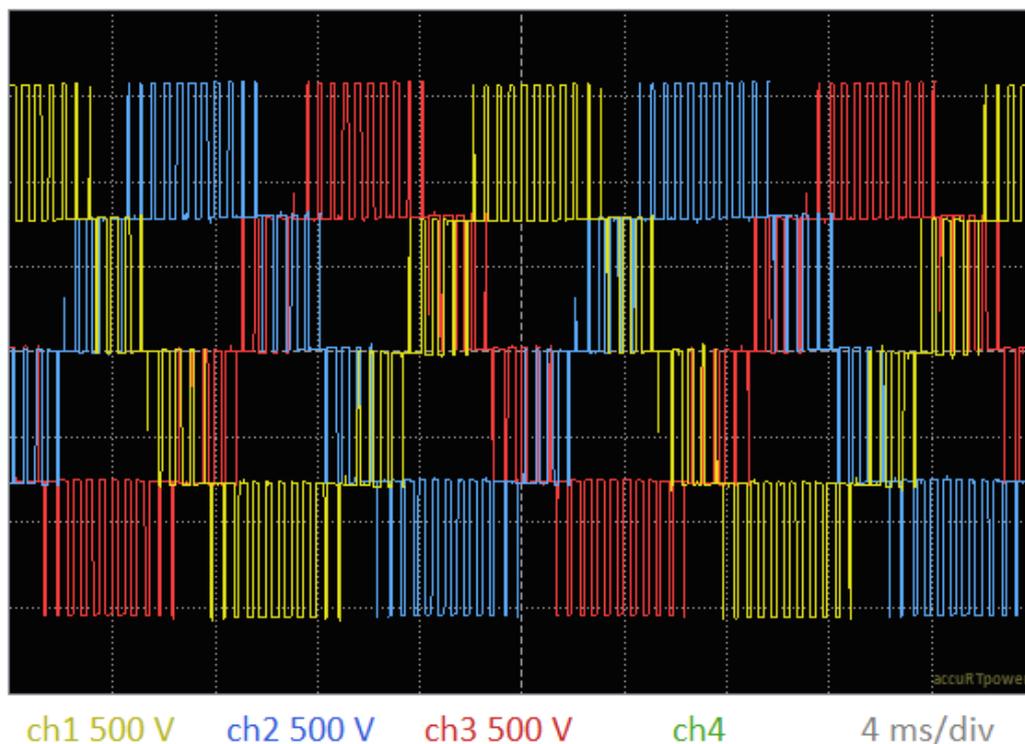


Ilustración 101- Tensión en la salida del MMC antes de la bobina de rama superior de las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim

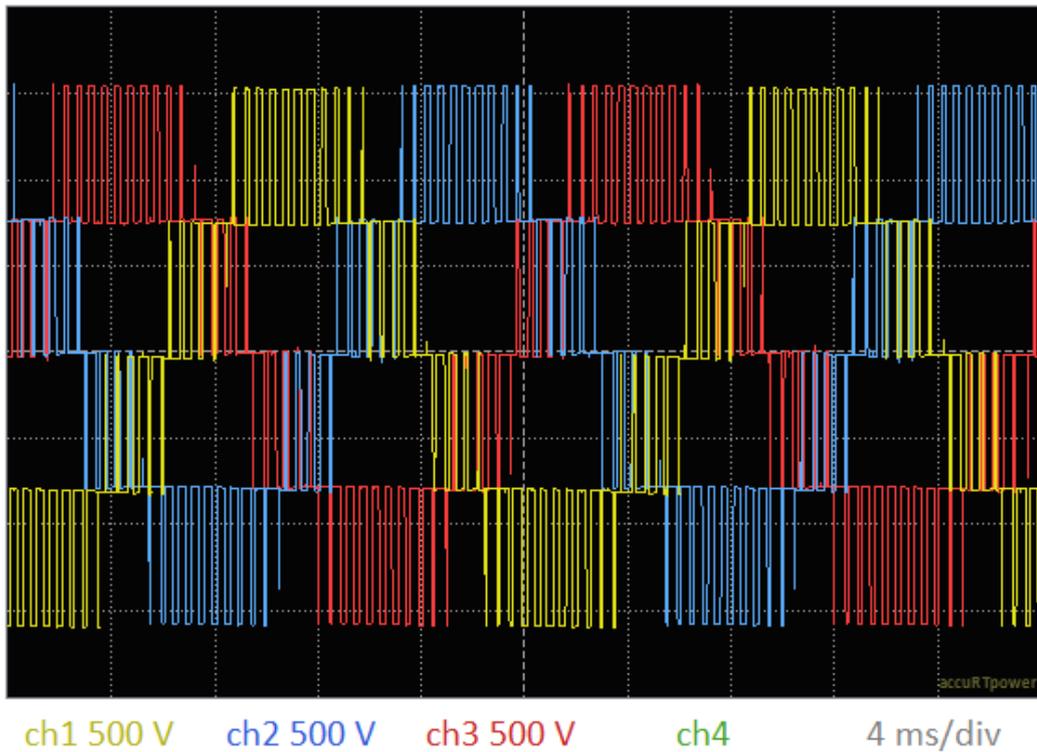


Ilustración 102 - Tensión en la salida del MMC antes de la bobina de rama inferior de las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim

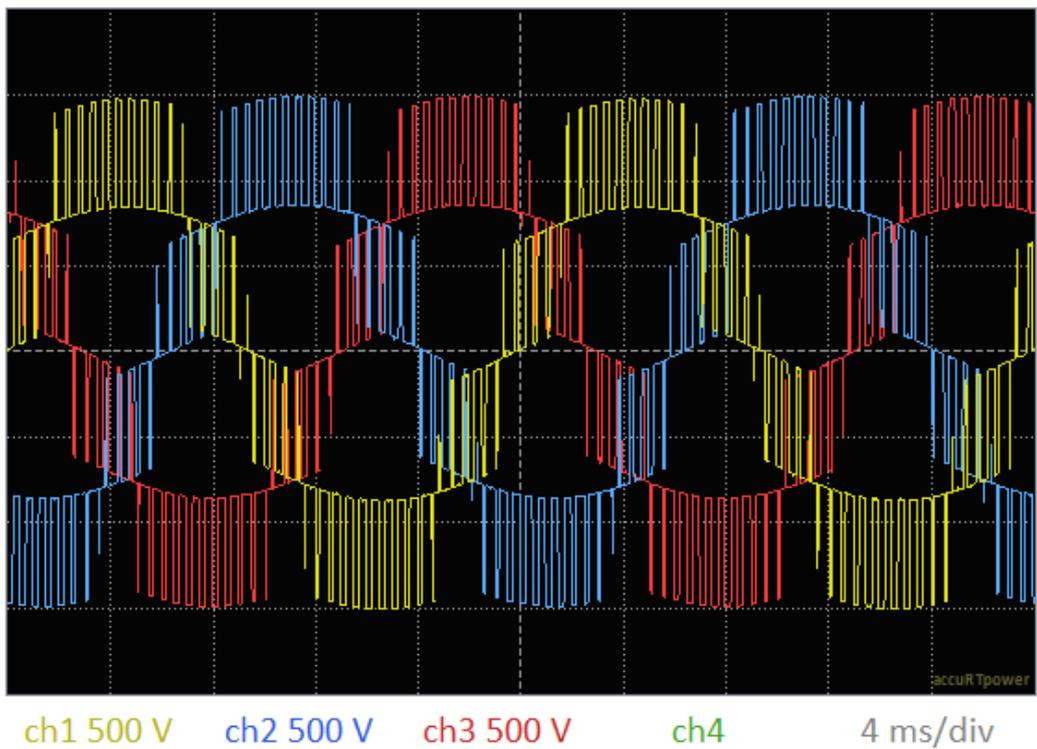


Ilustración 103 - Tensión en la salida del MMC de las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim

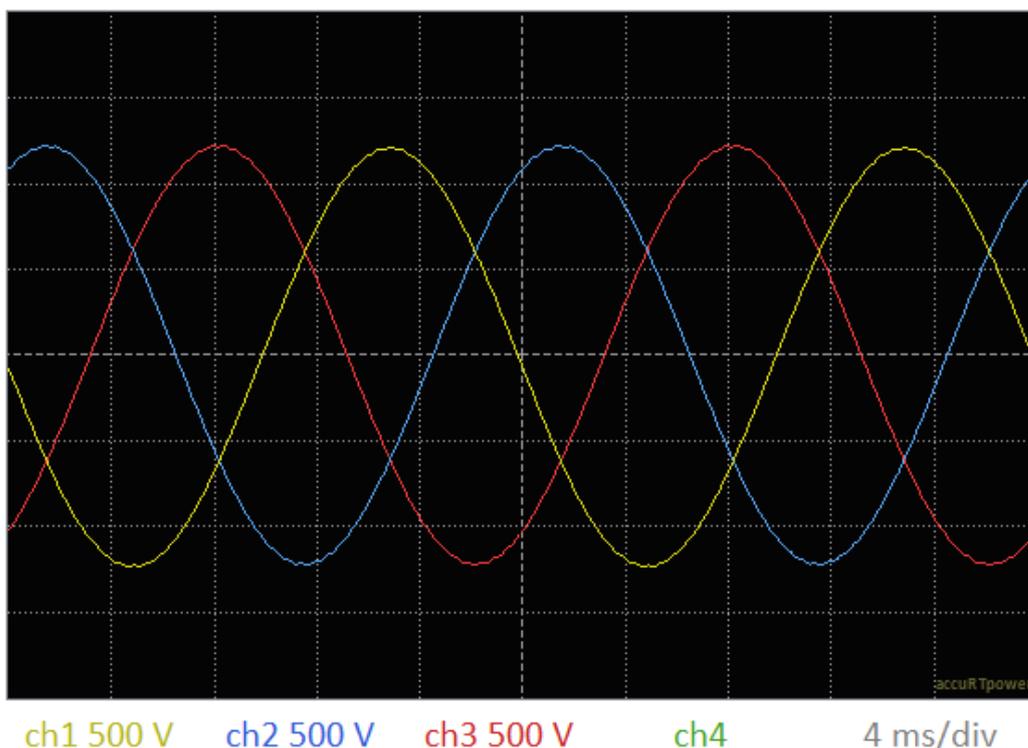


Ilustración 104 - Tensión en la carga de las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim

Como se puede observar, la tensión a la salida del convertidor [Ilustración 103] y antes de las bobinas de rama [Ilustración 101 e Ilustración 102] presenta la forma escalonada esperada debido a las señales de disparo, generando como tensión a la salida del convertidor MMC la señal mostrada en la Ilustración 103.

Finalmente, la tensión que recibe la carga presenta la forma de onda limpia y esperada como se puede ver en la Ilustración 104, obteniendo un valor próximo al deseado, el cual se observa en la Tabla 13.

En cuanto a las corrientes, los valores obtenidos son los que se exponen en la Tabla 14.

Tabla 14 - Valores de la corriente en diferentes colocaciones del Amperímetro para una frecuencia de 50 Hz obtenido en RTSim

COLOCACIÓN AMPERÍMETRO	CORRIENTE FASE 1 [A]	CORRIENTE FASE 2 [A]	CORRIENTE FASE 3 [A]
RAMA SUPERIOR	58,5973998	59,2003226	59,2019712
RAMA INFERIOR	59,7507687	59,1141901	59,106085
BOBINAS DE SALIDA	118,31449	118,314219	118,314472

CONDENSADORES DE SALIDA	71,7892057	71,7892153	71,7886511
CARGA DE SALIDA	93,9978331	93,99787	93,997491

De forma teórica, la corriente que circula por la carga en la salida tomaría el valor de 94 A calculado con la Ecuación 30, valor prácticamente exacto al proporcionado en la Tabla 14.

Ecuación 30 - Cálculo de la corriente de salida de cada fase

$$P_o = 3 \cdot \frac{V_o}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_o}{\sqrt{2}} \rightarrow I_o = \frac{2 \cdot P_o}{3 \cdot V_o} = \frac{2 \cdot 168960}{3 \cdot 1200} = 94 \text{ A}$$

También se puede apreciar la diferencia de la forma de onda de la corriente tras circular por el filtro colocado. Se ve claramente el rizado que presenta la corriente que circula por las bobinas y condensadores de salida [Ilustración 107 e Ilustración 108], a diferencia de la corriente que circula por la carga, la cual presenta una forma de onda casi perfecta [Ilustración 109]. El análisis del rizado de la corriente se verá más en profundidad en el apartado 3.3.6 RIZADO DE LA CORRIENTE.

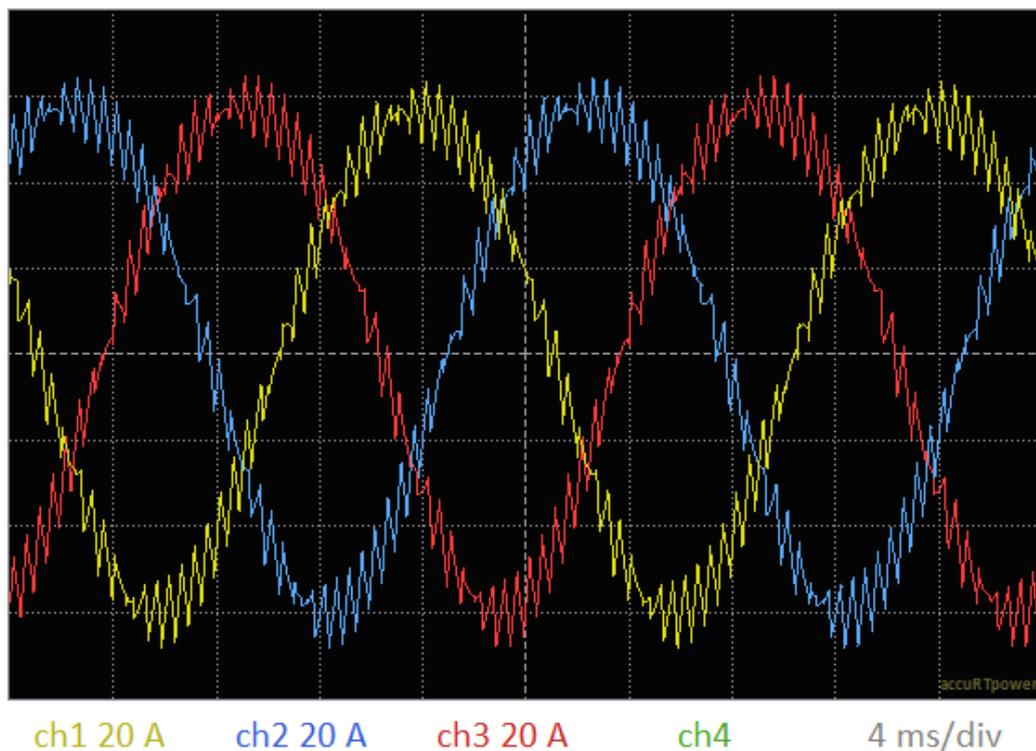


Ilustración 105 - Corrientes que circulan por las ramas superiores (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim

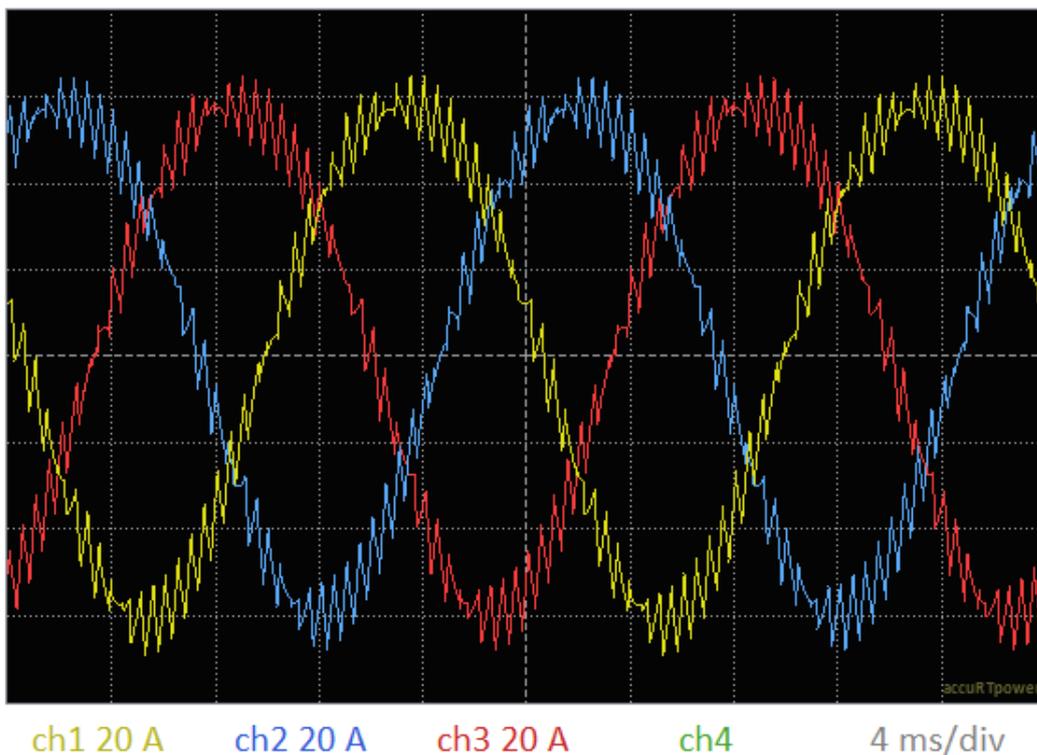


Ilustración 106 - Corrientes que circulan por las ramas inferiores (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim

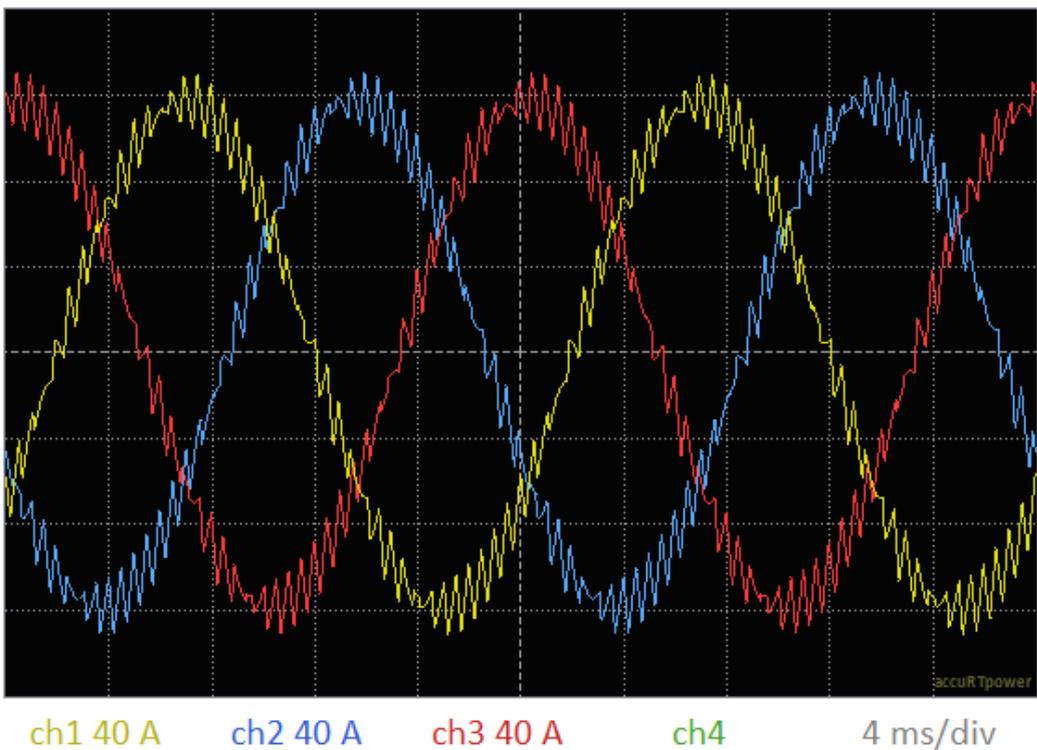


Ilustración 107 - Corriente que circula por las bobinas de salida del MMC en las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim

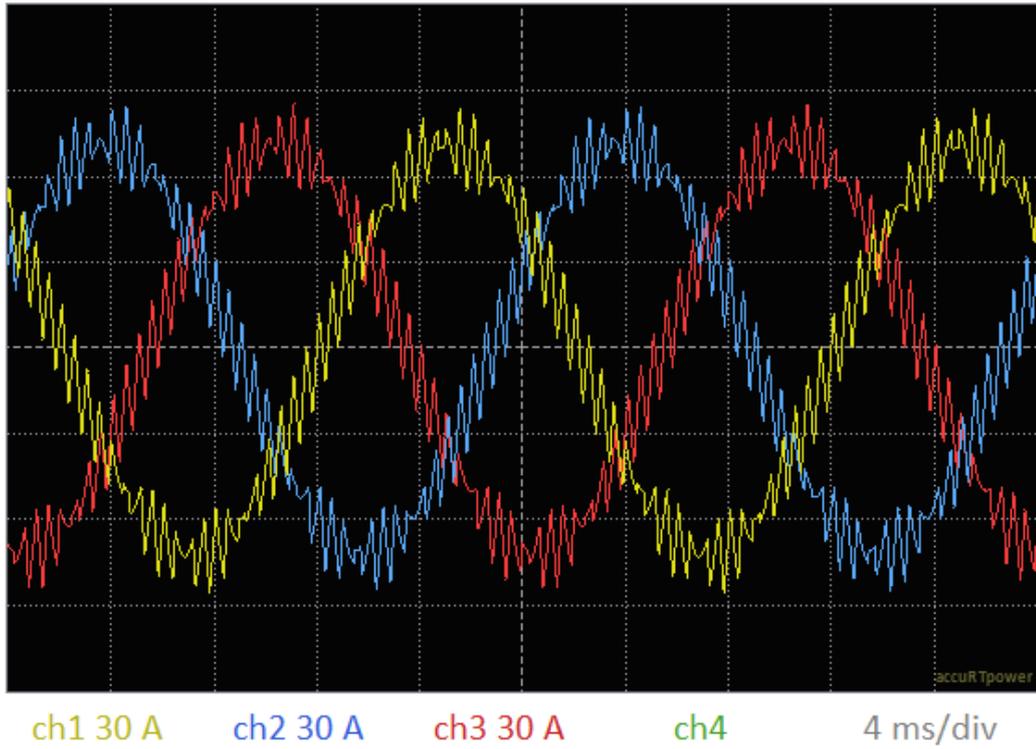


Ilustración 108 - Corriente que circula por los condensadores de salida en las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim

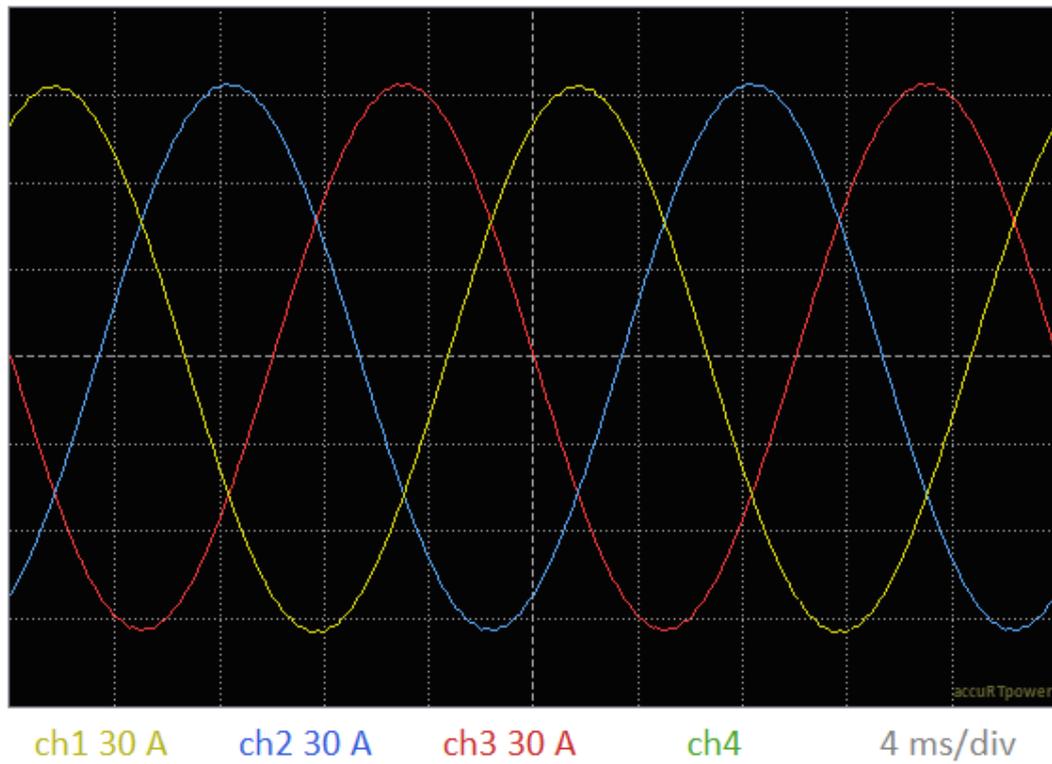


Ilustración 109 - Corriente que circula por la carga de salida en las 3 fases (amarillo: fase 1, azul: fase 2, rojo: fase 3) en RTSim

También se puede ver la diferencia de valores entre la corriente que circula por las bobinas de salida en la Ilustración 107 y la que circula por la carga en la Ilustración 109. Esto es debido a que cierta parte de la corriente que circula por las fases a la salida de las bobinas de salida y antes de los condensadores de salida, va por dichos condensadores como se puede ver en la Ilustración 108, mientras que la otra parte se dirige hacia la carga.

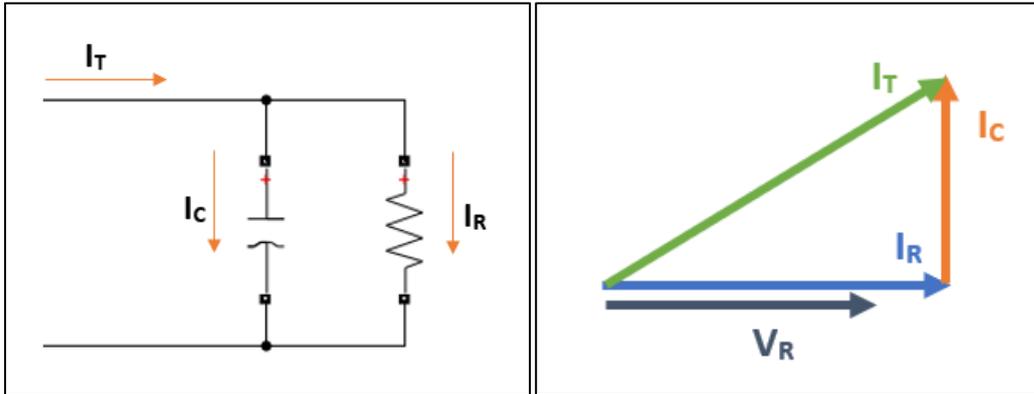


Ilustración 110 - Izquierda: circuito RC en paralelo; derecha: triángulo de intensidades en un circuito RC en paralelo

La explicación es que se trata de un circuito RC en paralelo como la parte izquierda de la Ilustración 110, donde la intensidad del condensador está adelantada 90° respecto de la tensión [imagen derecha de Ilustración 110], cumpliéndose la expresión de la Ecuación 31, en la que se han usado los valores de la Tabla 14, y se ha obtenido una corriente total, que en este caso se corresponde con la corriente que circula por la bobina de salida, prácticamente del mismo valor que la obtenida en el simulador en tiempo real.

Ecuación 31 - Corriente que circula por la bobina de salida en RTSim

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{93.99^2 + 71.79^2} = 118.27 \text{ A}$$

Finalmente, observando la corriente de continua que están aportando las baterías en la Ilustración 111, se puede observar que esta toma un valor medio de 7.69528 A, con lo cual, la corriente circulante alcanzará valores de 2.6 A en cada fase aproximadamente, de acuerdo con el estudio realizado en el apartado 3.2.5; aunque en la simulación en tiempo real está alcanzando valores ligeramente mayores.

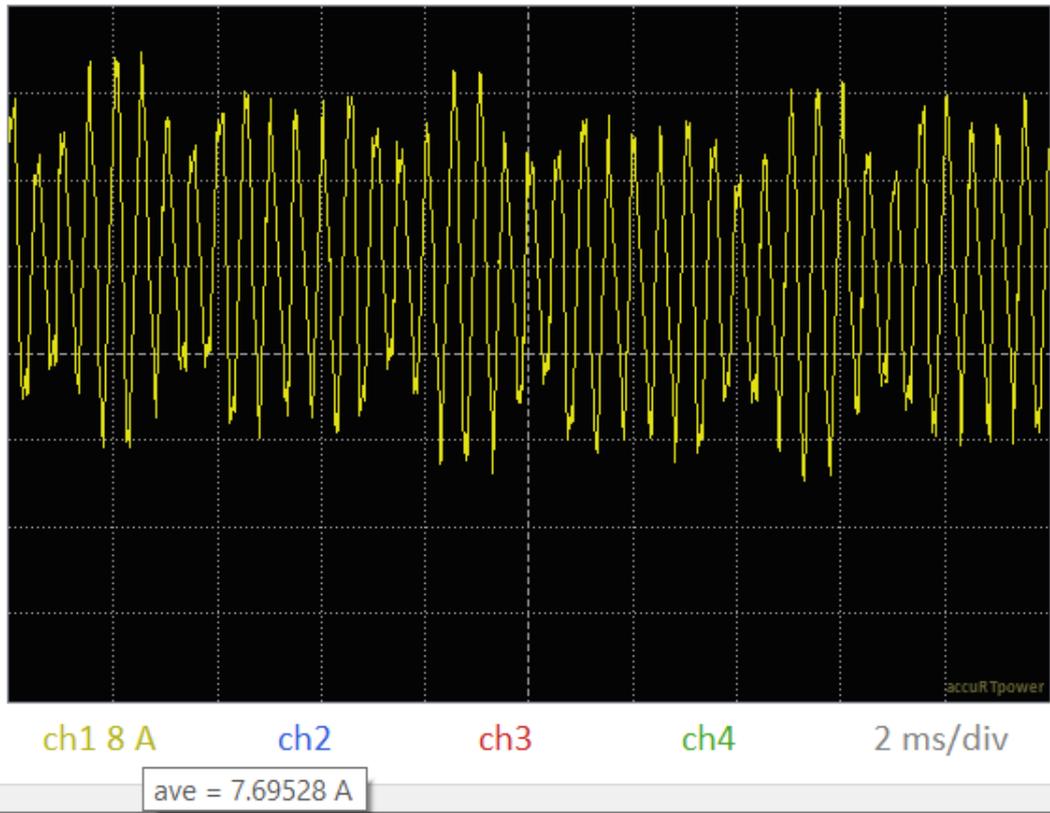


Ilustración 111 - Corriente que circula por las baterías del lado de continua [A]

3.3.5. DISTORSIÓN ARMÓNICA

Como se introdujo anteriormente, otra forma de medir la calidad de los resultados es mediante la distorsión armónica.

Para ello, el simulador en tiempo real contiene una propiedad, previamente citada, que permite exportar a un .csv los datos que están leyendo los Scopes. En concreto, muestra un análisis de los datos, es decir, la media y el THD en porcentaje; los armónicos y las formas de onda.

Los resultados obtenidos para la tensión de la carga se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15 – Valores de la tensión de salida obtenidos en la simulación en RTSim

VALOR	TENSIÓN DE SALIDA DE LA FASE 1 [V]	TENSIÓN DE SALIDA DE LA FASE 2 [V]	TENSIÓN DE SALIDA DE LA FASE 3 [V]
MEDIA	-0,71174921	0,06153473	0,05307603
THD (%)	0,36	0,35	0,35



Como se puede observar en dicha tabla, ninguna de las tensiones de salida presenta una distorsión armónica superior al 0,4 %, valor suficientemente alejado del máximo permitido (3%). Además, las medias de los valores de la tensión de salida de cada fase son próximos a cero, lo cual otorga una idea de lo simétricas que son las formas de onda respecto de la horizontal.

En cuanto a los valores de los armónicos que se muestran en la Tabla 16, se realiza una representación gráfica de los mismos obteniéndose la Ilustración 112. Esta permite observar que no hay ningún armónico bajo, es decir, ninguno que quede por encima de los - 40 dB. Además, la frecuencia de resonancia está acodada en 200 Hz como se ha podido ver en la Ecuación 18, lo que significa que el filtro comienza a actuar a frecuencias mayores de esta.

Por otra parte, en la Ilustración 112 se puede ver un armónico en 2000 Hz ya que el sistema está conmutando a esta frecuencia, además de ecos en frecuencias múltiplos de esta (doble, triple, etc.).

Tabla 16 - Armónicos entre 0 Hz y 12000 Hz de los datos obtenidos en la tensión de la carga en RTSim

FREQ [HZ]	PROMEDIO SCOPE [DB]	FREQ [HZ]	PROMEDIO SCOPE [DB]	FREQ [HZ]	PROMEDIO SCOPE [DB]
0	-72,9403869	2100	-69,8269071	4200	-128,31987
50	0	2150	-116,890551	4250	-83,3359684
100	-78,3340922	2200	-68,4320661	4300	-117,722263
150	-61,4045737	2250	-113,714189	4350	-77,5583889
200	-64,2051581	2300	-77,7103143	4400	-120,080145
250	-69,7428354	2350	-112,718278	4450	-79,6481757
300	-68,7486807	2400	-66,9009473	4500	-125,653163
350	-67,763418	2450	-122,442882	4550	-88,7134648
400	-82,9079153	2500	-73,1708358	4600	-115,968037
450	-69,4243927	2550	-124,103471	4650	-99,4162722
500	-87,7461367	2600	-98,3004697	4700	-106,699792
550	-80,8642905	2650	-109,105438	4750	-109,178749
600	-80,7916828	2700	-133,120134	4800	-110,2947
650	-108,148804	2750	-107,617476	4850	-100,670624
700	-74,3524303	2800	-87,6759449	4900	-123,275759
750	-93,7824224	2850	-117,846699	4950	-105,423323
800	-79,9337503	2900	-89,180476	5000	-109,335123
850	-88,2424796	2950	-126,141492	5050	-121,446964
900	-89,8559954	3000	-105,551872	5100	-96,0830063
950	-94,4858999	3050	-104,155576	5150	-121,163481
1000	-88,261806	3100	-111,76062	5200	-95,160052
1050	-120,752984	3150	-99,1082269	5250	-111,650299
1100	-73,0729073	3200	-103,891968	5300	-109,192695
1150	-110,511692	3250	-104,01274	5350	-114,173604
1200	-73,71142	3300	-101,42248	5400	-93,3014695
1250	-100,667817	3350	-104,648974	5450	-129,757578
1300	-98,4640264	3400	-111,341471	5500	-93,0850067
1350	-102,845766	3450	-85,9226743	5550	-131,447316
1400	-105,445465	3500	-121,734675	5600	-86,6509702
1450	-117,495864	3550	-76,2493144	5650	-124,378716
1500	-66,9612205	3600	-124,374199	5700	-90,5694026
1550	-123,913125	3650	-75,4220946	5750	-119,372148
1600	-62,0714698	3700	-116,274759	5800	-86,1193166
1650	-109,254634	3750	-81,6849097	5850	-125,100667
1700	-74,6007461	3800	-118,792358	5900	-88,516398
1750	-110,245422	3850	-86,9482505	5950	-128,575301
1800	-66,1743917	3900	-133,899564	6000	-111,714939
1850	-115,938729	3950	-84,3812981	6050	-127,375596
1900	-68,7026919	4000	-131,508937	6100	-89,6115545
1950	-119,875908	4050	-78,5502451	6150	-126,223672
2000	-50,6777804	4100	-126,896383	6200	-88,3466568
2050	-123,096493	4150	-87,760872	6250	-120,449193



6300	-92,6662796	8400	-131,95041	10500	-120,405512
6350	-123,490809	8450	-96,4438613	10550	-116,381705
6400	-95,2221529	8500	-133,148002	10600	-109,690665
6450	-135,758741	8550	-104,991877	10650	-108,871287
6500	-106,951167	8600	-121,677964	10700	-110,496643
6550	-127,904895	8650	-103,210823	10750	-107,796615
6600	-94,5462734	8700	-113,723587	10800	-123,723134
6650	-115,026887	8750	-101,538106	10850	-128,198967
6700	-115,177678	8800	-118,421281	10900	-132,665566
6750	-112,268091	8850	-98,7430594	10950	-107,901297
6800	-93,7006788	8900	-111,693415	11000	-107,51832
6850	-116,062227	8950	-101,936515	11050	-110,907733
6900	-94,5398473	9000	-104,302447	11100	-112,969883
6950	-110,644702	9050	-106,828631	11150	-123,941572
7000	-104,006132	9100	-102,584108	11200	-110,269002
7050	-99,4336958	9150	-125,636933	11250	-114,779717
7100	-119,299044	9200	-101,865565	11300	-106,438289
7150	-94,7272994	9250	-112,92566	11350	-118,140396
7200	-113,209813	9300	-113,271238	11400	-110,77183
7250	-99,6403689	9350	-112,889132	11450	-110,859791
7300	-112,06566	9400	-102,904665	11500	-119,039244
7350	-99,2353978	9450	-121,421394	11550	-108,180641
7400	-119,775925	9500	-110,11792	11600	-123,776466
7450	-99,8611017	9550	-132,4162	11650	-123,937093
7500	-135,17056	9600	-100,9093	11700	-128,539907
7550	-103,405685	9650	-122,603777	11750	-117,036863
7600	-133,24831	9700	-104,568364	11800	-130,614197
7650	-98,9285576	9750	-121,452453	11850	-116,158044
7700	-125,096841	9800	-109,12539	11900	-142,654289
7750	-135,612236	9850	-128,135863	11950	-123,177346
7800	-139,292481	9900	-110,957614	12000	-138,272761
7850	-103,375661	9950	-132,864759		
7900	-135,092072	10000	-103,167818		
7950	-98,2046594	10050	-132,632295		
8000	-133,685535	10100	-111,58758		
8050	-108,368687	10150	-126,637329		
8100	-135,24585	10200	-110,703846		
8150	-105,334744	10250	-122,41217		
8200	-133,408369	10300	-106,583564		
8250	-110,73547	10350	-121,610798		
8300	-128,726204	10400	-103,320085		
8350	-114,6105	10450	-126,334083		

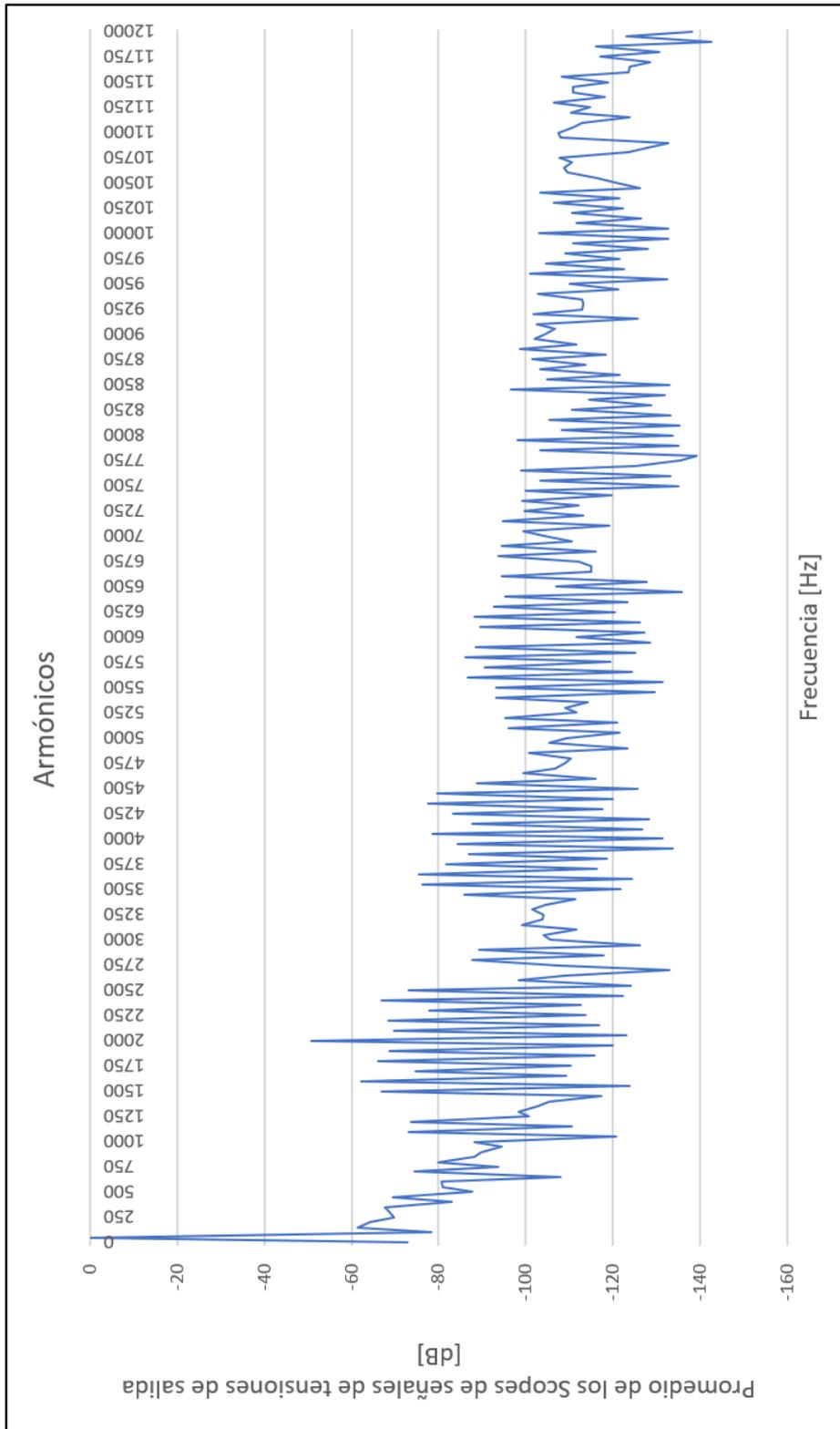


Ilustración 112 - Armónicos entre 0 Hz y 12000 Hz de los datos obtenidos en la tensión de la carga en la simulación en tiempo real

3.3.6. RIZADO DE LA CORRIENTE

Haciendo uso del informe de datos capturados que permite exportar la FPGA, también se puede estudiar el rizado de la corriente de salida [Tabla 14] y realizar una estimación para una determinada situación.

Como se sabe, la holgura de la corriente se puede controlar variando la inductancia de la bobina y la frecuencia de conmutación. En este trabajo se ha decidido fijar la frecuencia de conmutación y variar la inductancia de la bobina hasta encontrar un valor adecuado.

Por ello, estudiar el rizado de la corriente de salida es una forma de comprobar que los valores de inductancias elegidos [3.2.3.3 COMPONENTES ELÉCTRICOS] son adecuados.

Para ello, se va a suponer que el rizado de la corriente presenta la forma de la Ilustración 113, y que durante Δt_1 la tensión del convertidor toma un valor de 1600 V, mientras que durante Δt_2 es de 800 V [Ilustración 101], siendo la tensión a la salida de 1200 V.

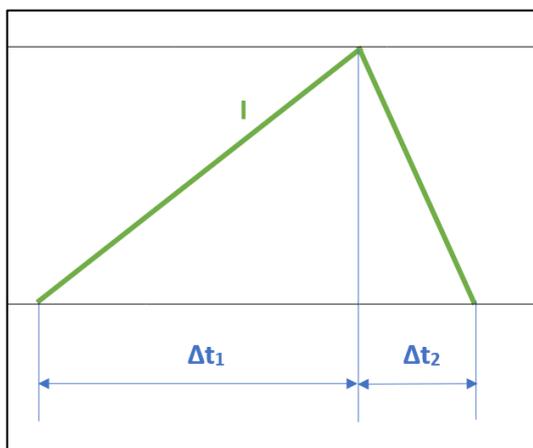


Ilustración 113 - Esquema del rizado de la corriente

Se desconoce el valor de Δt_1 y Δt_2 , pero se sabe que su suma se corresponde con el periodo de conmutación, por lo que se plantea el conjunto de la Ecuación 32.

Ecuación 32 - Cálculo del rizado de la corriente

$$V_{conv} - V_o = L_{eq} \cdot \frac{dI_{fase}}{dt}$$

$$1600 V - 1200 V = + 400 V = L_{eq} \cdot \frac{\Delta I_{fase}}{\Delta t_1}$$

$$800 V - 1200 V = - 400 V = L_{eq} \cdot \frac{-\Delta I_{fase}}{\Delta t_2}$$

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 = T_{sw} = \frac{1}{f_{sw}}$$

$$\Delta I_{fase} = \frac{(V_{conv} - V_o) \cdot T_{sw}}{2 \cdot L_{eq}} = \frac{400 \text{ V} \cdot 500 \mu\text{s}}{2 \cdot 3.4 \text{ mH}} = 29.4 \text{ A}$$

Se obtiene que la corriente de cada fase tendrá alrededor de 30 A absolutos de cresta, o lo que es lo mismo, ± 15 A cresta. Este valor que se corresponde con un 12.4% de la corriente de salida, que se puede apreciar en la Ilustración 107, al igual que tras pasar el filtro colocado, la corriente resultante presenta una gran reducción del rizado como se muestra en la Ilustración 109.

3.3.7. POTENCIA ACTIVA, REACTIVA Y APARANTE

A modo de análisis de la consistencia del modelo, se ha realizado un pequeño y aproximado estudio de las potencias en la salida del sistema [Ilustración 114].

En primer lugar, se comprueba la solidez del valor de la resistencia que se ha colocado, tomando como tensión y corriente de salida 1221,99 (V) y 93.99 (A) respectivamente. Estos valores, que se encuentran en la Tabla 13 y Tabla 14, se adquieren del informe de datos capturados que proporciona la herramienta de simulación en tiempo real.

Ecuación 33 - Comprobación valor de la resistencia de salida con los valores observados en RTSim

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1222 \text{ (V)}}{94 \text{ (A)}} = 13 \Omega$$

Como se aprecia, la resistencia calculada [Ecuación 33] toma un valor muy aproximado al empleado de 12.78 Ω , con lo cual se puede afirmar que los valores obtenidos de las gráficas son sólidos.

A continuación, se calcula en la Ecuación 34 la potencia activa obtenida en la carga resistiva en función de la tensión y la corriente medidas.

Ecuación 34 - Cálculo de la potencia activa con los valores observados en RTSim

$$\begin{aligned} P &= 3 \cdot V_{ef} \cdot I_{ef} = 3 \cdot \frac{V_{cresta}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cresta}}{\sqrt{2}} = \frac{3}{2} \cdot 1222.0 \text{ (V)} \cdot 94.0 \text{ (A)} \\ &= 172.30 \text{ kW} \end{aligned}$$

Por otra parte, se evalúa la potencia aparente de los condensadores tal y como se muestra en Ecuación 35 siendo V_{fn} la tensión entre la fase y el neutro.



Ecuación 35 - Cálculo de la potencia reactiva con los valores observados en RTSim

$$Q = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot V_{fn}^2 = 3 \cdot 314.16 \left(\frac{rad}{s}\right) \cdot 187 \cdot 10^{-6}(F) \cdot \left(\frac{1222.0}{\sqrt{2}}\right)^2$$

$$= 131.59 \text{ kVar}$$

Entonces, a partir de estos dos valores de potencia activa y reactiva se procede a calcular la potencia aparente que se está entregando a la carga [Ecuación 36].

Ecuación 36 - Cálculo de la potencia aparente con los valores de potencia activa y reactiva calculados previamente

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{172302^2 + 131591^2} = 216.80 \text{ kVA}$$

Finalmente, para concluir la comprobación, se realiza el cálculo de la potencia aparente a partir de la tensión y corriente total de salida en la Ecuación 37 tomando el valor de la corriente que circula por la bobina de salida de la Tabla 14.

Ecuación 37 - Cálculo de la potencia aparente con los valores observados en RTSim

$$S = 3 \cdot V_{ef} \cdot I_{ef} = 3 \cdot \frac{V_{cresta}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cresta}}{\sqrt{2}} = \frac{3}{2} \cdot 1222.0 (V) \cdot 118.3(A)$$

$$= 216.84 \text{ kVA}$$

Y se puede verificar que efectivamente los datos son consistentes.

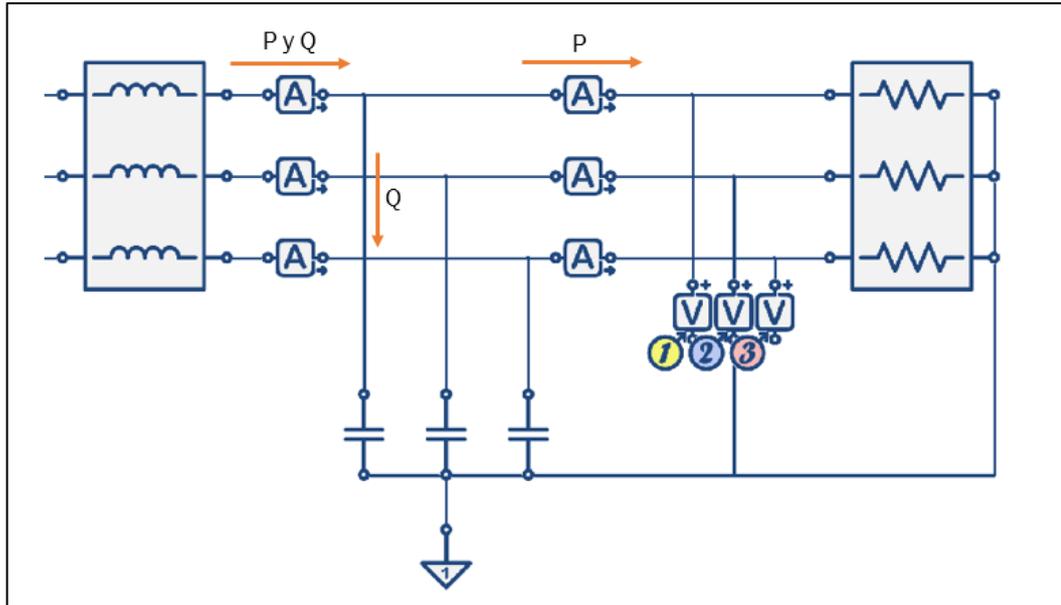


Ilustración 114 - Filtro y carga en RTSim con la distribución de potencias



CAPÍTULO IV – CONCLUSIONES

Grado de implementación de los objetivos propuestos, así como posibles líneas futuras de trabajo, mejoras o ampliaciones.





4.1. IMPLEMENTACIÓN OBJETIVOS PROPUESTOS

Tras finalizar el CAPÍTULO III – DESARROLLO, se puede contemplar el desempeño de los objetivos planteados en el apartado 1.2. OBJETIVOS. No obstante, se expone un balance global de la consecución de los mismos.

En primer lugar, se ha simulado en tiempo real el convertidor MMC alimentado con paneles fotovoltaicos distribuidos entre sus celdas o módulos de conmutación, empleando un periodo de muestreo de 4 microsegundos para la planta y 250 microsegundos para el controlador. Se han tenido en cuenta las limitaciones del controlador y se ha verificado el comportamiento estable del sistema en función del análisis temporal y frecuencial.

Para conseguir este primer objetivo, el más importante, se han realizado un conjunto de simulaciones empleando Matlab/Simulink, una herramienta que ha proporcionado una mejor visualización de la evolución de las señales para así corregir los errores de diseño. Esta parte ha servido principalmente para facilitar en la medida de lo posible la simulación en tiempo real.

Finalmente, se ha desarrollado, después de un estudio acerca de todas las posibilidades, una aproximación polinómica que represente el comportamiento de los paneles fotovoltaicos empleados en el trabajo. También se ha logrado introducir en los entornos de simulación y verificar su comportamiento correctamente.

4.2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO, MEJORAS O AMPLIACIONES

Una de las principales aspiraciones de este Trabajo Fin de Grado es su posterior utilización como base de futuros trabajos que desarrollen mejoras y ampliaciones a partir de lo que se ha logrado en el presente.

Cabe destacar que la solución propuesta para el funcionamiento estable del sistema no es única. Existen diversas formas de implementar el código, algunas mencionadas a lo largo del trabajo; pero se ha procurado tomar el camino que más facilite la comprensión del trabajo para posibles reutilizaciones del código.

A continuación, se procede a plantear alguna de las posibles líneas de futuro que se pueden seguir a partir de los resultados obtenidos en este trabajo.

Es posible que se pueda encontrar una utilidad más realista para esta aplicación si en lugar de conectar una carga resistiva en la salida, se conectara a la red, puesto que como se ha expuesto, una de las principales motivaciones de esta investigación ha sido el crecimiento que están experimentando las energías solares fotovoltaicas en el marco nacional.



También, posibles mejoras a este desarrollo pueden ser la introducción de un regulador de la tensión de continua para ajustar la tensión, y por consiguiente la potencia, que se entregaría a la red, retirando las baterías que existen en la zona de continua que actualmente están corrigiendo los desajustes entre la demanda de la carga y la aportación de los generadores fotovoltaicos.

En cuanto al método planteado para seleccionar la celda más conveniente, se pueden probar numerosos algoritmos para evitar la divergencia de los condensadores de las celdas fotovoltaicas. Uno de ellos se ha expuesto durante el desarrollo de esta memoria, aunque se ha descartado dada la alta carga computacional que presenta, así como la realización de conmutaciones innecesarias. Sin embargo, otra posibilidad puede ser realizar el equilibrado de los condensadores siguiendo referencias variables, ajustadas al punto de máxima potencia de cada panel, en vez de seguir una referencia fija como se ha hecho, por simplicidad, en este trabajo.

Finalmente, se propone la implementación de un regulador para equilibrar la energía entre ramas, ya que la potencia de alterna entregada a la red debe ser equilibrada en las tres fases.



CAPÍTULO V – BIBLIOGRAFÍA

Presentación de la bibliografía de consulta empleada en este trabajo con la finalidad de obtener información para el desarrollo de la memoria.



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



A continuación, se enumera la bibliografía de consulta tanto de páginas webs, artículos como libros utilizados para el apoyo teórico de este Trabajo Fin de Grado.

El método de ordenación elegido sigue el criterio del orden de aparición de las consultas en la memoria.

- [1] “Growth of photovoltaics”. Disponible:
https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics#Worldwide
[Último acceso: 2021 abril 03]
- [2] ENERGÍAS RENOVABLES. El periodismo de las energías limpias, “El 90% de la energía solar fotovoltaica instalada en la UE en 2019 tuvo como escenario España.”. Disponible: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/espana-acaparo-en-2019-el-90-de-20201109#:~:text=Dentro%20de%20ese%20creciente%20mercado,europeos%20en%20n%C3%BAmero%20de%20instalaciones> [Último acceso: 2021 abril 03]
- [3] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA. “Generación”. Disponible:
<https://www.ree.es/es/datos/generacion/estructura-generacion>
[Último acceso: 2021 marzo 20]
- [4] ENERGÉTICA, Noticias, Solar. “España lideró el crecimiento del sector fotovoltaico europeo en 2019”. Disponible:
<https://energetica21.com/noticia/espana-lidero-el-crecimiento-del-sector-fotovoltaico-europeo-en-2019-> [Último acceso: 2021 marzo 20]
- [5] UNIÓN SINDICAL OBRERA. “El ‘Green Deal’ o Pacto Verde Europeo: qué es y cuáles son sus objetivos”. Disponible:
<https://www.uso.es/green-deal-o-pacto-verde-europeo-que-es-y-objetivos/> [Último acceso: 2021 marzo 20]
- [6] Comisión Europea, Web oficial de la UE. “Un Pacto Verde Europeo”. Disponible: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es [Último acceso: 2021 marzo 20]
- [7] “Panel solar”. Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Panel_solar
[Último acceso: 2021 marzo 28]

- [8] AutoSolar “¿Qué es un panel solar?”. Disponible:
<https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-panel-solar>
[Último acceso: 2021 febrero 21]
- [9] “Panel fotovoltaico”. Disponible:
https://es.wikipedia.org/wiki/Panel_fotovoltaico#La_uni%C3%B3n_p-n
[Último acceso: 2021 febrero 21]
- [10] Amazon, Generadores y Energía Portátil, Energía Solar y Eólica, Paneles Solares. Disponible: <https://www.amazon.com/-/es/c%3%A9lulas-solares-monocristalinas-VIKOCELL-4-921/dp/B06X94ZNP6> [Último acceso: 2021 marzo 30]
- [11] PNGWING. Disponible: <https://www.pngwing.com/es/free-png-pppux>
[Último acceso: 2021 marzo 30]
- [12] ATENA. “Paneles fotovoltaicos compartidos en las comunidades de propietarios”. Disponible:
<http://www.administracionatena.com/paneles-fotovoltaicos-compartidos-las-comunidades-propietarios/> [Último acceso: 2021 marzo 30]
- [13] “La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica”. Arencibia-Carballo, G. (2016). REDVET.
- [14] Carlos Macho Antolín. El rincón de la ciencia. “Fundamentos físicos de las células solares”. Disponible:
<http://rincondelaciencia.educa.madrid.org/Curiosid/Rc-47/celulasSolares.html> [Último acceso: 2021 febrero 23]
- [15] Infolibros. “+15 Libros de Energía Solar Gratis [PDF]”. Disponible:
<https://infolibros.org/libros-de-energia-solar-gratis-pdf/> [Último acceso: 2021 febrero 23]
- [16] SUNFIELDS EUROPE. “Tipos de células fotovoltaicas y su estructura”. Disponible: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/celula-fotovoltaica-tipos-y-estructura/> [Último acceso: 2021 febrero 23]
- [17] ENERGÍA SOLAR. Paneles de energía solar fotovoltaica. “Panel fotovoltaico”. Disponible: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico> [Último acceso: 2021 febrero 21]



- [18] Instalaciones y eficiencia energética.com. “Paneles solares fotovoltaicos. ¿Cuál elegimos?”. Disponible: <https://instalacionesyeficienciaenergetica.com/paneles-solares-fotovoltaicos/> [Último acceso: 2021 febrero 06]
- [19] “Sistema fotovoltaico con interconexión a la red de distribución para aplicarlo al instituto de desarrollo empresarial administrativo”. Tesis. Vargas Velasco Fernando Daniel. Asesores: Bruno Gavito González y José Antonio Urbano Castelán. Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional de México. México, 17 de junio 2015.
- [20] TRITEC INTERVENTO. “Comportamiento eléctrico de un panel fotovoltaico”. Disponible: <https://tritec-intervento.cl/comportamiento-electrico-de-un-panel-fotovoltaico/> [Último acceso: 2021 enero 22]
- [21] BLOG TECNOSOL. “Características eléctricas de los paneles solares”. Disponible: <https://tecnosolab.com/noticias/caracteristicas-electricas-de-los-paneles-solares/> [Último acceso: 2021 enero 22]
- [22] “Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio.” Tesis. Norma Rosario Flores Rivera y Miguel Ángel Domínguez Ramírez. Director de tesis: Dr. Rafael Ramírez Bon. Centro de investigación en materiales avanzados, S.C. Posgrado
- [23] Alibaba.com, Casa, Todas las industrias, Equipo y suministros eléctricos, Productos de energía solar, Energía Solar. Disponible: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/10kw-dual-axis-solar-tracker-solar-panels-tracking-system-50040550191.html> [Último acceso: 2021 enero 22]
- [24] Sotysolar. “Seguidores solares: todo lo que necesitas saber”. Disponible: <https://sotysolar.es/placas-solares/seguidores-solares> [Último acceso: 2021 enero 22]
- [25] “Evaluación de sistemas fotovoltaicos con hidroseguidores” Tesis. Pablo Efraín Buen Guartazaca. Director: Dr. Manuel García Rente. Facultad de Ingeniería. Escuela eléctrica. Universidad de Cuenca, Ecuador. 2014

- [26] Acciona. “Energía solar fotovoltaica”. Disponible:
<https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/>
[Último acceso: 2021 marzo 20]
- [27] “Análisis, diseño y control de convertidores multinivel” Trabajo Fin de Grado. Eduardo Burguete Archel. Tutor: Jesús López Taberna. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad Pública de Navarra. Pamplona, mayo 2016.
- [28] Convertidores CC/CA para la conexión directa a la red de sistemas fotovoltaicos. “Anexo B. Convertidores CC/CA Multinivel”. Disponible:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2696/36106-3.pdf?sequence=3&isAllowed> [Último acceso: 2021 marzo 20]
- [29] “Capítulo 2. Estado de la Técnica en Convertidores CC/CA Multinivel”. Disponible:
<https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6330/03Sam03de15.pdf?sequence=3> [Último acceso: 2021 enero 22]
- [30] “Diseño y control de un convertidor modular multinivel para transmisión de energía eléctrica en corriente continua de alta tensión desde un parque eólico marino”. Trabajo Fin de Grado. Sandra Cebrián Illana. Tutor: Fernando Martínez Rodrigo. Departamento de tecnología electrónica. Universidad de Valladolid. Valladolid, marzo 2018.
- [31] “Aportación al Control del Convertidor CC/CA de Tres Niveles”. Tesis doctoral. Salvador Alepuz Menéndez. Director: Josep Bordonau Farrerons. Universidad Politécnica de Cataluña. Noviembre, 2004.
- [32] “Sistemas de Modulación” PDF generado usando el kit de herramientas de fuente abierta mwlib el 21 Dec 2009.
- [33] “Análisis del contenido espectral de modulaciones de ancho de pulso para inversores fotovoltaicos multiniveles conectados a red”. Proyecto final de carrera. Xavier Lozano Carreras.
- [34] “Simulation of cascaded H-bridge multilevel inverter using PD, POD, APOD techniques”. Sourabh Rathore, Mukesh Kumar Kirar and S. K Bhardwaj. Department of Electrical Engineering, MANIT, Bhopal. Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ) Volume 4, Number 3, September 2015.



- [35] “Diseño en Matlab de un convertidor PWM”. Trabajo Fin de Grado. Jorge Medina Gilsanz. Tutor: Juan Ignacio Lobo Salgado. Departamento de Tecnología Electrónica. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid. Valladolid, julio 2018.
- [36] “Estudio del desempeño del conjunto motor-inversor multinivel en cascada trifásico”. Tesis. Yesenia Reyes Severiano. Director: Dr. Jesús Aguayo Alquicira. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico de México.
- [37] SectorElectricidad. “¿Qué son los armónicos y como nos afectan?”. Disponible: <http://www.sectorelectricidad.com/13810/armonicos-que-son-y-como-nos-afectan/> [Último acceso: 2021 enero 30]
- [38] Circutor. “Técnicas de compensación y filtrado de perturbaciones armónicas”. Disponible: <http://circutor.es/es/formacion/armonicos-electricos> [Último acceso: 2021 enero 30]
- [39] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. “Resolución de 1 de febrero de 2018, de la Secretaría de Estado de Energía.” Publicado el 16 de febrero de 2018. Disponible: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2018-2198 [Último acceso: 2021 febrero 13]
- [40] “DISTORSIÓN ARMÓNICA”. Eugenio Téllez Ramírez. Programa de ahorro de energía. AUTOMATIZACIÓN, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD S.A. Disponible: <https://agnngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf> [Último acceso: 2021 enero 30]
- [41] “Convertidores CC/CA para la conexión directa a la red de sistemas fotovoltaicos. ANEXO C. Normativa y legislación”. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2696/36106-4.pdf?sequence=4> [Último acceso: 2020 diciembre 12]
- [42] “MATLAB”. Disponible: <https://es.wikipedia.org/wiki/Matlab> [Último acceso: 2020 octubre 10]
- [43] ACAPMI Blog. La plataforma de cursos y asesorías mediante internet. “¿Qué es MATLAB?”. Disponible: <http://acapmi.com/blog/2017/09/18/que-es-Matlab/> [Último acceso: 2020 octubre 10]

- [44] MathWorks. MATLAB. “Matemáticas. Gráficas. Programación.”
Disponible: <https://es.mathworks.com/products/Matlab.html> [Último
acceso: 2020 octubre 10]
- [45] “Simulink”. Disponible: <https://es.wikipedia.org/wiki/Simulink> [Último
acceso: 2020 octubre 10]
- [46] MathWorks. Simulink. “Simulación y diseño basado en modelos”.
Disponible: <https://es.mathworks.com/products/Simulink.html> [Último
acceso: 2020 octubre 10]
- [47] MathWorks. “Diseño de control de electrónica de potencia con
Simulink”. Disponible: [https://es.mathworks.com/solutions/power-
electronics-control.html](https://es.mathworks.com/solutions/power-electronics-control.html) [Último acceso: 2020 octubre 10]
- [48] MathWorks. “Simscape Electrical”. Disponible:
[https://es.mathworks.com/products/simscape-electrical.html#Matlab-
and-Simulink](https://es.mathworks.com/products/simscape-electrical.html#Matlab-and-Simulink) [Último acceso: 2020 octubre 10]
- [49] “Field-programmable gate array”. Disponible:
https://es.wikipedia.org/wiki/Field-programmable_gate_array [Último
acceso: 2021 enero 30]
- [50] “Field Programmable Gate Array” José Manuel Martín de la Rosa.
Disponible:
[http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11375/direccion/MEMORIA%
252F](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11375/direccion/MEMORIA%252F) [Último acceso: 2021 enero 31]
- [51] “Guía para programación de FPGAS” Joaquín Olivares, Gustavo
Minnucci, C. Diego Moreno, Fco. Javier Quiles, J. Ignacio Benavides.
Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Córdoba.

Finalmente se muestra la bibliografía complementaria que ha aportado cierto conocimiento para la elaboración de la presente memoria. De nuevo, el método de ordenación elegido sigue el criterio del orden de apoyo de los conocimientos en la memoria.

- [1] Monografias.com. “Aprovechamiento de la energía solar como energía renovable”. Disponible:



- <https://www.monografias.com/trabajos97/aprovechamiento-energia-solar-como-energia-renovable/aprovechamiento-energia-solar-como-energia-renovable.shtml> [Último acceso: 2021 febrero 21]
- [2] “Energía del Sol.” Camilo Arancibia Bulnes y Roberto Best Brown. (2010). Academia Mexicana de Ciencias
- [3] SCRIBD. “Energía Solar Fotovoltaica”. Disponible: <https://es.scribd.com/document/394671914/Energia-Solar-Fotovoltaica> [Último acceso: 2021 febrero 23]
- [4] “Energía Solar.” (2015). ABB Review, La revista técnica corporativa, Power and productivity for a better world™. Claes Ryttoft, Director de Tecnología y Vicepresidente Senior del Grupo ABB.
- [5] ENERGÍAS RENOVABLES. El periodismo de las energías limpias. “España, 26 de agosto: la fotovoltaica ya ha generado más electricidad que en todo el año 2019”. Disponible: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/26-de-agosto-la-fotovoltaica-ya-ha-20200826> [Último acceso: 2021 marzo 13]
- [6] “Convertidores”. Antonio Quintanilla Rodenas. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática. Universidad de Castilla-La Mancha. Disponible: <http://edii.uclm.es/~arodenas/Solar/componentes4.htm> [Último acceso: 2021 enero 22]
- [7] “Convertidores electrónicos de potencia” Apuntes de la asignatura: Regulación, control y protección de máquinas eléctricas. Mario Mañana Canteli. Universidad de Cantabria.
- [8] “Control digital para convertidor multinivel alimentado con energía solar”. Colección de Tesis Digitales. Bibliotecas UDLAP. “Capítulo 3. Convertidores multinivel”. Disponible: http://caterina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/martinez_h_d/ [Último acceso: 2021 enero 24]
- [9] Monografias.com. “Convertidores multinivel para redes de media tensión”. Disponible: <https://www.monografias.com/trabajos-pdf5/convertidores-multinivel/convertidores-multinivel.shtml> [Último acceso: 2021 enero 22]



- [10] “Diseño y simulación de un sistema energético fotovoltaico con control de seguimiento del punto de máxima potencia para proveer energía eléctrica eficiente en la región de Puno.” Lenin Wilfredo Cuenta Luque. Tesis para optar al título de Ingeniero Electrónico. Puno, Perú. 2017. Disponible:
http://181.176.163.136/bitstream/handle/UNAP/6755/Cuenta_Luque_Lenin_Wilfredo.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Último acceso: 2020 diciembre 12]
- [11] “Diseño e implementación en FPGA de un sistema con Sensores Integrados” Kevin André Gutiérrez Yangali. Trabajo Fin de Master. Ingeniería Industrial. Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid. Valladolid, mayo 2019.



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO
REAL PARA UN GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN UN
CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES