

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

CONVERTIDOR ELECTRÓNICO RESONANTE PARA PILAS DE COMBUSTIBLE: ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Autor: Maite Alonso Lasa

Director: Pablo Sanchis Gúrpide

Subdirector: Ernesto Barrios Rípodas

Pamplona, 27 / 06 / 2014



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	11
2.FUNDAMENTOS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE Y MODELADO ELECTROQUÍMICO	13
2.1. INTRODUCCIÓN	13
2.2. MODELO ELECTROQUÍMICO.....	16
2.2.2.1 Fenómeno termodinámico	17
2.2.2.2 Fenómeno de activación	18
2.2.2.3 Fenómeno de Doble Capa.....	19
2.2.2.4 Fenómeno Óhmico.....	19
2.2.2.5 Consumo de Energía de los Periféricos.....	20
2.3 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA REAL	20
2.3.1 Sistema de suministro de hidrógeno.....	22
2.3.2 Sistema de suministro de aire	22
2.3.3 Fuentes de tensión externa	23
2.3.4 Relé y diodo de corriente inversa	23
2.3.5 Software de control (RCS)	23
2.4. SIMULACIÓN DEL MODELO ELÉCTRICO.....	23
2.4.1 Resultados de la simulación.....	27
2.5 RENDIMIENTO	28
2.5.1 Simulación para distintas corrientes.....	29
2.5.2 Estudio de la pila de combustible a partir de datos empíricos.....	32
2.5.3 Otros factores que afectan a la eficiencia.....	37
3. CONEXIONADO DE PILAS	41
3.1. TIPOS DE CONEXIONES, VENTAJAS E INCONVENIENTES. ESTADO DEL ARTE... 41	
3.1.1 Configuración con distribución en DC	41
3.1.2 Configuración con distribución en HFAC	42
3.1.3 Configuración con convertidor multinivel en cascada	43
3.1.4 Conexión en serie	43
3.1.4.1 Tipos de configuraciones en serie.....	44
3.2 CONEXIÓN DEL SISTEMA REAL.....	45

3.2.1	<i>Diodo anti-paralelo externo</i>	46
3.2.2	<i>Diodo integrado</i>	49
3.3.	ESTRATEGIA DE CONEXIÓN.....	49
4.	CONVERTIDOR RESONANTE DE ALTA FRECUENCIA CON AISLAMIENTO	59
4.1	CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA PARA PILAS DE COMBUSTIBLES	59
4.1.1	<i>Convertidor resonante serie (SCR)</i>	60
4.1.2	<i>Convertidor resonante paralelo (PRC)</i>	61
4.1.3	<i>Convertidor resonante serie-paralelo (SPRC)</i>	61
4.1.3.1	Funcionamiento	62
4.2	DESCRIPCIÓN DE LA ETAPA DE CONVERSIÓN.....	63
4.2.1	<i>Topología de conversión DC/DC resonante con transformador de alta frecuencia: análisis y simulación</i>	64
4.2.1.1	Comutación del inversor de Medio Puente	65
4.2.1.1	Cálculo de los parámetros del sistema	66
4.2.1.2	Resultados de la simulación.....	69
4.2.2	<i>Conexión a red del sistema completo: análisis y simulación</i>	74
4.2.2.1	Control del puente en H.....	75
4.2.2.2	Resultados de la simulación.....	84
4.2.3	<i>Convertidor Elevador: análisis y simulación</i>	86
4.2.3.1	Control del elevador	87
4.2.3.2	Resultados de la simulación	89
4.2.2.2	Cálculo de las pérdidas de potencia en el elevador	91
5.	SISTEMA COMPLETO: CONVERTIDOR Y PILAS DE COMBUSTIBLE	103
5.1.	INTRODUCCIÓN	103
5.2.	EFFECTO DE LOS RIZADOS DE CORRIENTE Y TENSIÓN INTRODUCIDO POR EL CONVERTIDOR EN LA PILA	104
5.2.1	<i>Etapa resonante: rizado de 100 kHz</i>	104
5.2.2	<i>Elevador: rizado de 16.6 kHz en la corriente de la pila</i>	105
5.2.3	<i>Etapa inversora: rizado de 100 Hz</i>	108
5.3.	ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA COMPLETO	108
5.3.1.	<i>Comprobación de los niveles de tensión</i>	108
5.3.2	<i>Análisis de la potencia del sistema</i>	110
5.4.	LAZOS DE CONTROL DEL SISTEMA COMPLETO	111
5.4.1	<i>Control en lazo abierto</i>	111

5.4.2	<i>Control en lazo cerrado</i>	112
5.3.3	<i>Control para el seguimiento del punto máxima eficiencia (MEPT)</i>	116
5.3.3.1	Diagrama de flujo.....	119
5.3.3.2	Simulación.....	119
6.	CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS	125
	BIBLIOGRAFÍA	127
	ANEXOS 1	129
1.	CONTROL BÁSICO DE POTENCIA	129
2.	CONTROL DEL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA (MEPT)	131
	ANEXO 2	133
	ANEXO 3	141

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1- DIAGRAMA DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM [3]	15
FIGURA 2.2- CURVA I-V DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE PEM [1]	17
FIGURA 2.3- MODELO ELÉCTRICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE	20
FIGURA 2.4- PILA DE COMBUSTIBLE NEXA®1200 [6]	21
FIGURA 2.5- SISTEMA DE SUMINISTRO DE HIDRÓGENO[6]	22
FIGURA 2.6- MODELO ELÉCTRICO EN PSIM	24
FIGURA 2.7- PARÁMETROS INTRODUCIDOS EN PSIM	24
FIGURA 2.8- IMPLEMENTACIÓN DE LOS FENÓMENOS DE LA PILA EN PSIM	26
FIGURA 2.9 - CORRIENTE DE ACTIVACIÓN	26
FIGURA 2.10- TENSIONES Y CORRIENTES T= 55 Y IFC=60A	27
FIGURA 2.11- CONEXIÓN DE LA CORRIENTE DE ACTIVACIÓN EN T= 10MS	28
FIGURA 2.12- VALORES DE SALIDA DEL SISTEMA PARA T=55	30
FIGURA 2.13-. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA TENSIÓN DE SALIDA DE LA PILA DE COMBUSTIBLE [7]	30
FIGURA 2.14- COMPARACIÓN DE VFC Y PFC PARA 25°C Y 55°C	31
FIGURA 2.15- CURVA CARACTERÍSTICA I-V Y CONSUMO DE HIDRÓGENO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS	32
FIGURA 2.16- RENDIMIENTO Y POTENCIA DE HIDRÓGENO PARA DISTINTAS TEMPERATURAS	33
FIGURA 2.17- POTENCIA HIDRÓGENO Y RENDIMIENTO FRENTE A LA PFC	34
FIGURA 2.18- TEMPERATURA DE OPERACIÓN PARA DIFERENTES DENSIDADES DE CORRIENTE	35
FIGURA 2.19- POTENCIA DE PERIFÉRICOS RESPECTO A LA CORRIENTE IFC	36
FIGURA 2.20- BALANCE DE POTENCIAS DEL SISTEMA	36
FIGURA 2.21- POTENCIA ELÉCTRICA, HIDRÓGENO, PERIFÉRICOS Y PÉRDIDAS	37
FIGURA 2.22- COMPORTAMIENTO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE DEPENDIENDO DE LA PRESIÓN DEL HIDRÓGENO DE ENTRADA	38
FIGURA 2.23- CONSUMO DE HIDRÓGENO PARA DISTINTAS PRESIONES[7]	38

FIGURA 2.24- RATIO DE EXCESO DE OXÍGENO PARA DIFERENTES CORRIENTES.....	39
FIGURA 3.1- DIAGRAMA DE LA CONFIGURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN EN DC[9]	42
FIGURA 3.2- DIAGRAMA DE LA CONFIGURACIÓN CON DISTRIBUCIÓN HFAC[9]	42
FIGURA 3.3- DIAGRAMA DE LA CONFIGURACIÓN CON CONVERTIDOR MULTINIVEL EN CASCADA	43
FIGURA 3.4- DIAGRAMA DE LA CONFIGURACIÓN EN SERIE.....	44
FIGURA 3.5- TIPOS DE CONFIGURACIONES EN SERIE.....	44
FIGURA 3.6- DIODO EN ANTIPARALELO [11]	46
FIGURA 3.7- TOPOLOGÍA DEL CIRCUITO ELÉCTRICO DE LA PEMFC, EL DIODO AP Y LOS INTERRUPTORES	47
FIGURA 3.8- SISTEMA DE INTERRUPTORES [15]	48
FIGURA 3.9- ESTRUCTURA DE CONEXIÓN SERIE-PARALELO [16]	48
FIGURA 3.10- DIODOS DE PROTECCIÓN INTEGRADOS EN LA PILA DE COMBUSTIBLE [17]	49
FIGURA 3.11- POTENCIA DE HIDRÓGENO PARA LA CONEXIÓN DE 1 HASTA 4 PILAS DE COMBUSTIBLE	51
FIGURA 3.12- RENDIMIENTO VS. POTENCIA ELÉCTRICA PARA LA CONEXIÓN DE 1 A 4 PILAS EN SERIE: OPCIÓN A	51
FIGURA 3.13- RENDIMIENTO VS. POTENCIA ELÉCTRICA, PARA DIFERENTES TEMPERATURAS. OPCIÓN A	53
FIGURA 3.14-. GRÁFICA 3DDE LA EFICIENCIA VS. POTENCIA ELÉCTRICA VS. TEMPERATURA ...	54
FIGURA 3.15- POTENCIA DE HIDRÓGENO PARA LA CONEXIÓN DE 1 A 4 PILAS EN SERIE	55
FIGURA 3.16- RENDIMIENTO VS. POTENCIA ELÉCTRICA PARA 1 A 4 PILAS CONECTADAS EN SERIE: OPCIÓN B	56
FIGURA 3.17- RENDIMIENTO VS. POTENCIA ELÉCTRICO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS: OPCIÓN B	57
FIGURA 4.1- ESQUEMA BÁSICO DE UN CONVERTIDOR DC/DC RESONANTE CON TRANSFORMADOR HF	59
FIGURA 4.2- CONVERTIDOR RESONANTE SERIE.....	60
FIGURA 4.3- CONVERTIDOR RESONANTE PARALELO	61
FIGURA 4.4- SERIES-PARALLEL RESONANT CONVERTER	61
FIGURA 4.5- ESQUEMA DE LA ETAPA DE CONVERSIÓN COMPLETA.....	63

FIGURA 4.6- DEFINICIÓN DE LA TENSIÓN Y POTENCIA DE UNA PILA D COMBUSTIBLE PARA UNA CORRIENTE DE REFERENCIA.....	63
FIGURA 4.7- CONVERTIDOR DC/DC RESONANTE CON TRANSFORMADOR DE ALTA FRECUENCIA EN PSIM	64
FIGURA 4.8- SEÑALES DE CONTROL Y ESTADO DE LOS IGBTs	65
FIGURA 4.9- RESONANCIA DEL CONVERTIDOR CON EL COEFICIENTE DE SEGURIDAD.....	68
FIGURA 4.10- SIMULACIÓN DE VIN, VBUS, VCON1, VCON2, VCR1 AND VCR2.....	69
FIGURA 4.11- CORRIENTES RESONANTES, CORRIENTE EN LM Y RC, TENSIONES EN EL TRANSFORMADOR Y TENSIÓN EN LR.....	70
FIGURA 4.12- TENSIONES DEL TRANSFORMADOR IDEAL Y TENSIÓN EN LR	71
FIGURA 4.13- CORRIENTE RESONANTE Y CORRIENTE POR LM CUANDO LM=0.5 MH (VALOR REAL)	71
FIGURA 4.14- CORRIENTE DE RESONANCIA Y CORRIENTE POR LM SIENDO LM=0.1 MH	72
FIGURA 4.15- CORRIENTE RESONANTE Y CORRIENTE POR LM SIENDO LM=10μ	72
FIGURA 4.16- CORRIENTE RESONANTE Y CORRIENTE POR LM SIENDO LM=5MH	73
FIGURA 4.17- CONEXIÓN A RED DEL SISTEMA A TRAVÉS DE UN PUENTE EN H.....	74
FIGURA 4.18- RELACIÓN DE LAS TENSIONES DE SALIDA, INVERSOR PUENTE EN H	76
FIGURA 4.19- DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LAZO DE CONTROL CON COMPENSACIÓN VRED .79	79
FIGURE 4.20- SIMULACIÓN DE LA CORRIENTE DE ENTRADA Y SALIDA DEL LAZO DE CONTROL SIN COMPENSACIÓN VRED	80
FIGURA 4.21- DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LAZO DE CONTROL DE CORRIENTE CON COMPENSACIÓN DE VRED	81
FIGURA 4.22- SIMULACIÓN DE LA ENTRADA Y SALIDA AL LAZO DE CONTROL CON COMPENSACIÓN DE VRED	82
FIGURA 4.23- RELACIÓN DE CORRIENTES DE ENTRADA AL INVERSOR	82
FIGURE 4.24- DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL DE TENSIÓN DEL INVERSOR PUENTE EN H	83
FIGURA 4.25- SEÑAL DE CONMUTACIÓN. MODULACIÓN UNIPOLAR	85
FIGURA 4.26- SIMULACIÓN DE LA TENSIÓN Y CORRIENTE DE RED.	86
FIGURA 4.27- ESQUEMA EN PSIM DEL CONVERTIDOR ELEVADOR Y SU CONTROL.....	87
FIGURA 4.28- DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LAZO DE CORRIENTE.....	88

FIGURA 4.29-TENSIÓN DE ENTRADA Y SALIDA DEL ELEVADOR.....	89
FIGURA 4.30- PWM Y CONTROL DE SEÑALES DEL ELEVADOR.....	90
FIGURA 4.31- CORRIENTE Y TENSIÓN EN LA BOBINA DEL ELEVADOR	90
FIGURA 4.32 -ESQUEMA DE LA CONDUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL ELEVADOR	91
FIGURA 4.33- ESQUEMA DE LA CONMUTACIÓN DE LOS ELEMENTOS.....	92
FIGURA 4.34-GRÁFICA IC-VCE [21].....	93
FIGURA 4.35- GRÁFICA IF-VF [22].....	96
FIGURA 4.36- MODELO DEL CONVERTIDOR ELEVADOR DE INGTEAM.....	98
FIGURA 4.37- CURVA IC-VGE DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL IGBT [21]	99
FIGURA 5.1- ESTRUCTURA FINAL CON NIVELES DE TENSIÓN DE CADA ETAPA.....	103
FIGURA 5.2- SIMULACIÓN DE LAS CORRIENTES QUE PUEDEN VERSE AFECTADAS POR LA RESONANCIA	104
FIGURA 5.3- CORRIENTES GENERADAS POR LA PILA DE COMBUSTIBLE CON EL SISTEMA COMPETO CONECTADO A T=55	105
FIGURA 5.4-TENSIONES GENERADAS POR LA PILA DE COMBUSTIBLE CON EL SISTEMA COMPLETO CONECTADO A T=55	105
FIGURA 5.5- VALORES MEDIOS DE TENSIÓN Y CORRIENTE GENERADOS POR LA PILA.....	106
FIGURA 5.6- RIZADO EN LA POTENCIA ENTREGADA POR LA PILA DE COMBUSTIBLE, A T=55.	106
FIGURA 5.7- RIZADO DE CORRIENTE	107
FIGURA 5.8- TENSIONES Y CORRIENTES PARA T=55°C, IFC=60 A CON UN RIZADO SENOIDAL DE CORRIENTE DE AMPLITUD 6 A Y A UNA FRECUENCIA DE 100HZ PARA T=0.22.	107
FIGURA 5.9- SIMULACIÓN DE LOS NIVELES DE TENSIÓN DEL SISTEMA.....	109
FIGURA 5.10- SIMULACIÓN DE VBUS Y SU RIZADO.....	110
FIGURA 5.11- SIMULACIÓN DE LA POTENCIA GENERADA POR LA PILA DE COMBUSTIBLE, Y LA POTENCIA ENTREGADA A RED	110
FIGURA 5.12- CONTROL DE POTENCIA EN LAZO ABIERTO	111
FIGURA 5.13 -SIMULACIÓN DE LA POTENCIA Y CORRIENTE DE REFERENCIA PARA 55 Y 25	112
FIGURA 5.14- CONTROL EN LAZO CERRADO.....	113
FIGURA 5.15- APROXIMACIÓN DE LA CURVA DE POTENCIA EN CUATRO TRAMOS.....	113

FIGURA 5.16- OPERACIÓN DEL PROGRAMA PARA 25°C	114
FIGURA 5.17- SIMULACIÓN DE LA CORRIENTE Y POTENCIA PARA 55 Y 25	115
FIGURA 5.18- CORRIENTE DE LA PILA PARA LA CONEXIÓN DE 1 A 4 PILAS EN SERIE DISTINTAS TEMPERATURAS	116
FIGURA 5.19- CONTROL DE SEGUIMIENTO DE MÁXIMA EFICIENCIA EN PSIM	118
FIGURA 5.20- SIMULACIÓN DEL SISTEMA PARA UNA REFERENCIA TIPO RAMPA	120
FIGURA 5.21- SIMULACIÓN DEL SISTEMA PARA UNA REFERENCIA DE TIPO RAMPA	121
FIGURA 5.22- SIMULACIÓN DEL SISTEMA PARA UNA REFERENCIA DE TIPO ESCALÓN.....	122
FIGURA 5.23- CAMBIO EN LA CONEXIÓN DE LAS PILAS PARA UNA REFERENCIA DE 1000 A 3000	123

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1- PARÁMETROS PRINCIPALES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE[1]	14
TABLA 2.2- PARÁMETROS DEL MODELO ELÉCTRICO.....	24
TABLA 2.3- VALORES DE SALIDA DE LA PILA DE COMBUSTIBLE A T=55	29
TABLA 2.4- VALORES DE CORRIENTE Y TENSIÓN DE LA PILA PARA DISTINTAS TEMPERATURAS.	35
TABLA 4.1- PARÁMETROS CONOCIDOS DEL SISTEMA	66
TABLA 4.2- PARÁMETROS CALCULADOS DEL SISTEMA.....	69
TABLA 4.3: INFLUENCIA DEL VALOR DE LM SOBRE LAS CORRIENTES DEL SISTEMA	73
TABLA 4.4- PARÁMETROS IGBT.....	93
TABLA 4.5- CARACTERÍSTICAS DE CONMUTACIÓN DEL IGBT [21].....	94
TABLA 4.6- PARÁMETROS DEL DIODO.....	95
TABLA 4.7- CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL DIODO [22]	96
TABLA 4.8- VALORES DE OPERACIÓN	98
TABLA 4.9: COMPARATIVA ENTRE LAS DOS ESTRUCTURAS DEL ELEVADOR	101
TABLA 5.1- POTENCIA ENTREGADA POR LA PILA PARA DISTINTOS RIZADOS DE CORRIENTE. 108	
TABLA 5.2- RANGOS DE POTENCIA QUE MAXIMIZAN EL RENDIMIENTO PARA 2,3 Y 4 PILAS EN SERIE	117

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este proyecto es analizar un sistema de generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno para su posterior inyección a red.

El sistema de generación de energía consiste en cuatro pilas de combustible tipo PEM y una estructura de conversión de potencia se compone de un Elevador, un convertidor resonante y inversor de puente en H.

Las pilas de combustible tipo PEM del modelo Nexa 1200 se encuentran en el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Pública de Navarra, la potencia nominal de cada una de ellas es de 1.2 kW. Además, para un funcionamiento a plena carga la tensión generada a la salida de las pilas será aproximadamente de 20V.

Primero se realiza un estudio teórico de las diferentes tecnologías existentes para pilas de combustible. Debido a la rapidez de respuesta que presentan, además de la baja temperatura y presión de trabajo que requieren, se determina a las pilas tipo PEM como las adecuadas para aplicaciones domésticas. Se analizarán los fenómenos que ocurren en el interior de la pila.

Se estudia el circuito eléctrico equivalente de las pilas PEM basado en su modelo electroquímico para su posterior simulación a través del programa PSIM. Dicha simulación muestra las tensiones, potencia y eficiencia de las pilas para diferentes corrientes. Además, se presta especial atención a los factores que afectan a la eficiencia de la pila, siendo la temperatura de operación la más determinante.

Las distintas conexiones posibles para las pilas de combustible serán descritas. Dado que el sistema está dirigido para la conexión a red, es importante encontrar una conexión capaz de incrementar la tensión de salida del sistema. Para ello, la conexión en serie es la más apropiada. Presenta además ventajas como su simplicidad y su menor coste. Sin embargo, plantea el inconveniente que para un fallo en una pila, el sistema completo queda invalidado, para suplir esta sensibilidad ante fallos es necesario la colocación de una protección extra.

Se propone una protección que consta de un diodo en paralelo para cada pila de combustible, por lo que cuando suceda un fallo o una pila opere incorrectamente un interruptor desconecta dicha pila y se permite la circulación de corriente a través del diodo.

En la siguiente parte del documento se realiza un estudio a través de datos empíricos obtenidos en el laboratorio. El análisis que se realiza es similar al desarrollado a través de la simulación pero además se detalla el consumo de combustible de las pilas.

Dado que el sistema real se compone de cuatro pilas de combustible, se evalúa la eficiencia del mismo en función de las pilas operativas para cada momento que servirá para establecer el control que se realiza posteriormente.

El siguiente paso consiste en la descripción de la etapa de conversión. Primero, Elevador se conecta a las pilas de combustible. Después, el convertidor resonante antes mencionado, cortesía Ingeteam, es añadido. Éste se trata de un convertidor fotovoltaico por lo que es necesaria una adaptación para las pilas de combustible. La elección de un convertidor resonante se basa en la posibilidad de realizar la conmutación minimizando las pérdidas ya que sucede cuando el valor de corriente por los transistores es cero. Además, esta estructura intermedia incluye un transformador de alta frecuencia que proporciona aislamiento galvánico al sistema y permite incrementar la tensión de salida del Elevador. Por último, para adecuar la tensión y corriente a los requerimientos de red, se propone un inversor de Puente en H.

Finalmente, se analizan y calculan los parámetros de la etapa de conversión para poder realizar la simulación de la misma en PSIM. De esta forma se comprueba el correcto funcionamiento de sistema y se observa que la potencia entregada a red cumple con los requerimientos de la misma.

El último objetivo del proyecto es determinar los puntos óptimos de operación de sistema. Para ello se implementa un lazo de control sobre la potencia generada por la pila de combustible. Este control se basa en determinar el número de pilas que deben conectarse en cada momento para asegurar la máxima eficiencia posible del sistema.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE Y MODELADO ELECTROQUÍMICO

2.1. Introducción

Una pila de combustible es un dispositivo que transforma energía química en energía eléctrica, calor y agua. Dicha energía química se obtiene de la reacción de recombinación del hidrógeno (combustible) y oxígeno (agente oxidante) con la ayuda de un catalizador, a agua.

Pueden ser usadas como fuentes de energía para aparatos eléctricos portátiles, así como en la industria automovilística o incluso en pequeñas unidades de cogeneración [1]. Se utilizan además en aplicaciones de generación distribuida, así como almacenamiento para fuentes de energía renovable, caracterizadas por ser poco predecibles e inestables.

La clasificación más típica de las distintas tecnologías de pilas de combustible se basa en los diferentes tipos de electrolitos, de este modo se distinguen:

- PEMFC: Membrana polimérica
- DMFC: Conversión directa de Etanol
- AFC: Alcalinas
- PAFC: Ácido fosfórico
- MCFC: Carbonatos fundidos
- SOFC: Óxido sólido

Los parámetros más importantes de cada tecnología se muestran en la siguiente Tabla2.1.

Type	Operating temperature (°C)	Off-load voltage (V DC)	Power	Used fuel
AFC	65 - 220	1,1 - 1,2	to 20 kW	H ₂ + O ₂
PEMFC	50 - 120	1,1	kW	H ₂ /methanol + O ₂ /air
DMFC	130	1,1	to 10 kW	Methanol/ethanol + O ₂ /air
PAFC	150 - 210	1,1	hundreds kW	H ₂ /hydrogenous gas + air
MCFC	600 - 700	0,7 - 1,0	MW	H ₂ /hydrogenous gas/CO + air
SOFC	650 - 1000	0,8 - 1,0	to 10 MW	H ₂ /hydrogenous gas/CO + air

Tabla 2.1- Parámetros principales de las pilas de combustible[1]

Para aplicaciones de poca potencia las pilas de hidrógeno con tecnología PEM resulta la opción más adecuada [2], especialmente para aquellas aplicaciones que requieran de temperaturas bajas de operación, lo que permite que el sistema tenga tiempos de conexión menores que el resto de tecnologías. Debido a lo anterior, esta tecnología puede ser utilizada en aplicaciones donde las variaciones de carga sean muy rápidas, así como vehículos, generación distribuida y sistemas aislados.

Las bajas presiones de trabajo proporcionan condiciones seguras y una alta eficiencia. Además, su baja potencia permite mucha modularidad.

Otra ventaja que presenta esta tecnología es el uso de un electrolito sólido el cual reduce la corrosión y mejora su vida útil. Se caracteriza por sus bajas emisiones y su alto ratio de conversión.

Debido las buenas prestaciones que presenta, puede predecirse una reducción en el coste provocado por la economía de escala.

Como se muestra en la Figura 2.1, la pila de combustible debe ser alimentada de forma simultánea por hidrógeno, en la parte del ánodo, y por oxígeno, por la parte del cátodo. En medio de estos se encuentran una membrana donde se da el intercambio de protones.

Cuando el hidrógeno alcanza el catalizador en la parte del ánodo, éste se disocia en protones, que atravesarán la membrana hacia el catalizador de la parte del cátodo, y en electrones que pasarán por un circuito externo en forma de corriente eléctrica.

En el catalizador del cátodo los protones de hidrógeno reaccionarán con los iones del oxígeno formando agua.

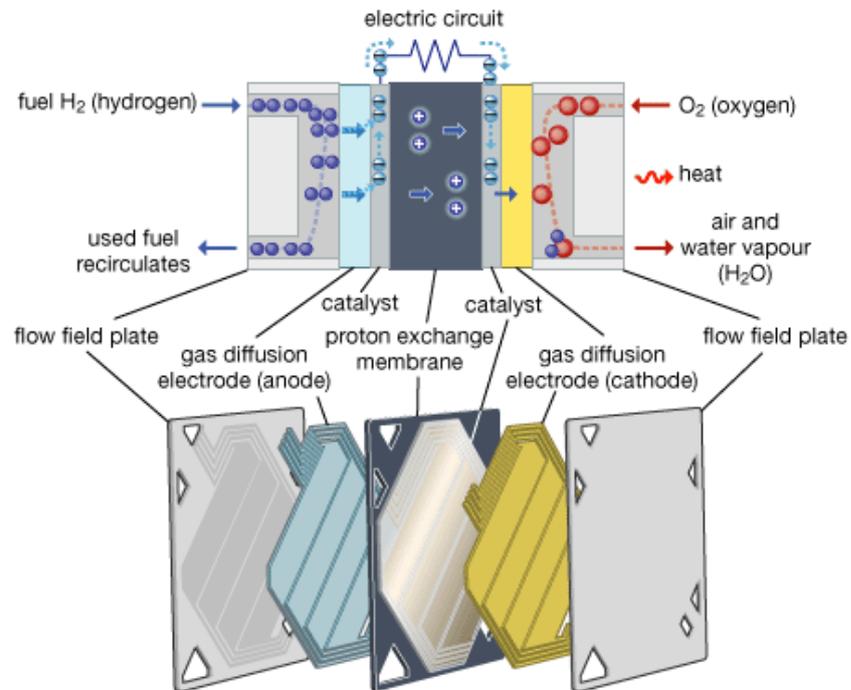


Figura 2.1- Diagrama de una pila de combustible tipo PEM [3]

Las reacciones químicas que se producen en la PEMFC son las siguientes:

-Ánodo:

-Cátodo:

-Reacción global:

2.2. Modelo electroquímico

Curva I-V

Para una temperatura de 25 °C y una presión de 101,325 kPa, la tensión generada por una pila de combustible puede obtenerse [4]:

donde E_c es la tensión en cada celda, relacionada con la energía libre de Gibbs.

n se refiere al número de electrones que participan en la reacción.

$n = 6,023 \cdot 10^{23}$ electrones: 2 para cada nueva formación .

F es la constante de Faraday, cuyo valor es 96500 C / .

Dada una situación ideal, la tensión de salida de la pila de combustible alcanzaría la tensión teórica de 1,187 V sin circulación de corriente. De hecho, las pilas de hidrógeno alcanzan su mayor tensión de salida durante los periodos sin carga. Sin embargo, con el incremento de corriente, la tensión de la pila descenderá, como se muestra en la Figura 2.2. Este efecto es debido a agentes químicos y físicos que limitan el proceso de la reacción.

Existen tres fenómenos que provocan que esto ocurra:

- 1) Fenómeno de Activación
- 2) Fenómeno Óhmico
- 3) Fenómeno de Concentración

La forma de la curva de polarización depende de la temperatura de operación, de la presión y de la humedad de los distintos componentes de la pila. Los cambios en estos parámetros pueden causar el aumento o disminución de la curva I-V característica, y en

consecuencia, el rendimiento de la pila de combustible se verá incrementado o reducido respectivamente.

Estos fenómenos serán explicados en detalle en la siguiente Sección 2.2.

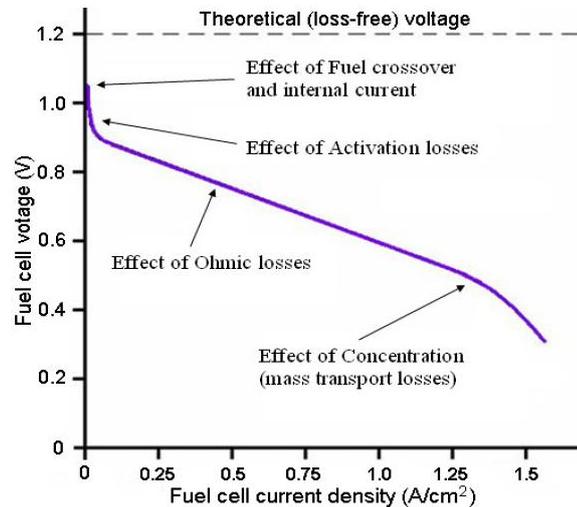


Figura 2.2- Curva I-V de una celda de combustible PEM [1]

Modelo eléctrico

En esta sección se describen, desde el punto de vista electroquímico, los fenómenos que tienen lugar durante la operación de la pila [5]. Dichos fenómenos son los responsables de la forma que tiene la Curva I-V mostrada en la Figura 2.2.

2.2.2.1 Fenómeno termodinámico

Cuando el hidrógeno y el oxígeno reaccionan para producir agua, se obtiene una tensión reversible en cada celda de combustible:

Donde:

-T es la temperatura de operación de la celda en grados Celsius.

- es la presión del hidrógeno en bares.

(2.3)

- es la presión del oxígeno en bares.

Las celdas que forman una pila de combustible se encuentran conectadas en serie, por tanto, la tensión total obtenida será proporcional al número de celdas N_s , que compongan la pila.

La tensión total en consecuencia puede expresarse de la siguiente forma:

(2.4)

2.2.2.2 Fenómeno de activación

Existe una barrera energética llamada Energía de Activación. Dicho nivel de energía debe ser superado por las cargas para alcanzar los electrodos. Esta energía se define como una tensión V_{act} que se puede obtener de forma experimental a través de la siguiente ecuación:

(2.5)

donde:

(2.6)

(2.7)

Como se observa en las ecuaciones (2.6) y (2.7), V_{act} depende de la temperatura.

Teniendo en cuenta que las celdas que componen la pila se encuentran conectadas en serie, la corriente que circula por ellas será:

(2.8)

La tensión total se puede expresar como:

(2.9)

- Fenómeno de concentración

El fenómeno de Concentración está relacionado con el transporte de carga en la pila de combustible, producido por convección y difusión. Cuando la pila se encuentra en funcionamiento, es necesario alimentar continuamente a los electrodos con oxígeno e hidrógeno, así como eliminar el agua generada. Por lo tanto, este fenómeno se incrementa con el aumento de corriente por la pila de combustible.

La tensión de Concentración de una celda puede obtenerse mediante la siguiente ecuación empírica:

$$, \quad (2.10)$$

donde:

$$(2.11)$$

De la misma forma que para los fenómenos anteriormente descritos, la tensión de concentración total de una pila será la siguiente:

$$(2.12)$$

2.2.2.3 Fenómeno de Doble Capa

En la interfaz electrodo-electrolito de cada celda tiene lugar un efecto capacitivo denominado efecto de doble capa. Éste se basa en la transferencia de cargas que ocurre durante la oxidación y reducción. Para modelar este fenómeno se incluye un condensador, Cdl (condensador de doble capa) que representa la acumulación de cargas eléctricas e iónicas.

Dadas las N_s celdas conectadas en serie:

$$— \quad (2.13)$$

2.2.2.4 Fenómeno Óhmico

Este fenómeno es debido a la resistencia que ofrece la pila de combustible ante la circulación de iones y electrones, provocando pérdidas en su tensión. La caída de tensión en cada celda es:

$$, \quad (2.14)$$

donde:

$$\begin{aligned} - & \text{ es la corriente a través de la pila} \\ - & \end{aligned} \quad (2.15)$$

Dadas N_s celdas conectadas en serie en una pila de combustible:

$$(2.16)$$

2.2.2.5 Consumo de Energía de los Periféricos

Parte de la energía generada por la pila es destinada a cubrir la potencia de los periféricos, así como la placa de control y la válvula de purga. Dicho consumo se modela mediante una fuente de corriente en paralelo con la salida de la pila. El valor de la corriente se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$(2.17)$$

Finalmente, la pila de combustible puede ser aproximada usando un modelo electroquímico [5], como el presentado en la Figura 2.3. Este modelo eléctrico representará la pila de combustible tanto en estado estacionario como en el transitorio. Incluye elementos que describen los fenómenos termodinámicos y electroquímicos además del consumo de periféricos.

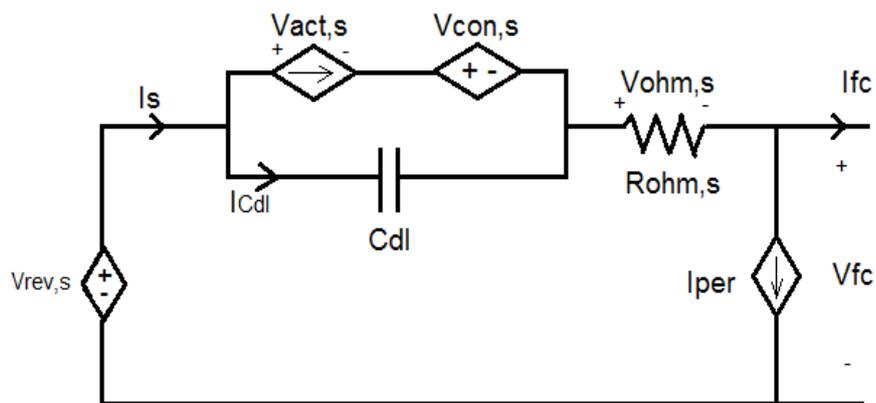


Figura 2.3-Modelo eléctrico de una pila de combustible

2.3 Descripción y características del sistema real

En el Laboratorio de Energía Renovables de la UPNA se dispone de un banco de ensayos que cuenta con un sistema de suministro de hidrógeno y nitrógeno que alimenta a cuatro pilas de combustible, de tipo PEM. Estas pilas, que serán las utilizadas en la simulación del presente proyecto, son del modelo Nexa[®]1200, que se muestra en la siguiente imagen:

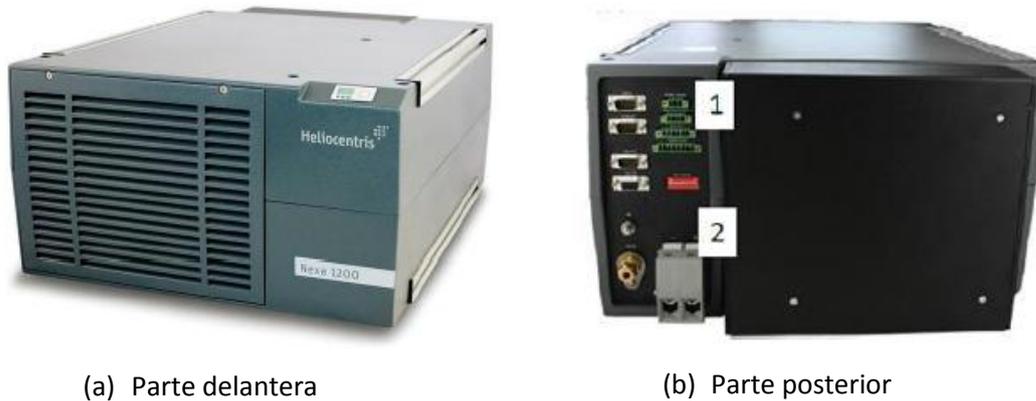


Figura 2.4- Pila de combustible Nexa®1200 [6]

Este modelo de pila se caracteriza por tener un rango de tensión de entre 20 y 36 V DC, con una corriente máxima de 65 A, generando una potencia nominal de 1200W.

Como se dispone de 4 pilas, conectadas en serie, la potencia máxima que se podrá obtener será 4800 W.

Nexa®1200 se compone de un stack con 36 células de combustible de la casa Ballard, conectadas en serie, además de una serie de sistemas auxiliares que permiten una operación eficiente, que son los siguientes:

- Sistema de suministro de hidrógeno (Figura 2.5).
- Sistema de suministro de oxidante y de aire refrigerante.
- Fuente externa de tensión.
- Relé y diodo de corriente inversa.
- Software de control Nexa®1200Remote Control Software (RCS).
- Válvulas de control y sensores.

Como se aprecia en la Figura 2.4 (b), en la parte posterior la pila cuenta con un panel de conexión (1), así como con las salidas de tensión y el suministro de hidrógeno (2).

Cada celda está compuesta por un ensamblado membrana-electrodo y dos placas de flujo. El ensamblado consiste en dos electrodos (ánodo y cátodo), los cuales tienen una de sus superficies laterales cubiertas de catalizador de platino, y están separados por un electrolito de membrana polimérica.

Los gases son suministrados a los electrodos a ambos lados de la membrana, a través de conductos mecanizados en las placas de flujo. El hidrógeno fluirá hasta el ánodo, mientras que el oxígeno irá al cátodo.

El stack de esta pila está formado por 36 celdas en serie, por lo que una única celda produce una tensión cercana a 1 V en circuito abierto, y 0.6 V a plena carga.

2.3.1 Sistema de suministro de hidrógeno

Para una correcta operación de la pila, es necesario suministrar hidrógeno con una pureza mínima de 4.0 (99.99%), con una presión de entre 1 y 15 bar.

La pila cuenta con un sistema regulador de presión que repone hidrógeno al mismo ritmo que es consumido por las celdas.



Figura 2.5- Sistema de suministro de hidrógeno[6]

También tiene una válvula de purga que se abre periódicamente para expulsar gases inertes (vapor de agua y nitrógeno) acumulados en el ánodo durante el funcionamiento. Las purgas se realizan a mayor o menor frecuencia en función de la velocidad a la que se esté produciendo la reacción, es decir, de la corriente demandada a la pila.

2.3.2 Sistema de suministro de aire

La alimentación de aire se lleva a cabo a través de un ventilador colocado en la parte posterior de la pila de combustible. Este aire proporciona el oxígeno necesario en la reacción electroquímica, refrigera la pila y diluye el hidrógeno purgado.

Una mayor corriente generada implica un aumento del calor generado por la reacción, por lo que el software de control de la pila aumenta la velocidad del ventilador.

2.3.3 Fuentes de tensión externa

Es necesario usar una fuente externa de tensión en el encendido y apagado de la pila, para alimentar los sistemas auxiliares. En el modo de funcionamiento normal, la propia pila es capaz de producir la potencia que necesitan los sistemas periféricos.

2.3.4 Relé y diodo de corriente inversa

El relé se utiliza para desconectar automáticamente la pila de combustible de la carga si se producen fallos o errores.

Además, el sistema cuenta con un diodo de corriente inversa que protege a la unidad de corrientes indeseadas procedentes de la carga electrónica. Se hace necesaria la instalación de un radiador pegado al diodo de corriente inversa, ya que de esta forma se facilita la disipación de calor y se evitan daños por sobrecalentamiento en el mismo.

2.3.5 Software de control (RCS)

El funcionamiento de la pila está monitorizado y controlado por un sistema electrónico. El controlador regula el funcionamiento del sistema, lleva a cabo su encendido y apagado, proporciona mensajes tanto de error como de advertencia y asegura un funcionamiento seguro durante todo el tiempo. Además, regula la válvula de purga, la velocidad de giro del ventilador y genera la señal de disparo del relé de protección.

2.4. Simulación del modelo eléctrico

Por medio del modelo eléctrico descrito en la Sección 2.2, se realiza la simulación de una de las pilas de combustible disponible en el laboratorio. Dicha simulación se implementa por medio de fuentes de tensión y corriente, como se muestra en la siguiente figura:

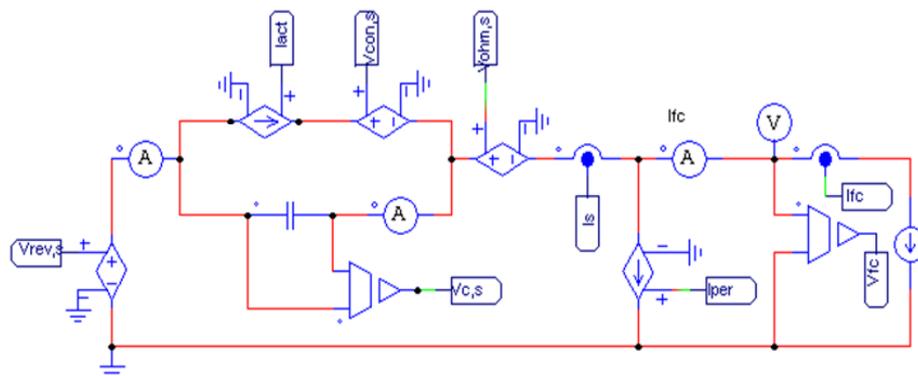


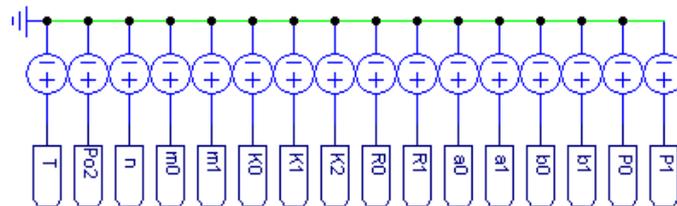
Figura 2.6- Modelo eléctrico en PSIM

Es necesario introducir en PSIM los parámetros de la pila de combustible que aparecen en las ecuaciones que describen el modelo eléctrico y modelan los fenómenos internos de la pila. Los valores se recogen en la siguiente tabla:

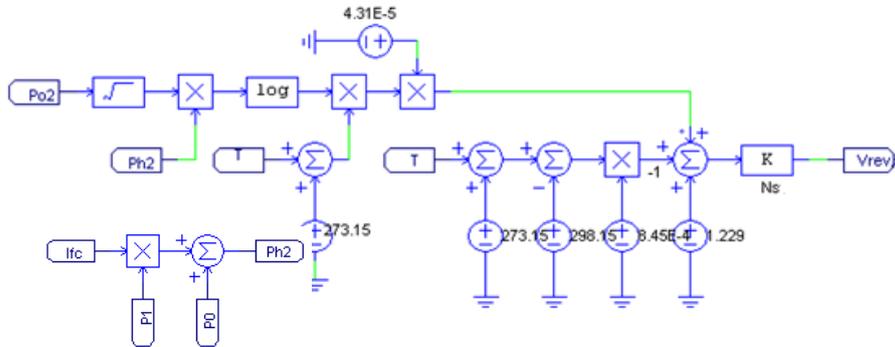
Descripción	Parámetros	Valores
Consumo periféricos	K_0 (A)	1.534
	K_1	$-1.208 \cdot 10^{-3}$
	K_2 (A^{-1})	$4.118 \cdot 10^{-4}$
Fenómeno Termodinámico	P_0 (bar)	1.324
	P_1 ($bar \cdot A^{-1}$)	$-1.305 \cdot 10^{-4}$
Fenómeno de activación	A_0 (V)	0.6259
	A_1 ($V \cdot ^\circ C^{-1}$)	$-1.1128 \cdot 10^{-3}$
	b_0 (V)	$9.1487 \cdot 10^{-2}$
	b_1 ($V \cdot ^\circ C^{-1}$)	$-1.4866 \cdot 10^{-4}$
Fenómeno de concentración	m_0 (V)	$1.8250 \cdot 10^{-2}$
	m_1 ($V \cdot ^\circ C^{-1}$)	$-3.328 \cdot 10^{-5}$
	N (A^{-1})	$4.5 \cdot 10^{-2}$
Fenómeno Óhmico	$R_{ohm,0}$ (Ω)	$2.8959 \cdot 10^{-3}$
	$R_{ohm,1}$ ($\Omega \cdot ^\circ C^{-1}$)	$-4.8479 \cdot 10^{-6}$
Fenómeno de doble capa	C_{dl} (F)	4.9183

Tabla 2.2- Parámetros del modelo eléctrico

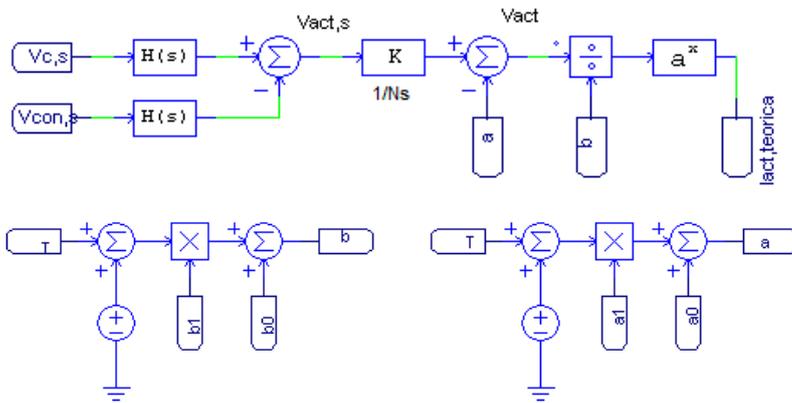
Los parámetros anteriores se introducen en la simulación de PSIM usando fuentes de tensión:

**Figura 2.7-** Parámetros introducidos en PSIM

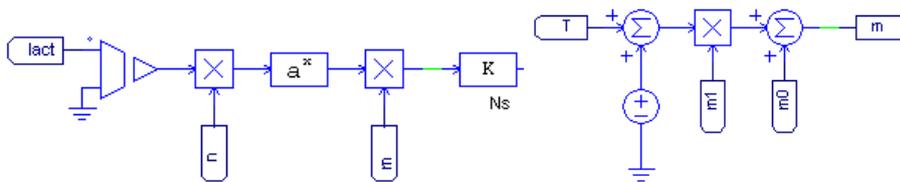
Además, los diferentes fenómenos que ocurren en la pila de combustible y que son modelados mediante las ecuaciones (2.2) a (2.17), se implementan en PSIM por medio de fuentes de tensión y bloques de operaciones.



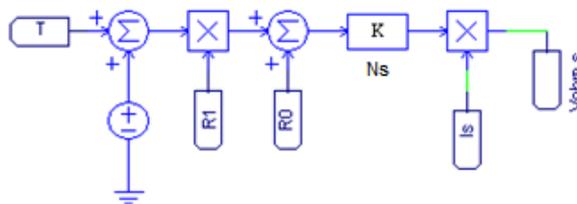
(a) Tensión Reversible



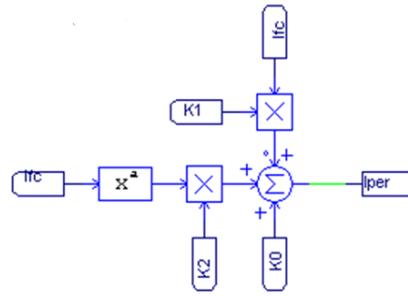
(b) Corriente de Activación



(c) Tensión de Concentración



(d) Tensión Óhmica

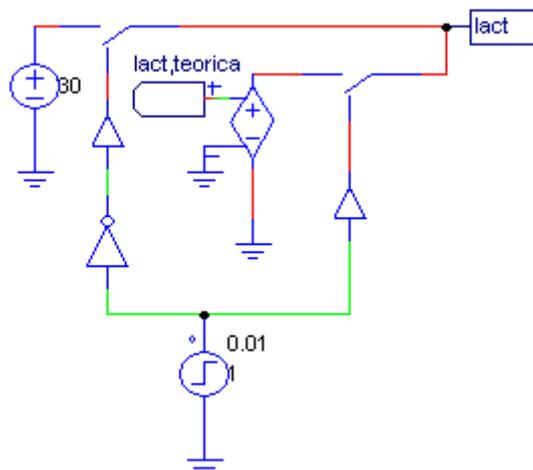


(e) Corriente de Periféricos

Figura 2.8- Implementación de los fenómenos de la pila en PSIM

El valor de la corriente de activación que se obtiene es el valor teórico correspondiente al modelo de la pila de combustible. Dado que en el primer instante la corriente sería cero, y por tanto la tensión también sería nula, es necesario plantear la inicialización del valor de corriente de activación para evitar que esto ocurra.

Para ello se añade un interruptor, como se muestra en la Figura 2.9, mediante el que se conecta durante los primeros instantes, la fuente de corriente que inicializa la lact (30 A). Tras 10ms pasa a conectar el circuito el valor teórico de corriente. De este modo se consigue que durante esos 10ms iniciales haya una tensión $V_{con,s}$ y el condensador comience a cargarse.

**Figura 2.9 -** Corriente de Activación

2.4.1 Resultados de la simulación

Tras haber realizado el modelo eléctrico en PSIM, se va a simular el circuito para una fuente de corriente a la salida de 60 A y suponiendo una temperatura de trabajo de 55 °C, dado que éstos se consideran los valores nominales.

En la siguiente figura se observan las tensiones y corrientes obtenidas en la simulación con sus correspondientes valores.

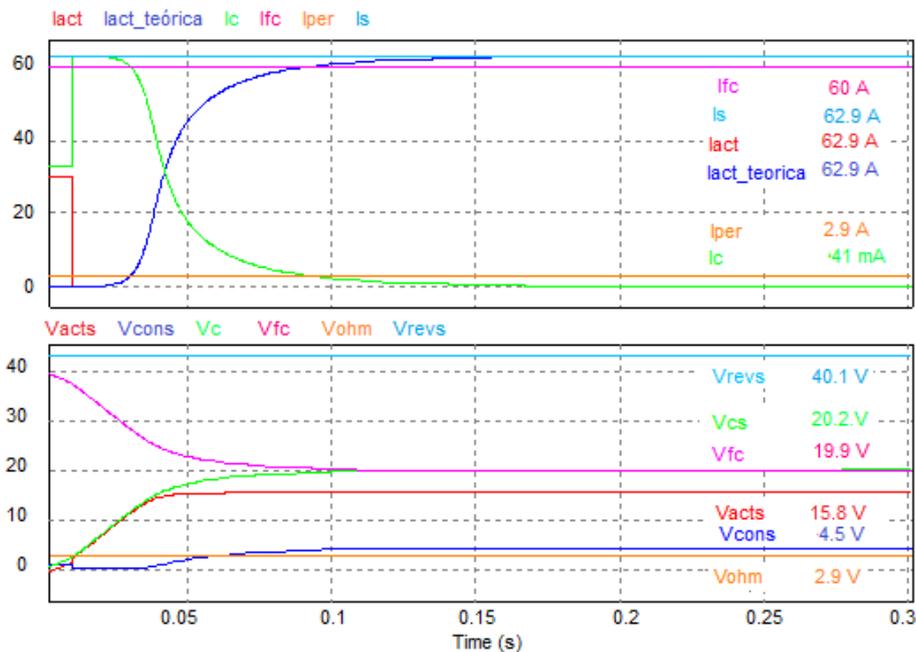


Figura 2.10- Tensiones y corrientes $T=55$ °C y $I_{fc}=60A$

Se distinguen diferentes instantes:

- Antes de 0.01s

La primera parte de la simulación trata de la inicialización de *lact*. La necesidad de dicha inicialización se justifica observando la corriente real de *lact*, denominada *lact_teórica*, que se obtiene mediante la ecuación (2.8). El valor de esta corriente se mantiene a cero por lo que la tensión de activación y la tensión por el condensador serían también cero.

El valor para la inicialización se fija manualmente y en este caso es de 30 A. Centrando en análisis sobre las tensiones, se observa como *Vact,s* y *Vcon,s* también son inicializadas y por lo tanto el condensador comienza a cargarse. Esta primera etapa puede apreciarse mejor en la siguiente figura.

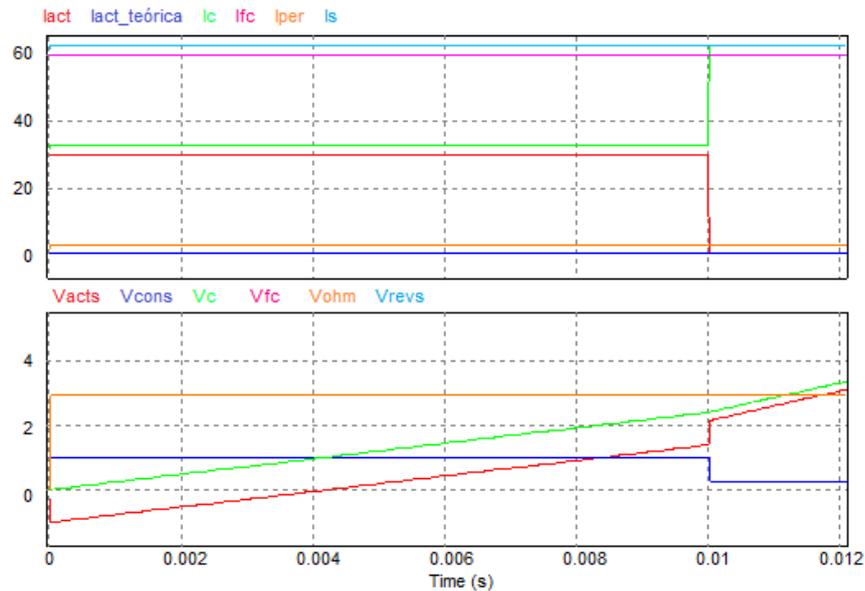


Figura 2.11- Conexión de la corriente de activación en $t= 10ms$

- 0.01s- 0.18s

En este instante se conecta el circuito por el que se obtiene el valor real de la corriente de activación. El sistema requiere de cierto tiempo para alcanzar el régimen permanente.

- Después 0.18s

La pila ha alcanzado el estado estacionario, los valores de tensión y corriente ahora son constantes, Figura 2.10.

2.5 Rendimiento

La eficiencia es un parámetro muy importante para definir un sistema e generación de energía ya que representa la energía útil obtenida para la energía primaria utilizada,

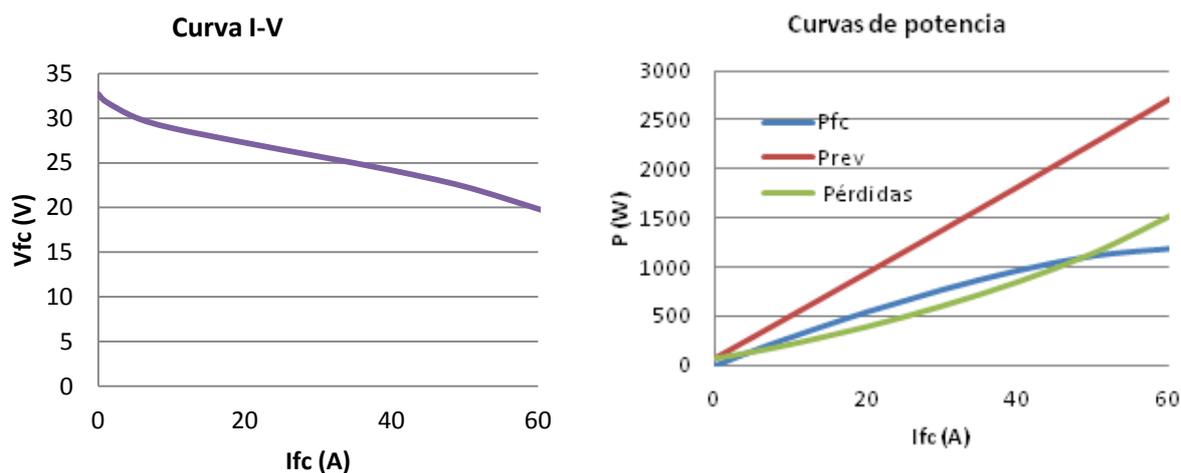
El rendimiento de una pila de combustible se define como la relación entre la potencia de salida y la de entrada al sistema,

2.5.1 Simulación para distintas corrientes

Se mide la tensión V_{fc} para distintas tensiones de salida ya que se pretende obtener la Curva I-V característica del sistema. Se mide además la potencia de salida de la pila, P_{fc} , así como la potencia neta generada en las reacciones electroquímicas, $P_{rev,s}$. La eficiencia del sistema puede obtenerse con la relación entre a potencia entregada P_{fc} y el total de potencia generada $P_{rev,s}$. Los valores obtenidos para una temperatura de 55 se recogen en la Tabla 2.3 y en la Figura 2.12.

I_{fc} (A)	V_{fc} (A)	P_{rev} (W)	P_{fc} (W)	Pérdidas(W)	Rendimiento (%)
0	32.71	65.5	0	65.5	0
5	30.1075	281	150.525	130.475	53.57
10	28.9	497.5	289	208.5	58.09
20	27.25	933.225	544.9	388.325	58.39
30	25.715	1372.315	771.435	600.88	56.21
40	24.16	1815	966.4	848.6	53.25
50	22.325	2261.1	1116.625	1144.475	49.38
60	19.825	2710	1189.5	1520.5	43.89

Tabla 2.3- Valores de salida de la pila de combustible a $T=55$



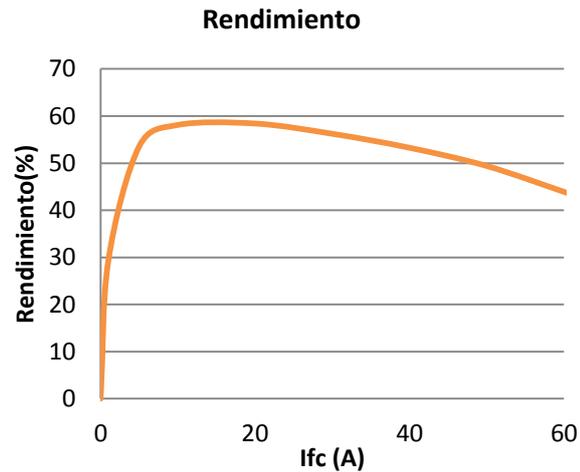


Figura 2.12- Valores de salida del sistema para $T=55$

- Influencia de la temperatura de operación

Un incremento en la temperatura de operación eleva la curva I-V de la pila, y por tanto su eficiencia [7]. Esto se explica por el incremento de energía cinética de las moléculas de los reactivos que aceleran el transporte de carga dentro de la pila de combustible. Como se deduce en la Figura 2.13, la temperatura óptima de las pilas es alrededor de 80 °C.

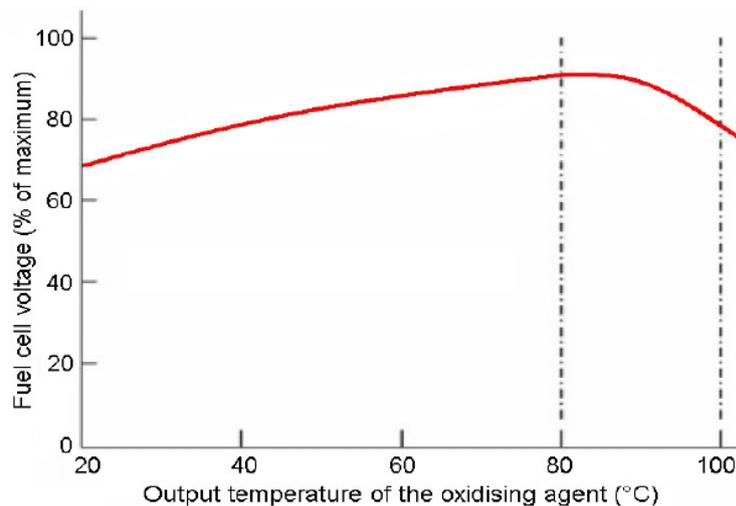


Figura 2.13-. Efecto de la temperatura sobre la tensión de salida de la pila de combustible [7]

Midiendo los valores de salida de tensión y potencia de la pila para diferentes temperaturas se comprueba como para bajas temperaturas la curva I-V desciende por lo que la potencia generada por la pila es menor y en consecuencia el rendimiento disminuye.

Se realiza la comparación de la tensión y potencia de la pila para dos temperaturas distintas, 55 and 25 . Los resultados se muestran en las siguientes gráficas:

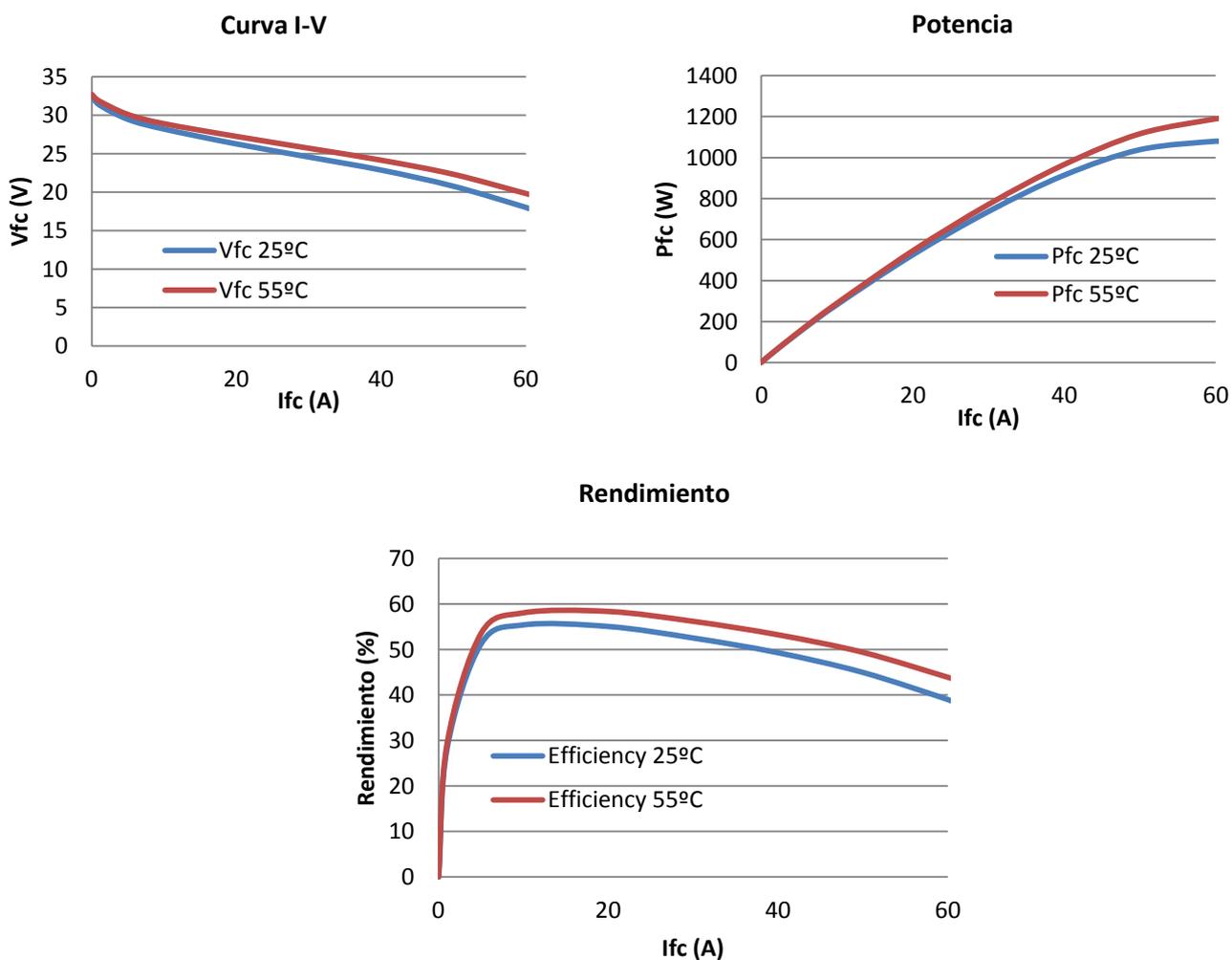


Figura 2.14- Comparación de V_{fc} y P_{fc} para 25 °C y 55 °C

2.5.2 Estudio de la pila de combustible a partir de datos empíricos

En un proyecto [5] realizado en la Universidad Pública de Navarra se analizaron las pilas de combustible disponibles en el laboratorio y se obtuvieron datos de tensión y consumo de combustible a partir de 5 experimentos para 5 temperaturas, 31.5 , 41 , 52.8 , 56.5 and 58.7 .

A partir de estos datos empíricos se obtienen diferentes gráficas en Matlab que muestran el comportamiento real de la pila de combustible, y permiten comparar los resultados obtenidos a partir de la simulación en la sección anterior.

Como ya ha sido explicado en la Sección 2.5, la temperatura afecta al comportamiento de la pila, tal y como se observa en la Figura 2.15.

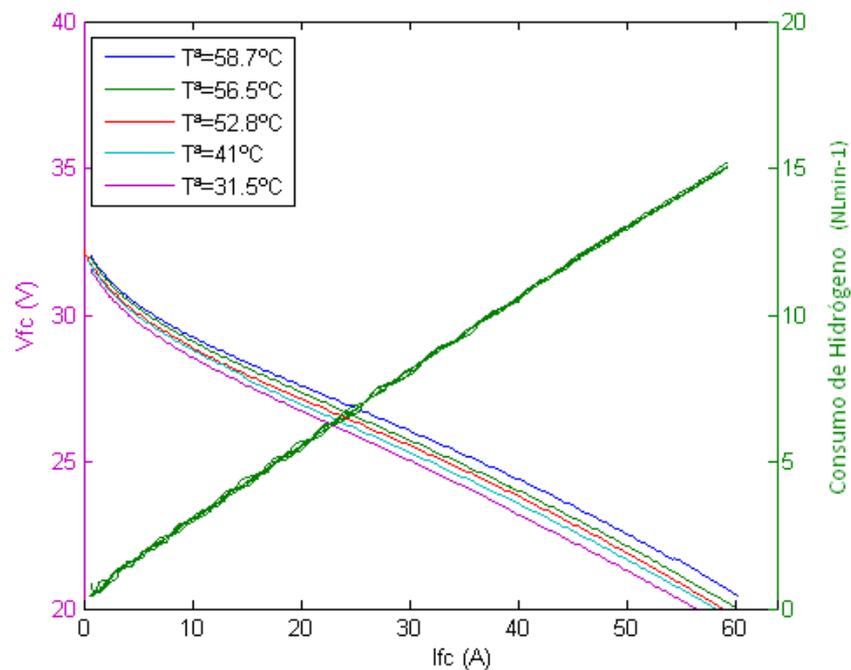


Figura 2.15- Curva característica I-V y consumo de hidrógeno para diferentes temperaturas

Se observa que el incremento de temperatura provoca el aumento de la tensión de salida de la pila.

Con los datos de tensión para los distintos valores de corriente de la pila, se calcula la potencia entregada por la pila.

A partir de los datos de consumo de hidrógeno de la pila de los que se dispone, se halla la potencia asociada, P_{H_2} . Para ello se utiliza el poder calorífico inferior,

- Rendimiento

El rendimiento se define como el cociente entre la potencia de salida y entrada, es decir, entre la potencia eléctrica y la potencia de hidrógeno, ecuación (2.18).

Es importante destacar que los datos de la potencia eléctrica utilizados tienen en cuenta la potencia de pérdidas de periféricos que se produce internamente en la pila de combustible.

Cabe resaltar que la potencia de hidrógeno es independiente de la temperatura, mientras que la potencia eléctrica de la pila, obtenida a través de la tensión y corriente de la pila, sí que varía en función de la temperatura, como ha sido mostrado en la figura anterior.

Por tanto, dado que los datos son para 5 temperaturas distintas, se obtendrán 5 curvas diferentes de rendimientos.

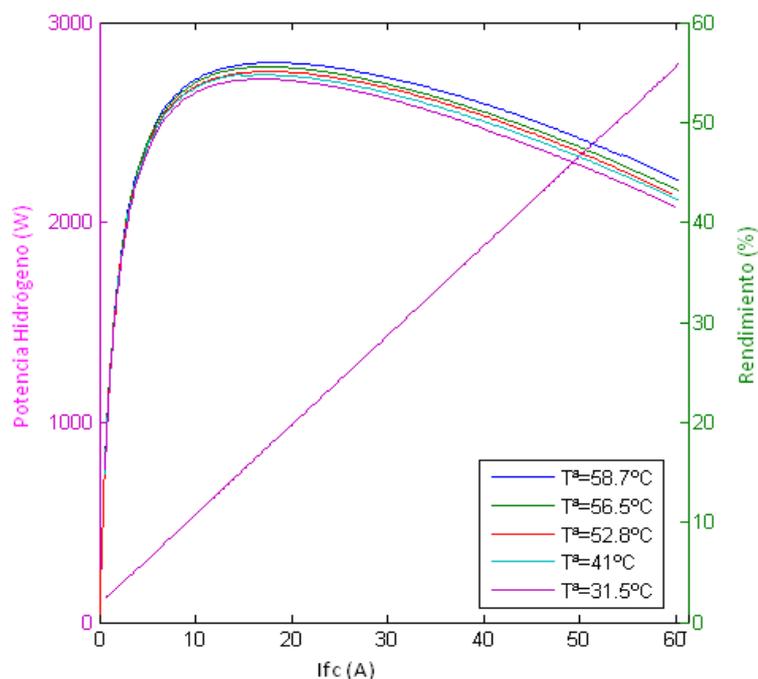


Figura 2.16- Rendimiento y potencia de hidrógeno para distintas temperaturas

Las pilas de combustible se controlan a través de la potencia entregada, debido a esto, es interesante representar los parámetros importantes como la eficiencia y la potencia del combustible frente a la potencia de la pila, (Figura 2.17).

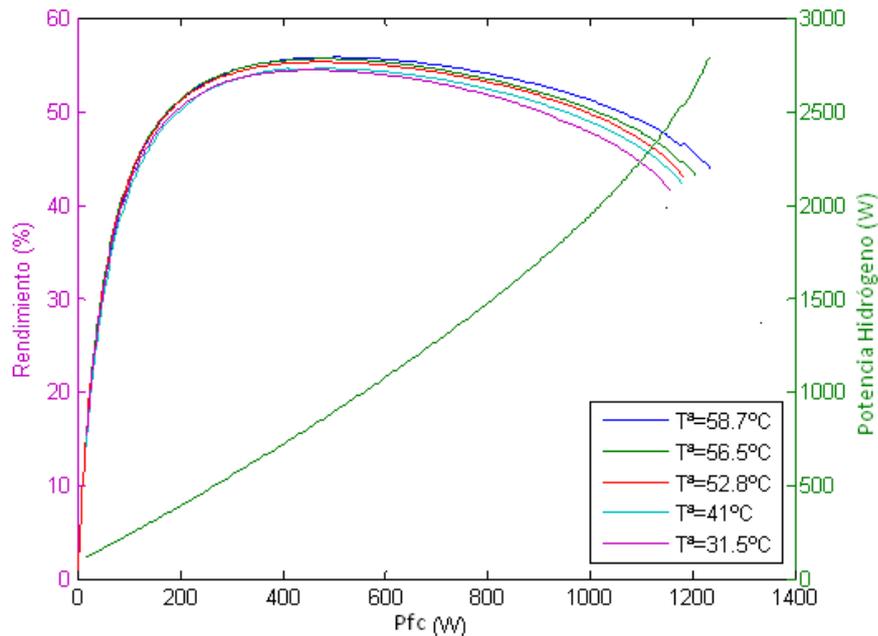


Figura 2.17- Potencia hidrógeno y rendimiento frente a la Pfc

Se observa como cuando la potencia generada aumenta, el hidrógeno que debe ser suministrado lo hace de forma proporcional. Esto es debido al fenómeno de concentración.

- Periféricos

En el esquema eléctrico de la pila de combustible descrito en la Sección 2.2 se han modelado las pérdidas de periféricos mediante una fuente de corriente en paralelo a la salida de las pilas.

Para hallar el valor de la potencia de periféricos será necesario calcular previamente la corriente de periféricos, a través de la ecuación (2.17).

Para ello, primero se establecen unos valores de corriente I_{fc} que se evaluarán. Se calcula la densidad de corriente asociada a cada punto teniendo en cuenta que el área del conductor es 145 cm^2 .

Introduciendo los valores de densidad de corriente en la Figura 2.18, se determina la temperatura asociada a cada punto.

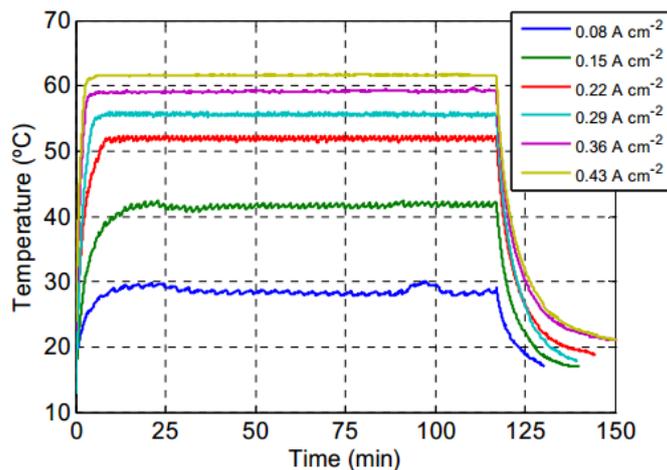


Figura 2.18- Temperatura de operación para diferentes densidades de corriente [5]

Una vez conocida la temperatura de operación se puede acudir a la curva I-V característica de la pila, (Figura 2.15), para determinar la tensión según las condiciones de corriente y temperatura.

IFC (A)	Densidad de IFC(A/cm ²)	Temperatura (°C)	VFC (V)
0	0	-	32
5	0.034	22	29.5
10	0.07	40	27
15	0.1	32	27.5
20	0.138	40	27
30	0.207	49	25.5
40	0.276	54	23.9
50	0.34	57	22.5
60	0.41	60	21

Tabla 2.4- Valores de corriente y tensión de la pila para distintas temperaturas.

Por último, se obtiene la potencia de pérdidas de periféricos P_{per} , para ello es necesario calcular la corriente de periféricos I_{per} , por medio de la ecuación (2.17), y sustituir el valor en la siguiente ecuación:

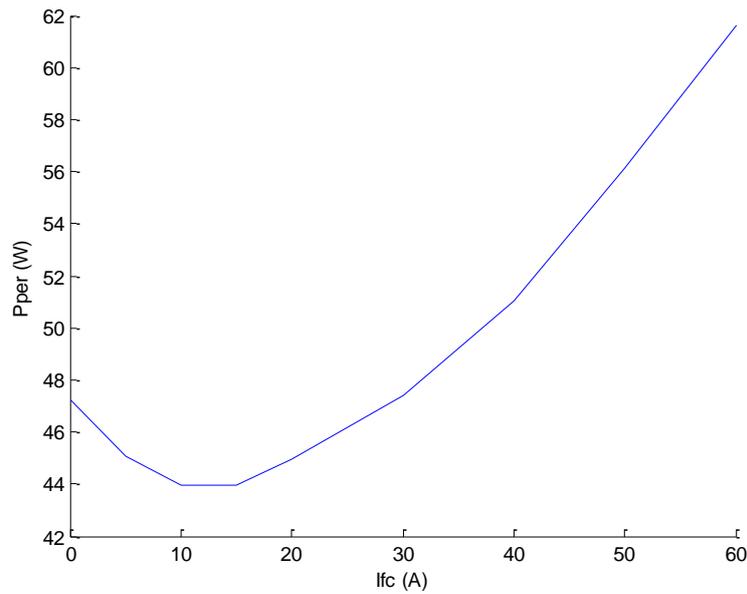


Figura 2.19- Potencia de periféricos respecto a la corriente I_{fc}

- Balance de pérdidas

Primero, se suministra la potencia de hidrógeno necesaria al sistema. Sin embargo, la potencia eléctrica útil es menor, ya que las pilas de combustible presentan unas pérdidas internas además de unos periféricos que deben ser alimentados. Como ha sido estudiado, la potencia de pérdidas dentro de la pila es debida al fenómeno óhmico, al de activación y al de concentración.

La potencia asociada a las pérdidas se puede obtener realizando el siguiente balance de potencias:

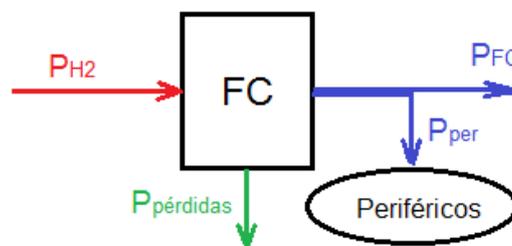


Figura 2.20- Balance de potencias del sistema

En la siguiente Figura 2.20 se muestran todas las potencias del sistema así como las pérdidas internas. Es destacable que la potencia de consumo de hidrógeno y periféricos es constante mientras que la potencia entregada y las pérdidas dependen de la temperatura. En concreto, para bajas temperaturas de operación la potencia entregada es menor y las pérdidas mayores.

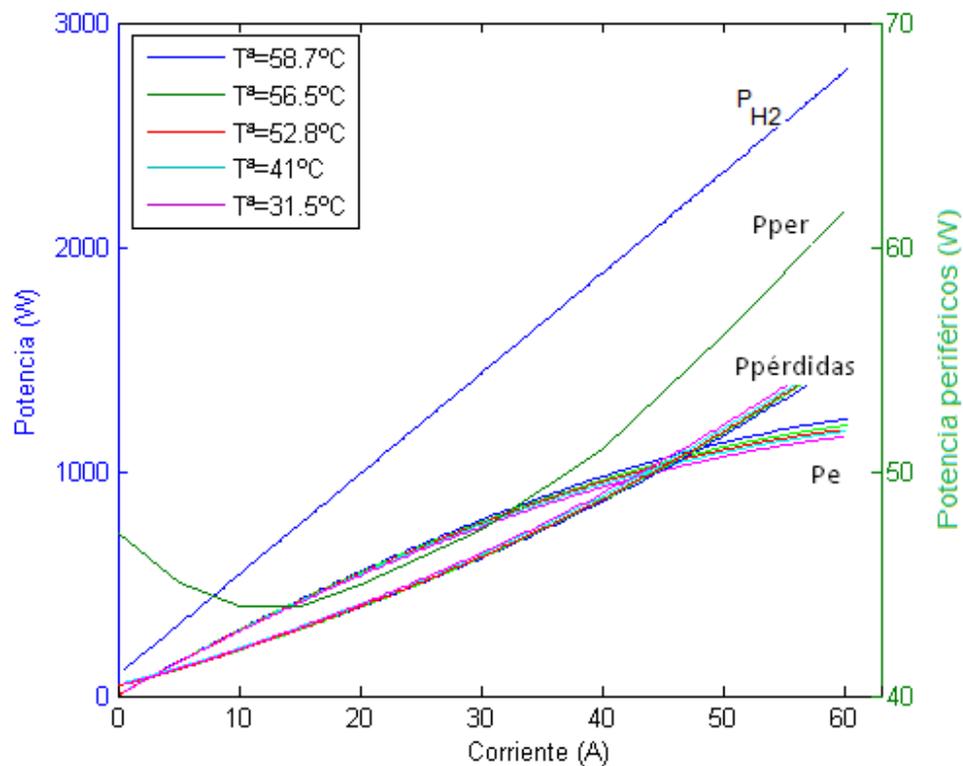


Figura 2.21- Potencia eléctrica, hidrógeno, periféricos y pérdidas

2.5.3 Otros factores que afectan a la eficiencia

La eficiencia de una pila de combustible está fuertemente relacionada con la corriente entregada y la temperatura de operación, como ha sido explicado en el capítulo anterior. Existen además otros factores de los que depende el rendimiento:

- Efecto de la presión

La curva I-V de la pila de combustible aumenta al hacerlo la presión de operación, como se observa en la Figura 2.22. Además, el consumo de combustible será menor (Figura 2.22). En consecuencia, la eficiencia de la pila PEM es mejor para altas presiones.

Por otra parte, para presiones mayores a 22PSI, (1PSI=6.89 kPa), un incremento en la presión afecta negativamente a la pila ya que ésta no está preparada para trabajar en esas condiciones.

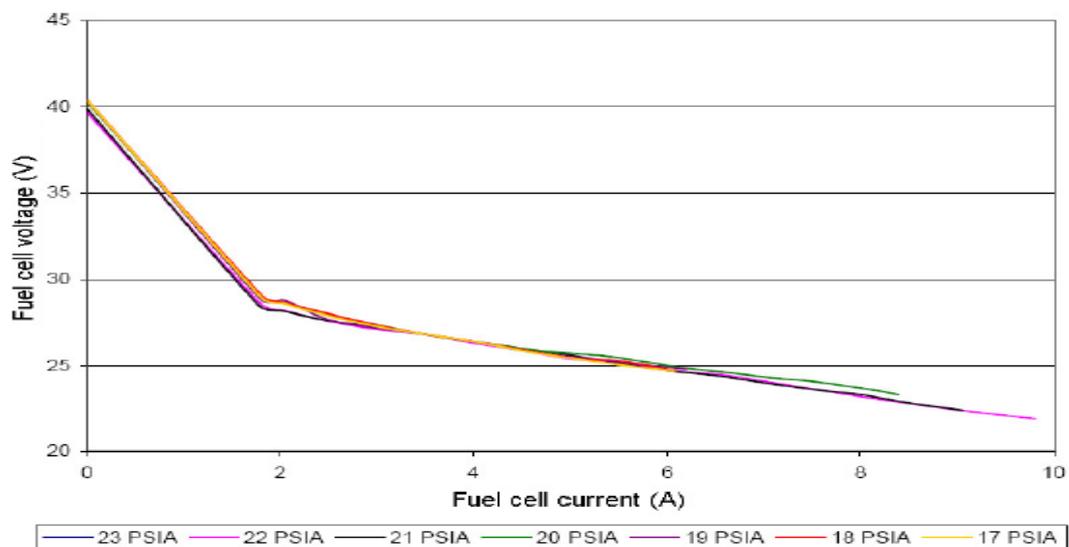


Figura 2.22- Comportamiento de la pila de combustible dependiendo de la presión del hidrógeno de entrada[7]

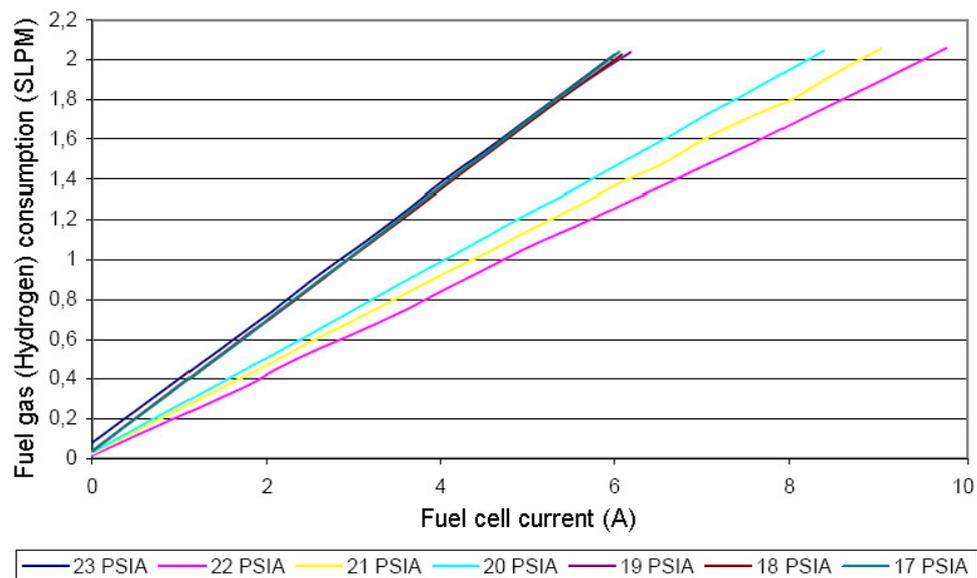


Figura 2.23- Consumo de hidrógeno para distintas presiones[7]

- Efecto del oxígeno

Las pilas de combustible están provistas de un sistema de control que garantiza una presión determinada entre ánodo y cátodo para prevenir daños en la membrana. Esto implica que la corriente por la pila y el flujo de oxígeno determinan la cantidad de hidrógeno, por ello el flujo de oxígeno es una variable importante de control [8].

A la relación entre el oxígeno entregado por la bomba de aire y la cantidad que reacciona se le denomina ratio de exceso de oxígeno,

El valor del ratio debe tomar valores mayores que 1, dado que en caso contrario se produciría una falta de oxígeno. Por otro lado, tomar valores demasiado altos puede provocar la saturación de la bomba de aire.

En la siguiente figura se representa la potencia útil, P_{fc} , frente al ratio de exceso de oxígeno, λ_{O_2} , para distintas corrientes, I_{fc} .

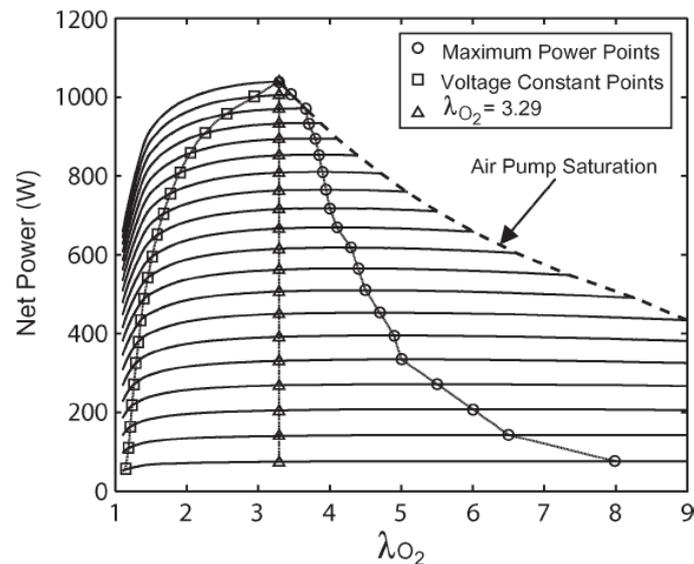


Figura 2.24- Ratio de exceso de oxígeno para diferentes corrientes

Se observa que para una potencia dada el ratio de exceso de oxígeno óptimo corresponde con el punto de mínima corriente, es decir, el determinado por la curva de máxima potencia. Por ejemplo, dada una potencia de 610 W, el punto de máxima potencia corresponde con un valor de corriente de 17.5 A y un ratio, Sin embargo, ésta

potencia también puede ser suministrada por otros puntos de operación, como el correspondiente a una corriente de 19 A y .

Por tanto, se comprueba que controlando para seguir la curva de máxima potencia, se consigue una reducción en el consumo de combustible ya que es proporcional a la corriente de la pila.

- **Efecto de la humedad**

El funcionamiento de una pila PEM requiere que el flujo de gas contenga cierta humedad [7]. La membrana de la pila se humedece con moléculas de agua que transportan los iones de hidrógeno durante la reacción. Insuficiente humedad puede provocar la deshidratación de la membrana lo que conlleva rupturas y perforaciones en la misma.

Por otra parte, demasiada agua podría saturar los canales. Esto puede causar un fenómeno conocido como *reverse cell*, cuando una celda afectada produce tensión negativa y puede llegar a comportarse como un electrolizador. La pila de combustible podría llegar a estropearse por la gran cantidad de calor que se produce.

Por tanto se concluye que para conseguir un buen comportamiento y rendimiento de la pila el nivel de humedad de ser alto, pero nunca sobrepasar ciertos límites.

CAPÍTULO 3

CONEXIONADO DE PILAS

3.1. TIPOS DE CONEXIONES, VENTAJAS E INCONVENIENTES. ESTADO DEL ARTE

Dependiendo de la aplicación, se requieren diferentes corrientes y tensiones de las pilas de combustible. Además, las pilas conectadas a la red necesitan una etapa de conversión que transforme la potencia generada en DC a AC. Las pilas de combustible pueden conectarse de distintas formas para conseguir la tensión o corriente deseada.

Particularmente, el sistema disponible en la universidad se conectará a red por lo que es necesaria dicha etapa de conversión además de una forma de aumentar la tensión de salida. Para ello, se describen las configuraciones más comunes se describen a continuación [9].

3.1.1 Configuración con distribución en DC

En esta configuración cada pila está conectada a un convertidor DC/DC. De esta forma si sucede un problema en la pila o en el convertidor, no afectará al sistema completo sino que éste podrá seguir operando aunque generando menor potencia.

Los convertidores se conectan a un Bus de continua donde se concentra la potencia generada. Sin embargo, el valor de tensión del Bus suele ser menor que el obtenido por la configuración Serie.

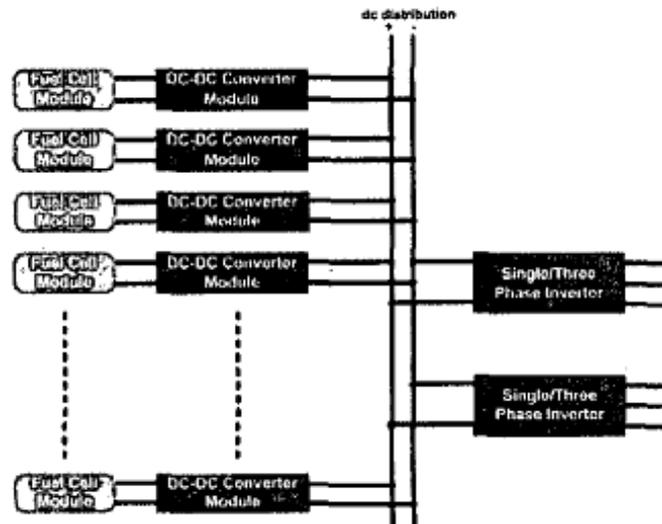


Figura 3.1- Diagrama de la configuración de la distribución en DC[9]

3.1.2 Configuración con distribución en HFAC

Esta configuración es parecida a la anterior. La diferencia radica en que a cada pila se conecta un inversor de alta frecuencia que inyecta la potencia a un Bus de alterna.

Las ventajas que presenta introducir un Transformador de Alta Frecuencia es que los valores de tensión pueden ser incrementados.

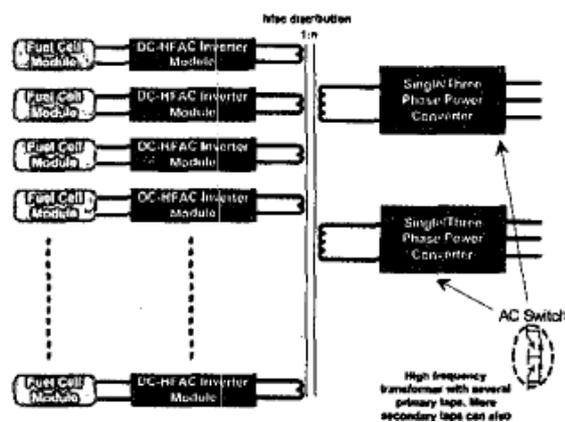


Figura 3.2- Diagrama de la configuración con distribución HFAC[9]

3.1.3 Configuración con convertidor multinivel en cascada

Esta disposición es una variación de la configuración con distribución en DC. En vez de conectar los convertidores a un Bus de continua, éstos se disponen conectados en serie, por lo que la tensión de salida alcanza mayores valores.

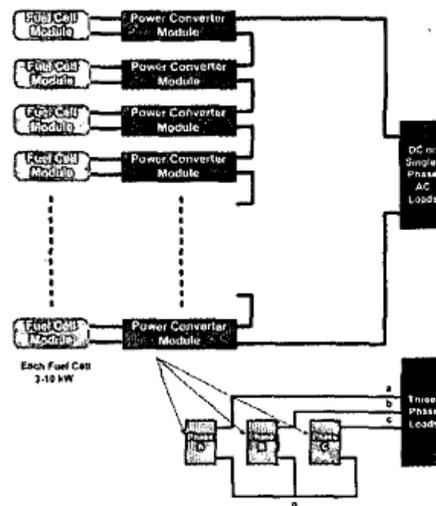


Figura 3.3- Diagrama de la configuración con convertidor multinivel en cascada[9]

3.1.4 Conexión en serie

En esta configuración todas las pilas se encuentran conectadas en serie por lo que la corriente que circula a través de ellas será la misma y por el contrario la tensión de salida del sistema global será la suma de la tensión de cada una de ellas. Sin embargo, si se produce un problema en una de las pilas afectará al resto del sistema.

Todas las pilas se conectan a un único convertidor por lo que ante un fallo todo el sistema quedará anulado.

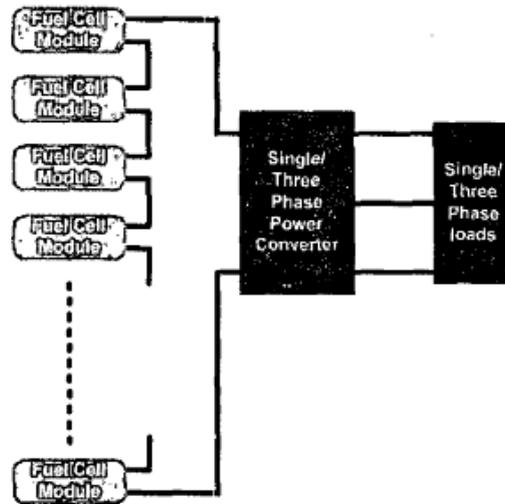


Figura 3.4- Diagrama de la configuración en serie

3.1.1.1 Tipos de configuraciones en serie

El sistema real del que se dispone en la Universidad Pública de Navarra (Sección 2.4) está dirigido a trabajar con una configuración en serie con el objetivo de obtener una tensión de salida más alta.

Existen diferentes configuraciones que pueden ser implementadas [10] como se muestra en el siguiente esquema:

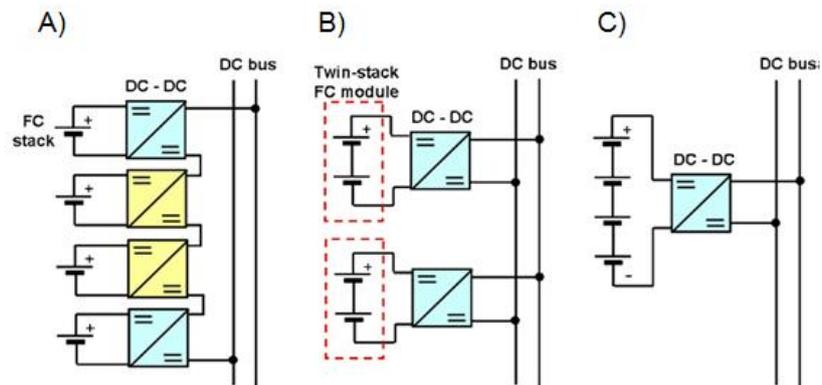


Figura 3.5- Tipos de configuraciones en serie

La opción A) consiste en un convertidor DC/DC para cada pila de combustible. Los convertidores permiten realizar un control sobre el nivel de tensión además de proporcionar aislamiento cuando se produce un fallo en una pila. Esta técnica es recomendable para

aplicaciones que requieran de un suministro eléctrico continuo y fiable como edificios u hospitales.

La segunda opción propuesta B) presenta un convertidor DC/DC para dos pilas de combustibles conectadas en serie. De esta forma se reduce el número de convertidores necesarios, por lo que se abarata el sistema, sin embargo la tensión de salida va a ser menor ya que los convertidores se encuentran conectados en paralelo a un Bus de continua.

La última configuración C) utiliza un convertidor DC/DC para todo el conjunto de pilas. De esta forma la tensión de salida aumenta pero un fallo en algún elemento del sistema provoca el fallo de todo el conjunto. Por ello es necesario colocar una protección extra al sistema.

3.2 Conexión del sistema real

Se determina la configuración C) de la Sección 3.1 como la más adecuada para el sistema real de la UPNA. Dicha elección se basa en que se trata de la configuración más económica y que la tensión de salida puede alcanzar los valores deseados.

Las principales ventajas de esta configuración son su modularidad y simplicidad.

Por el contrario, el problema que plantea es que las cuatro pilas deben generar la misma corriente, por lo que un fallo en una de las pilas impide que el sistema pueda continuar operando. La pila que presenta el fallo debe ser reemplazada o sorteada de forma externa.

La importancia de conseguir evitar que los fallos de una pila afecten al resto del sistema reside en:

- Proteger los componentes internos de la pila, los cuales son muy sensibles ante un mal funcionamiento ya que puede provocar fallos en la membrana.
- Garantizar que el sistema entregue cierta potencia (tiene especial importancia en el sector del transporte y para cargas críticas).

Uno de los fallos más comunes producidos en una pila de combustible consiste en la disminución de la tensión por debajo de un valor mínimo permitido alcanzando incluso lo que se denomina como tensión inversa, este efecto contamina al resto del sistema.

Existen diferentes técnicas para proteger a las pilas de combustible de la tensión inversa, tal como insertar un diodo en anti-paralelo a cada celda (externo o integrado) o introducir un catalizar en el ánodo.

3.2.1 Diodo anti-paralelo externo

En las pilas PEM, si una celda falla, el flujo de corriente a través de la membrana convierte el hidrógeno y oxígeno en agua. El oxígeno pasa al ánodo de la siguiente celda a través de un conducto por lo que se produce la recombinación del oxígeno con el hidrógeno en el ánodo de la celda que no presentaba ningún fallo provocando una disminución en la corriente generada que termina anulándose.

Existen diferentes opciones que incluyen un Diodo AP como solución. Estas opciones varían en precio y dificultad técnica además de por la aplicación para la que vaya a ser utilizada.

Para evitar que esta reducción de corriente afecte al resto de celdas conectadas se colocan diodos en paralelo para cada celda de forma que la corriente generada no produzca un corto circuito [11] y ésta circule por los diodos haciendo invisible para el resto del sistema, la pila con problemas.

Por tanto, cuando una pila de combustible falla se apaga mientras las otras continúan operando, ya que el diodo en anti-paralelo permite el paso de la corriente de las pilas que se encuentren desconectadas.

Durante los momentos en los que no se produzca ningún problema no circula corriente por el diodo y la pila se comporta como una fuente de corriente.

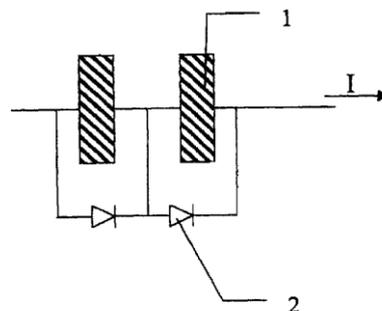


Figura 3.6- Diodo en antiparalelo [11]

Otra opción que presenta mayor complejidad consiste en monitorizar la tensión de la pila de combustible para que cuando la tensión de una celda disminuya, la pila se desconecte y el diodo AP comience a conducir [12-15].

Sin embargo, el apagado de los diodos no se produce de forma instantánea, ya que depende de la impedancia interna de la pila así como de la amplitud de corriente de la carga. Por tanto, es necesario añadir diodos en serie con las pilas, para así aumentar la tensión umbral que permite que el diodo AP comience a conducir.

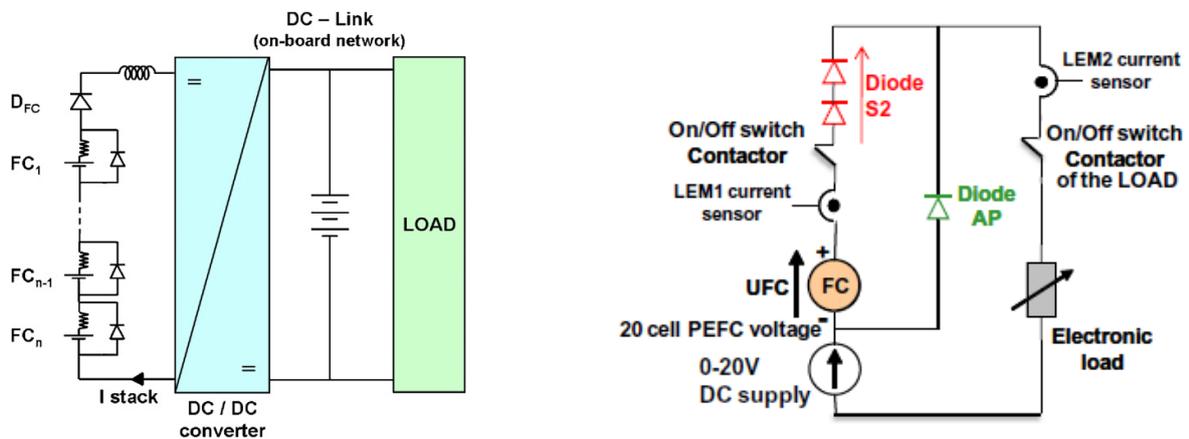


Figura 3.7- Topología del circuito eléctrico de la PEMFC, el diodo AP y los interruptores

Algunas empresas optan por incluir un sistema de interruptores compuesto por un controlador, un monitor y un interruptor para cada pila [15]. Este sistema implementa un método de control que monitoriza la tensión de la pila por lo que es capaz de desconectar las pilas que presenten problemas para reconectarlas una vez solucionado el fallo. Si tras la reconexión el fallo permanece durante varias veces, pasa a operar en un modo de capacidad reducida. Además el control puede determinar el número de pilas conectadas cuando se produce un cambio en el valor de la corriente, para obtener el valor de tensión deseado a la salida.

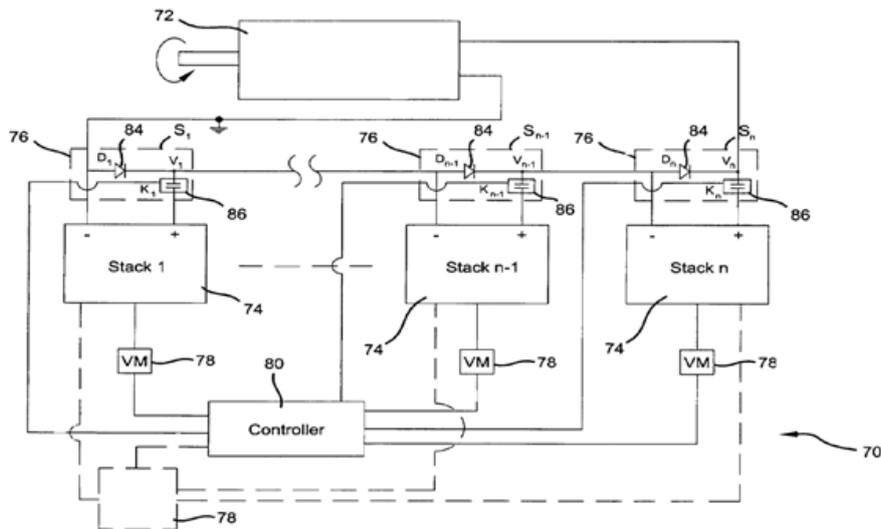
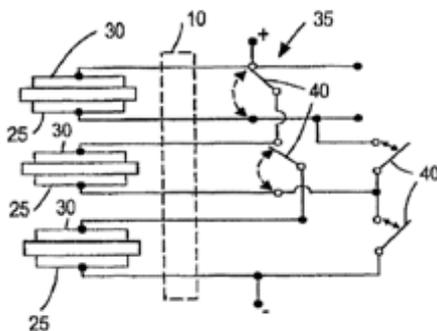


Figura 3.8- Sistema de interruptores [15]

Para aplicaciones donde la tensión de salida debe variar, esta estructura resulta interesante [16] ya que las pilas de combustible pueden conectarse tanto en serie como en paralelo, como se muestra en la Figura 3.9.

Además, esta estructura incluye interruptores controlados que conectan los diodos AP cuando se produce tensión inversa.



10: Carcasa de aislamiento

25: Ánodo

30: Cátodo

35: Circuito by-pass

40: Elemento de control

55: Diodo

50: Convertidor

Figura 3.9- Estructura de conexión serie-paralelo [16]

3.2.2 Diodo integrado

En vez de conectar el diodo AP de forma externa, puede ser integrado a la estructura de la celda [17]. Esto presenta la ventaja de que la conexión eléctrica es directa por lo que no es necesario el bus ni cables para la conexión. De esta forma se consigue una reducción en el volumen peso y coste del sistema.

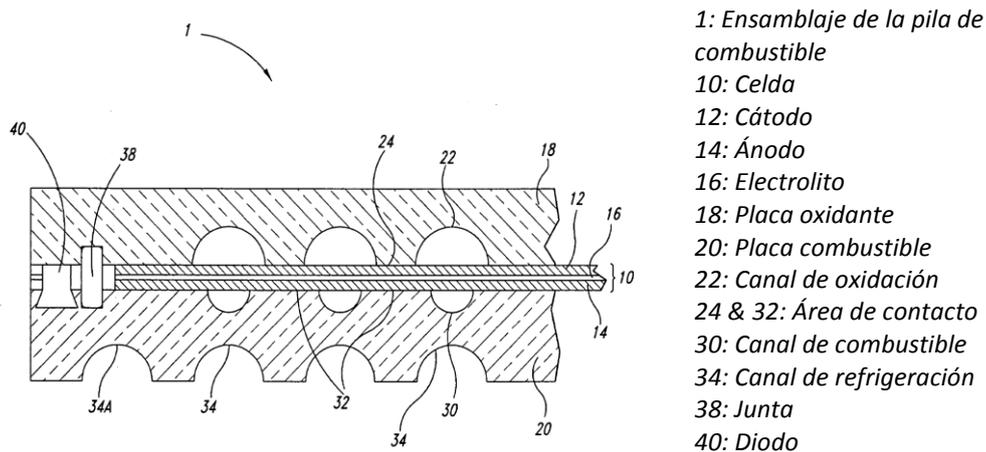


Figura 3.10- Diodos de protección integrados en la pila de combustible [17]

3.3. Estrategia de conexión

En el Capítulo 2 se ha analizado el comportamiento de una pila de forma individual. El sistema real dispone de 4 pilas de combustible idénticas, por lo que se pretende variar el número de pilas conectadas en serie con el objetivo de trabajar en los puntos de mayor rendimiento. Para ello es necesario realizar un estudio de las distintas configuraciones posibles y analizar para cada potencia eléctrica cuantas pilas deben ser conectadas de forma que se trabaje en los puntos que maximizan el rendimiento.

La forma en la que se defina el rendimiento determina fuertemente la curva del mismo. Dicha diferencia radica en la forma de entender el comportamiento de una pila de combustible cuando se encuentra apagada. Los dos supuestos planteados son los siguientes:

a. Consumo nulo durante el apagado

Esta opción plantea que las pilas de combustible que no se encuentren generando tensión van a tener una repercusión nula sobre el resto del sistema. Esto supone que el consumo de hidrógeno tan solo sería el asociado a las pilas conectadas.

Esta opción puede plantearse cuando se puede realizar una predicción de carga, ya que el encendido de la pila requiere de algo de tiempo por lo que podría no responder si se requiere de su energía de forma rápida.

Por tanto, la potencia eléctrica total del sistema será la suma de todas las potencias de cada pila conectada. Análogamente la potencia de hidrógeno total del sistema será la suma de la de todas las pilas que se encuentre conectadas.

De esta forma se deduce que el rendimiento no va a sufrir cambios ante la conexión de más de una pila en serie dado que la potencia eléctrica y la potencia del combustible aumentan o disminuyen lo mismo.

siendo N_s el número de pilas conectadas en serie.

Este análisis se realiza para las cinco temperaturas diferentes de trabajo. Cabe recordar que la potencia asociada al combustible no presenta dependencia con la temperatura por lo que se obtendrán únicamente 4 curvas representado la conexión de 1 hasta 4 pilas en serie, Figura 3.11.

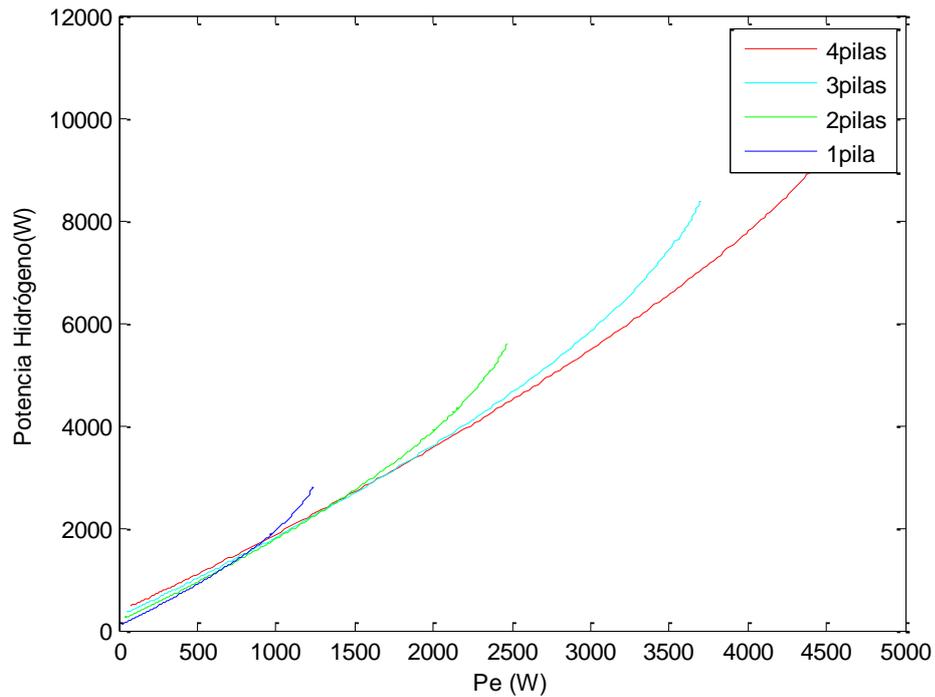


Figura 3.11- Potencia de hidrógeno para la conexión de 1 hasta 4 pilas de combustible

Se observa que a potencia asociada al combustible no varía con la temperatura además de que la relación entre el hidrógeno consumido y la potencia entregada aumenta para potencias altas.

Por el contrario, el rendimiento varía en función de la temperatura, por lo que se dispondrá de 5 casos, uno para cada temperatura, Figura 3.12.

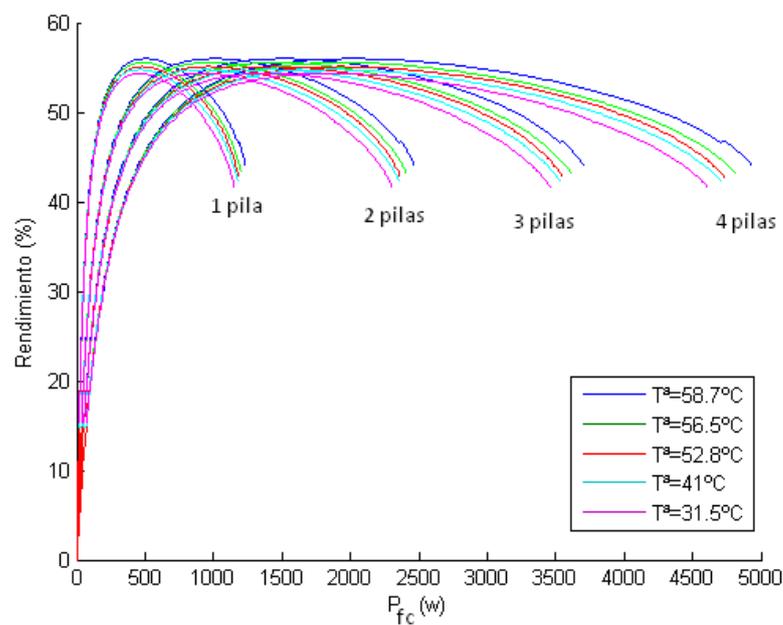


Figura 3.12- Rendimiento vs. potencia eléctrica para la conexión de 1 a 4 pilas en serie: Opción A

Como se puede observar, la eficiencia del sistema para diferentes pilas conectadas varía mucho con la temperatura. De hecho, para una temperatura de 31.5 °C la potencia será menor que para 58.7 °C. Además, los puntos de corte de las curvas de rendimiento difieren según la temperatura.

Para observar de forma más clara la dependencia de las curvas de rendimiento con la temperatura se incluye la siguiente Figura 3.13.

Para explicar de una forma más clara el estudio realizado, se presenta el siguiente ejemplo:

La potencia demandada en un instante dado es 1100 W, como se muestra en la Figura 3.11, para alcanzar esa potencia, el combustible necesario varía en función del número de pilas que se encuentren operativas. Para el caso de una pila conectada, el suministro de hidrógeno debe ser mayor que para el sistema con más pilas operando. En consecuencia, observando la siguiente figura se determina que la conexión más eficiente para esa potencia determinada es de 2 pilas conectadas en serie. De este modo se demuestra la utilidad de conectar y desconectar las pilas del sistema para obtener la máxima eficiencia del sistema.

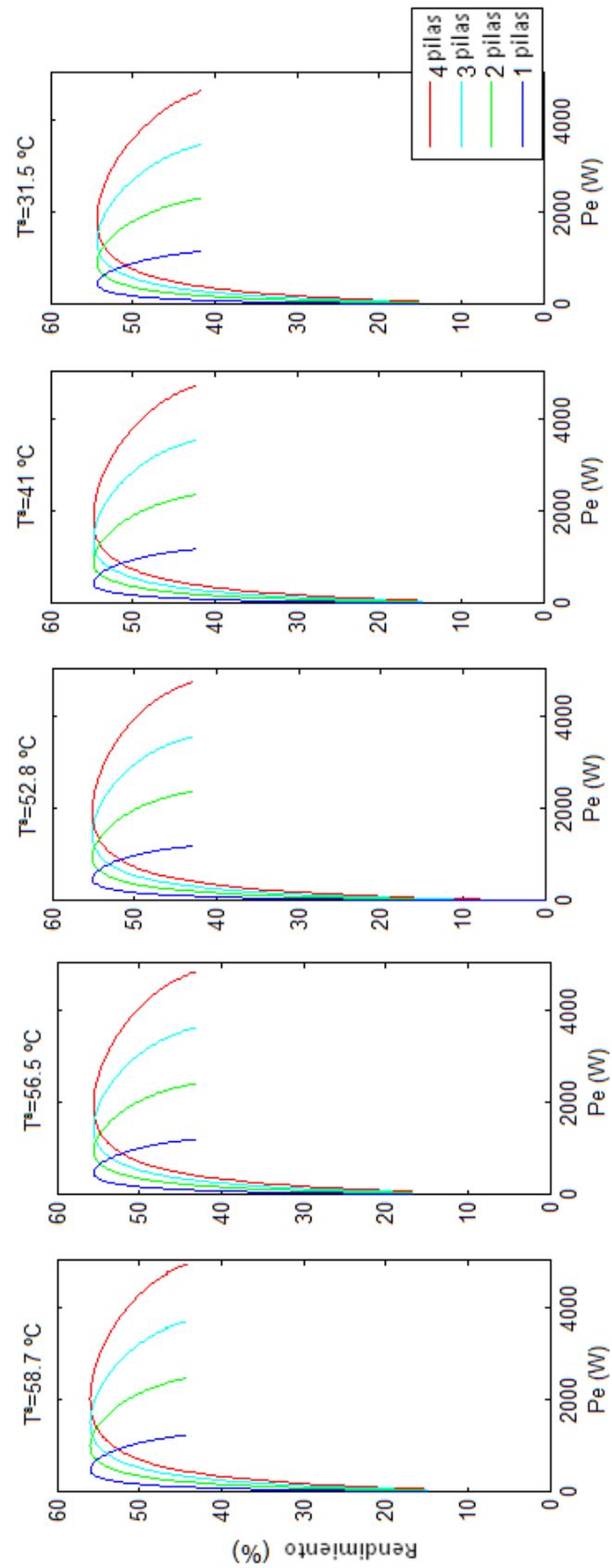
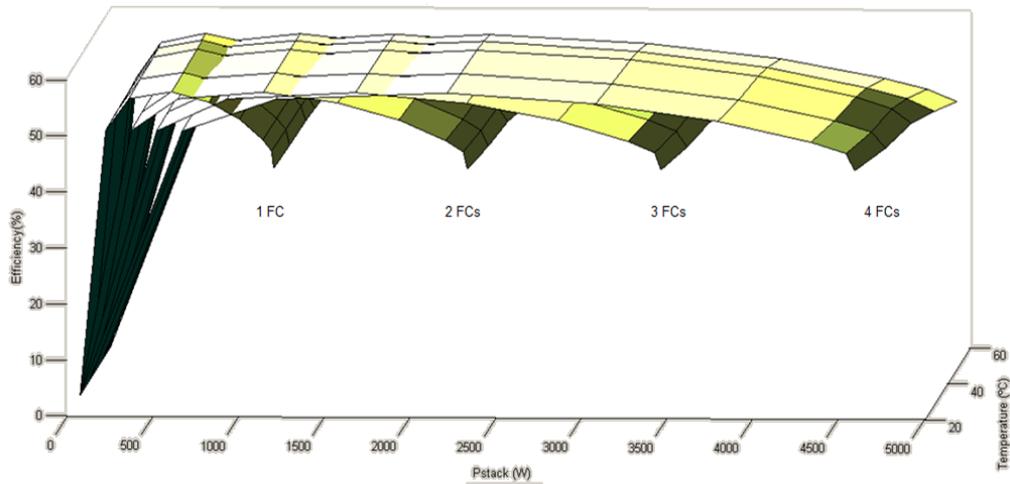
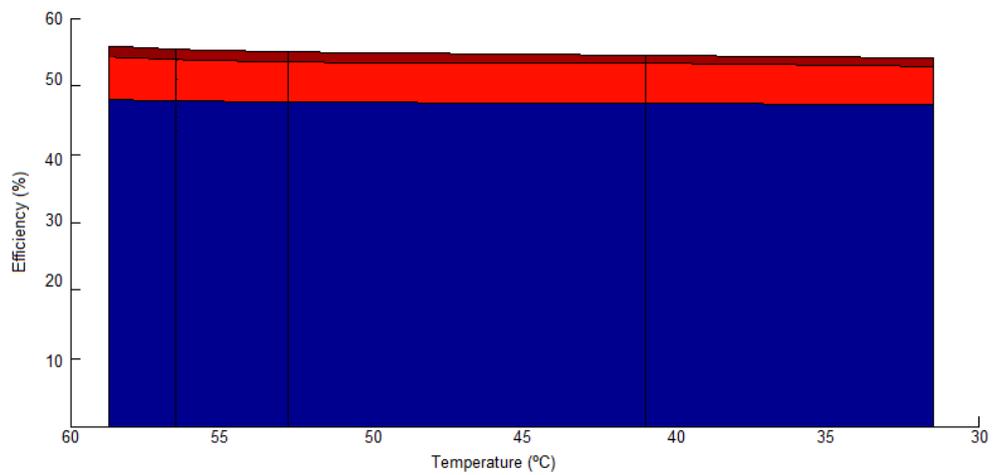


Figura 3.13- Rendimiento vs. Potencia eléctrica, para diferentes temperaturas. Opción A

Las curvas anteriores se han realizado en tres dimensiones, donde los puntos de trabajo de máxima eficiencia se muestran en la Figura 3.14 (a) y la influencia de la temperatura se observa de forma más clara en (b).



(a) Puntos de trabajo de máxima eficiencia



(b) La influencia de la temperatura sobre la eficiencia

Figura 3.14- Gráfica 3D de la Eficiencia vs. Potencia eléctrica vs. Temperatura

b. Consumo mínimo asociado a los periféricos durante el apagado

Como en el caso anterior, se va a estudiar el efecto sobre el rendimiento y la potencia de combustible al ir añadiendo al circuito pilas en serie. La diferencia reside en que para este análisis se entenderá que cuando una pila se encuentra desconectada sí que presenta un consumo, el correspondiente al consumo de los periféricos.

Por tanto, cuando una pila se encuentra desconectada, consume una potencia correspondiente al consumo de periféricos para 0A, el cual presenta un valor de 47.4 W.

donde n es el número de pilas desconectadas.

Para una cantidad de combustible, en este caso se va a obtener menor potencia a la salida que para el caso anterior.

En la Figura 3.15 se representa la potencia de hidrógeno para la conexión de 1 a 4 pilas de combustible en serie.

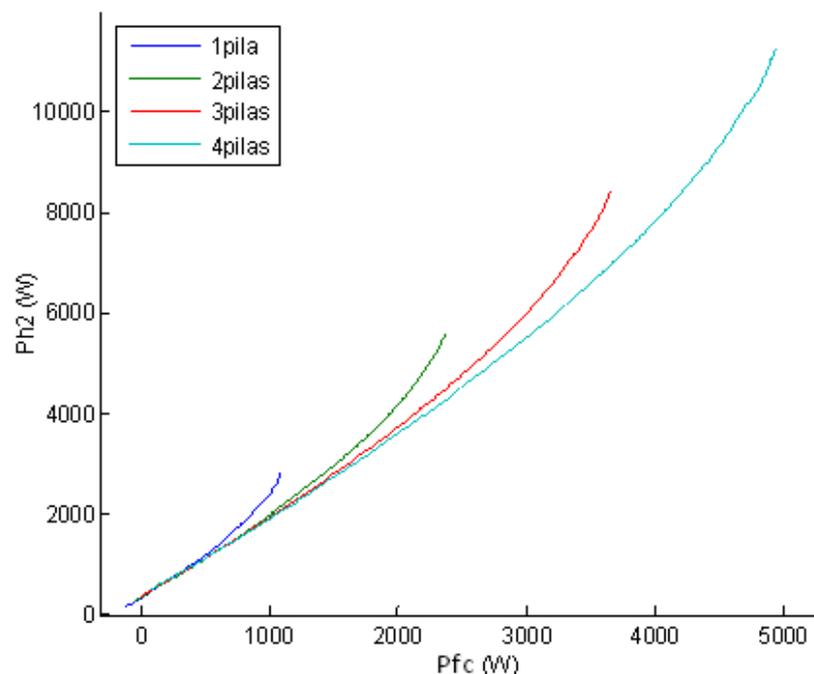


Figura 3.15- Potencia de hidrógeno para la conexión de 1 a 4 pilas en serie

Se observa como para puntos de trabajo muy bajos se dan potencias de salida de la pila negativas, esto es debido a que para dichos puntos la potencia eléctrica generada es menor que la consumida por los periféricos de las pilas que se encuentran desconectadas.

Como para el caso anterior, se realiza una gráfica de la eficiencia del sistema para distinto número de pilas conectadas con respecto a la potencia generada.

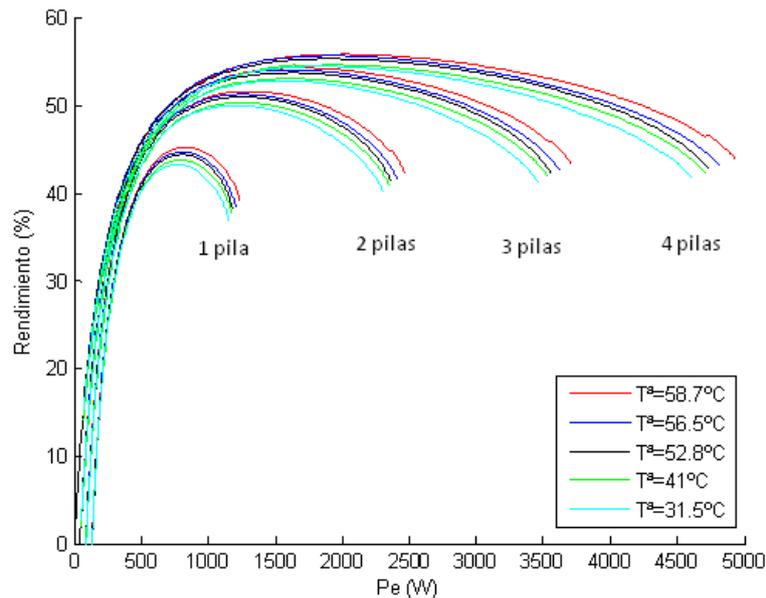


Figura 3.16- Rendimiento vs. potencia eléctrica para 1 a 4 pilas conectadas en serie: Opción B

Se observa que para este caso, para todos los requerimientos de potencia eléctrica de salida, la conexión que presenta mayor eficiencia es la de las cuatro pilas en serie, por lo que no tendría sentido dejar ninguna pila del sistema desconectada.

Como conclusión para este capítulo es importante destacar que se ha descrito una estrategia para la máxima eficiencia a partir de la regulación de la conexión de las pilas de combustible, es decir, variando el número de pilas conectadas en lugar de tener el sistema completo operando.

Analizando la eficiencia para distinto número de pilas conectadas se obtienen rangos de potencia que delimitan el número de pilas que maximizan el rendimiento del sistema.

Estos rangos de potencia serán de utilidad en el Capítulo 5 donde se implementa el control de potencia para el seguimiento del punto de máxima eficiencia. (MEPT)

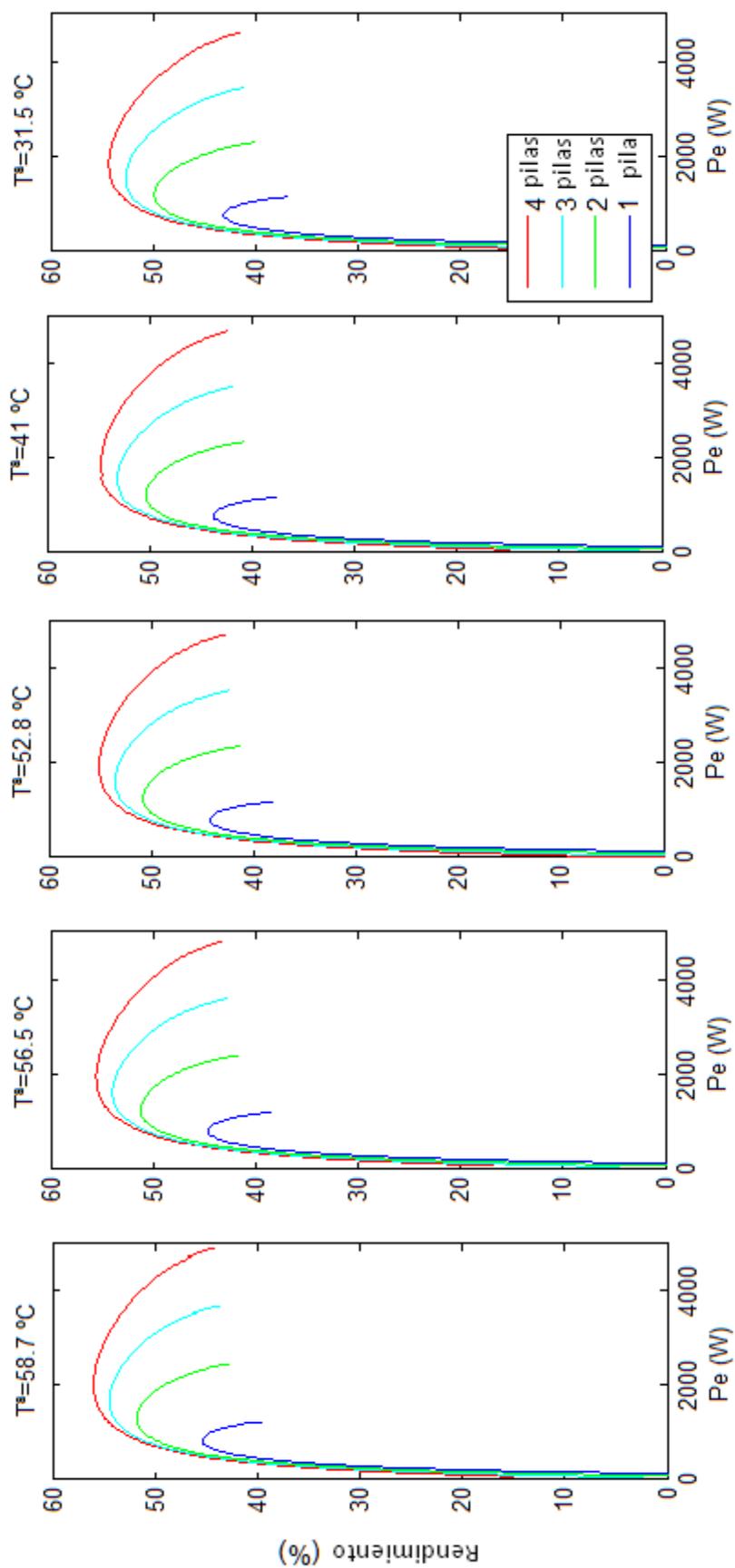


Figura 3.17- Rendimiento vs. Potencia eléctrica para diferentes temperaturas: Opción B

CAPÍTULO 4

CONVERTIDOR RESONANTE DE ALTA FRECUENCIA CON AISLAMIENTO

4.1 Convertidores electrónicos de potencia para pilas de combustibles

Existen diversas configuraciones adecuadas para la conexión de pilas de combustible. En este trabajo se describen las distintas arquitecturas que presentan etapas de conversión resonante e incorporan el uso de transformadores de media y alta frecuencia. El esquema general de los convertidores DC/DC resonantes con aislamiento se muestra en la siguiente Figura 4.1.



Figura 4.1- Esquema básico de un convertidor DC/DC resonante con transformador HF

Como se observa la estructura consta de varias etapas. En primer lugar, se introduce una tensión de entrada constante, V_{in} , que es convertida a alterna por medio de un inversor DC/AC para alimentar a la etapa resonante. La onda de alterna resonante generada se transmitirá por medio de un transformador de alta frecuencia hasta una segunda etapa de conversión que adapta las características de la onda a los requerimientos de la tensión del bus de continua de salida, V_{bus} .

La ventaja que plantean las estructuras resonantes en los convertidores DC/DC frente a estructuras con modulación PWM es la posibilidad de realizar la conmutación de los interruptores de la etapa inversora en conmutación suave. Estableciendo los valores adecuados para los elementos pasivos resonantes y determinando la frecuencia de conmutación se consigue una conmutación en corriente nula (ZCS) o en tensión nula (ZVS). Esto reduce al mínimo las pérdidas de conmutación, por lo que la frecuencia de conmutación puede incrementarse sin que se produzcan unas pérdidas de conmutación excesivas. En

consecuencia el transformador trabaja a alta frecuencia, lo que permite reducir su tamaño, es decir, se consigue un aumento de la densidad de potencia y supone una reducción de costes. Otro aspecto positivo que plantea dicha configuración es la reducción del nivel de EMI emitido ya que debido a la conmutación suave se evitan las grandes variaciones de tensión y de corriente que aparecen en los encendidos y apagados de los interruptores.

Por otro lado, presenta como inconvenientes la necesidad de utilizar un mayor número de interruptores debido a la necesidad de una etapa inversora, lo cual implica además la necesidad de un sistema de control capaz de generar la onda alterna para que alimente a la etapa resonante.

La principal distinción que se realiza en los convertidores resonantes se basa en la disposición de los elementos pasivos resonantes en el sistema. De esta forma se distinguen tres configuraciones: serie, paralelo y serie-paralelo.

4.1.1 Convertidor resonante serie (SCR)

En esta configuración la bobina L_r y el condensador C_r que forman el tanque resonante se disponen en serie con la carga R_c , como se muestra en la siguiente Figura 4.2.

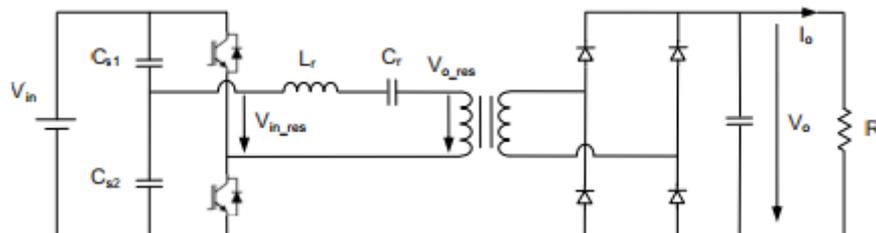


Figura 4.2- Convertidor resonante serie

Debido a su situación, los elementos resonantes provocan una caída de tensión positiva por lo que se trata de un sistema reductor. Este sistema resulta conveniente para cargas con tensiones altas y corrientes bajas, ya que el filtro capacitivo de salida provoca un rizado que se acentúa para corrientes elevadas.

4.1.2 Convertidor resonante paralelo (PRC)

Esta estructura presenta el condensador resonante, C_r , en paralelo con la carga, R_c , como se observa en la siguiente Figura 4.3.

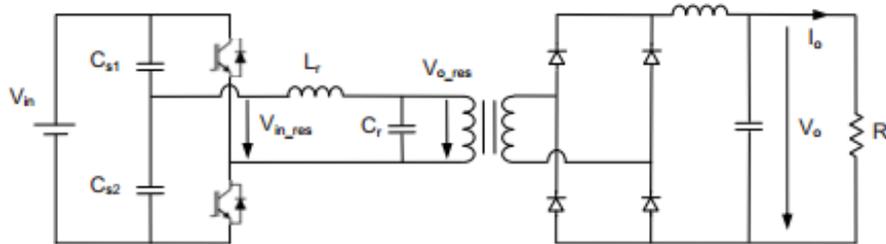


Figura 4.3- Convertidor resonante paralelo

En este caso, la relación de tensiones del tanque resonante puede ser mayor o menor que uno, es decir, se trata de un sistema que puede operar como elevador o reductor respectivamente.

Esta topología se presenta conveniente para V_o bajas e I_o altas debido a la que la inductancia en el filtro permite reducir el rizado de corriente que absorbe el condensador.

4.1.3 Convertidor resonante serie-paralelo (SPRC)

Esta topología es una combinación de las dos anteriores, presenta un doble condensador resonante en serie y en paralelo con la carga, Figura 4.4.

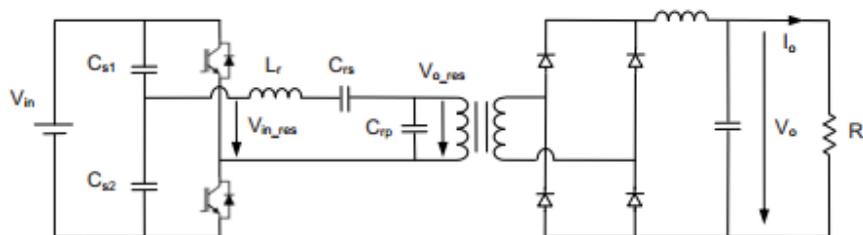


Figura 4.4- Series-Parallel resonant converter

Los valores de los elementos del tanque resonante determinan el carácter reductor o elevador de la etapa. Además dichos valores provocan que el comportamiento del sistema sea más parecido a la configuración serie o a la paralelo.

Esta topología es la elegida para la conexión de pilas de combustible y la posterior simulación.

4.1.3.1 Funcionamiento

Como ya ha sido mencionado, los valores de los elementos del tanque resonante y la frecuencia de conmutación del inversor determinan la regulación de la tensión de salida. Para cualquiera de las configuraciones descritas anteriormente, el modo de funcionamiento continuo o discontinuo queda determinado por Q , la relación entre la tensión y salida del tanque resonante, y el valor de frecuencia.

Se define el factor de calidad Q como el grado de amortiguamiento del circuito y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

siendo:

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

donde:

- ω frecuencia de resonancia en rad/s
- L , inductancia del tanque resonante
- R carga

Para obtener una conmutación suave en corriente se hará trabajar al convertidor en modo de conducción discontinuo.

4.2 Descripción de la etapa de conversión

Dado que el sistema debe adaptar la tensión de salida de las pilas de combustible para poder inyectar potencia red, es necesaria una primera etapa compuesta por un convertidor Elevador que incremente la tensión de salida de las pilas.

Además, será imprescindible una etapa que adecue la forma de onda de la tensión de salida del convertidor resonante, V_{bus} , a los requisitos de la red y que controle la potencia inyectada. Para ello se dispone de un Inversor de Puente en H entre el convertidor resonante y la red.

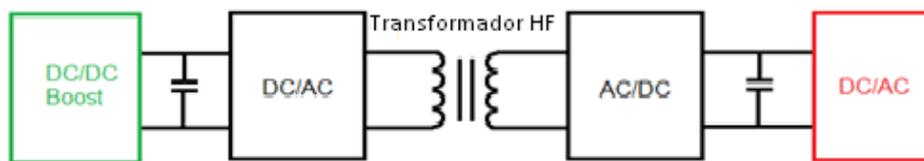


Figura 4.5- Esquema de la etapa de conversión completa

El objetivo del convertidor es, partiendo de una consigna de potencia externa, establecer el punto de trabajo de las pilas requerido para generar dicha potencia. A su vez se debe adaptar la energía DC generada para posibilitar su inyección a red.

Por ello, el Elevador es el encargado de fijar el punto de trabajo de las pilas de combustible por medio del control de la corriente extraída de éstas. Como se muestra en la siguiente figura, a partir del control de la corriente extraída de la pila, se determina el valor de tensión y potencia asociado a dicho punto de trabajo, Figura 4.6.

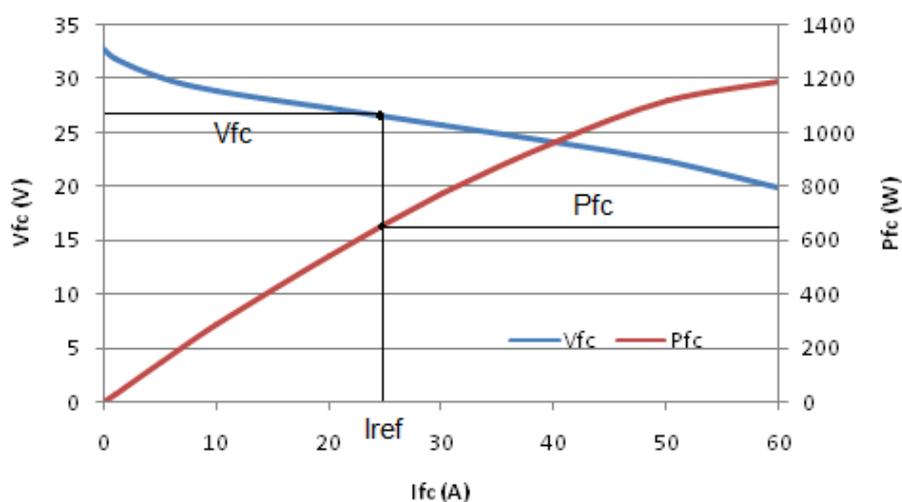


Figura 4.6- Definición de la tensión y potencia de una pila de combustible para una corriente de referencia

De esta forma el Elevador vuelca la energía generada al convertidor resonante. Dado que la etapa resonante no es regulada, la variación de tensión en dicho bus se transmite al bus DC, escalada según la relación de transformación.

Es el inversor en puente en H el encargado de mantener la tensión del bus de DC a su entrada para su valor de consigna. Para ello, se controla la corriente inyectada a red, controlando de esta forma la potencia inyectada a red. En estado estacionario esta potencia deberá ser igual a la extraída de las pilas de combustible.

4.2.1 Topología de conversión DC/DC resonante con transformador de alta frecuencia: análisis y simulación

El convertidor DC/DC forma la etapa intermedia del conjunto de inversor. Este proyecto se centra en su estudio debido a que el funcionamiento del Elevador y Puente en H es más conocido. Por ello, se sustituirá el Elevador por una fuente de tensión continua. Además, en vez de conectar el sistema a red, se coloca a la salida del sistema una resistencia que consuma toda la potencia generada. El convertidor que se va a simular consta de los siguientes elementos, como se muestra en la Figura 4.7.

- Etapa DC/AC: inversor de medio Puente.
- Tanque resonante: configuración serie-paralelo.
- Transformador HF
- Etapa AC/DC: rectificador de diodos.

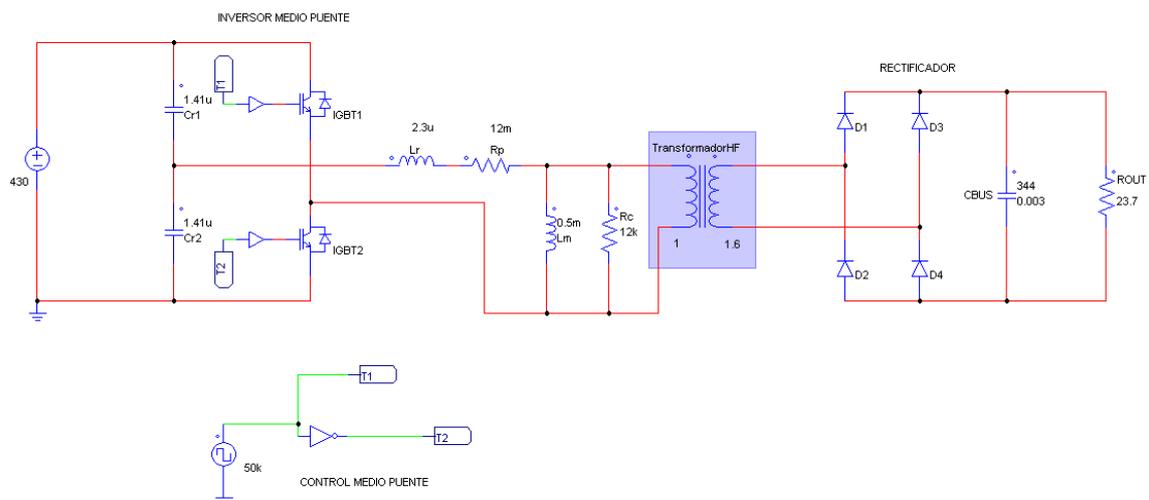


Figura 4.7- Convertidor DC/DC resonante con transformador de alta frecuencia en PSIM

4.2.1.1 Conmutación del inversor de Medio Puente

Para controlar la señal de encendido y apagado de los IGBTs del Medio Puente se crea una onda cuadrada cuya mitad de ciclo sea 1 y la otra mitad 0. Cuando la señal que pasa al IGBT a través del driver tiene el valor 1 el IGBT se activará, por el contrario, cuando el valor sea 0, el IGBT se apagará. Además, las señales de encendido y apagado de ambos interruptores son complementarias, para ello se coloca una puerta lógica que niega el valor de la fuente cuadrada.

Las ondas de control y el estado de los IGBTs se muestran en la Figura 4.8. Puede observarse que las señales son complementarias así como que el ciclo de trabajo es el siguiente:

(4.3)

Se muestra además el esquema eléctrico del convertidor para los dos estados posibles de los interruptores.

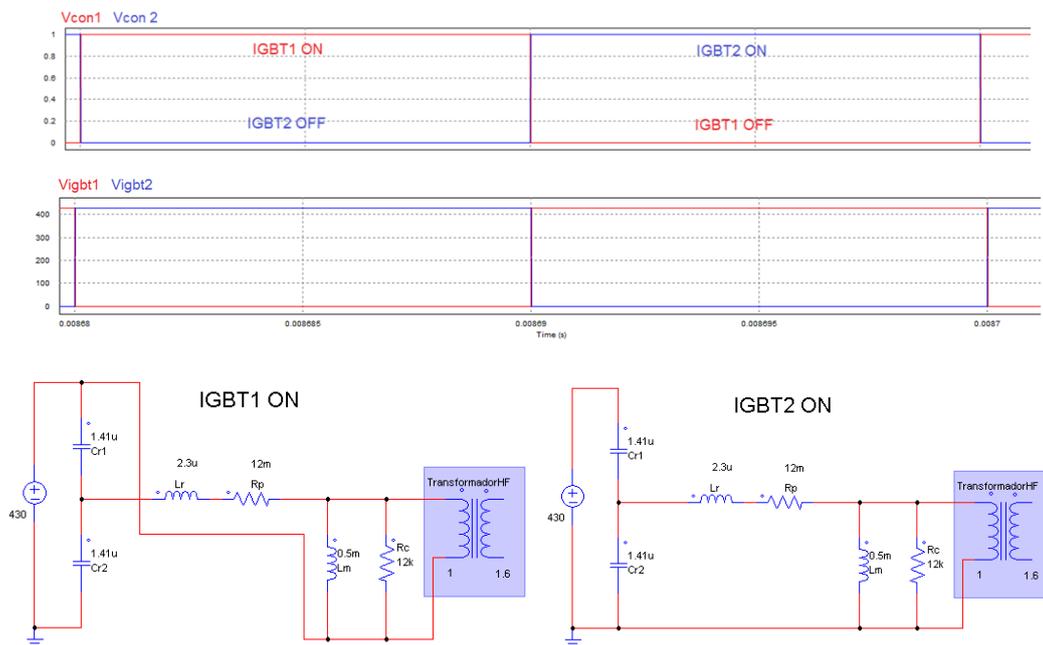


Figura 4.8- Señales de control y estado de los IGBTs

4.2.1.1 Cálculo de los parámetros del sistema

Los valores de los parámetros del tanque resonante y la frecuencia de conmutación son determinantes a la hora del comportamiento que adoptará el sistema. Dado que la simulación del sistema se basa en un convertidor real provisto por Ingeteam, ciertos parámetros están ya determinados.

Los parámetros predefinidos se recogen en la Tabla 4.1, mientras que los calculados se incluyen en la Tabla 4.2.

PARÁMETROS CONOCIDOS DEL SISTEMA	
Inversor de Medio-Puente	
Tanque resonante	_____
Transformador	_____

Salida	_____

Tabla 4.1- Parámetros conocidos del sistema

1. Cálculo de las tensiones y resistencia de salida:

El sistema completo debe diseñarse para conectarse a red, por tanto la tensión de salida del sistema debe ajustarse al valor pico de la tensión:

—

Sin embargo, dado que el inversor es una estructura reductora, la tensión de salida del convertidor deberá ser mayor que el valor pico de red. Por tanto, el valor escogido es el siguiente:

El transformador HF tiene una relación de transformación de 1.6, por lo que el valor de la tensión del primario puede ser calculado una vez se dispone de la tensión de bus.

— —

Debido a que la tensión de entrada para el Medio Puente se divide en dos, el valor de la tensión de la fuente de entrada será el siguiente.

Dado que la potencia que se pretende extraer del sistema es de 4.8 kW, el valor de resistencia necesario a la salida del sistema será,

2. Cálculo de los elementos resonantes:

Como ha sido explicado antes, el convertidor DC/DC trabaja a altas frecuencias con el objetivo de reducir su tamaño y su coste.

En este caso, la frecuencia de conmutación del medio puente es $F_{con} = 50\text{Hz}$, por lo que el periodo de conmutación será el siguiente:

Se establece un coeficiente de seguridad de 0.8 con el objetivo de conseguir que se produzca una conmutación suave, es decir, que los interruptores conmuten cuando la corriente circulando por ellos sea nula. El cálculo de la frecuencia de resonancia del sistema se basa en el periodo de conmutación al que se le aplica el coeficiente de seguridad antes citado, obteniendo el periodo asociado a la resonancia y en consecuencia su frecuencia:

$$\text{_____} \quad \text{_____} \quad \text{_____} \quad (4.10)$$

$$\text{_____} \quad \text{_____} \quad \text{_____} \quad (4.11)$$

En la siguiente figura se muestran las corrientes y se indica el periodo en el que se produce la conmutación suave.

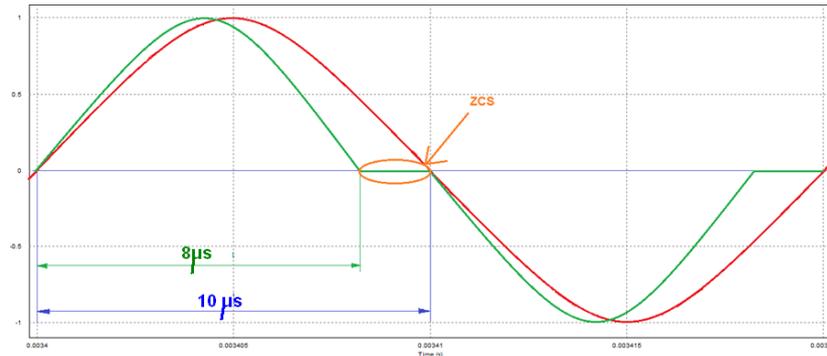


Figura 4.9- Resonancia del convertidor con el coeficiente de seguridad

Se dispone del dato de la inductancia del tanque resonante, L_r por lo que tras determinar la frecuencia de resonancia, F_{res} , se puede obtener el valor del condensador C_r a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{-----} \tag{4.12}$$

$$\text{-----} \tag{4.13}$$

3. Cálculo de la corriente máxima, I_{res} :

Resulta interesante conocer el valor máximo que podrá alcanzar la corriente de resonancia, denominada I_{res} . De este modo se puede determinar si dicho valor es adecuado para los elementos del circuito y asegurar que no van a verse dañados.

Para el cálculo de la corriente de resonancia máxima definida por la ecuación 4.15 es necesario conocer previamente la impedancia total del tanque resonante la cual se expresa mediante la ecuación 4.14.

$$\text{-----} \tag{4.14}$$

$$\text{-----} \tag{4.15}$$

Para concluir, se recogen los parámetros hallados en la siguiente tabla:

PARÁMETROS CALCULADOS	
Tensión de la fuente de entrada	$V_{in} = 430V$
Tanque resonante	$F_{res} = 62.5 \text{ kHz}$
	$C_{r1} = C_{r2} = 1.41 \mu F$ (precargado a 215V)
Salida	$R_{out} = 23.7 \Omega$

Tabla 4.2- Parámetros calculados del sistema

4.2.1.2 Resultados de la simulación

Primero se evalúan la tensión de entrada V_{in} , V_{bus} y las tensiones en los condensadores V_{CR1} and V_{CR2} .

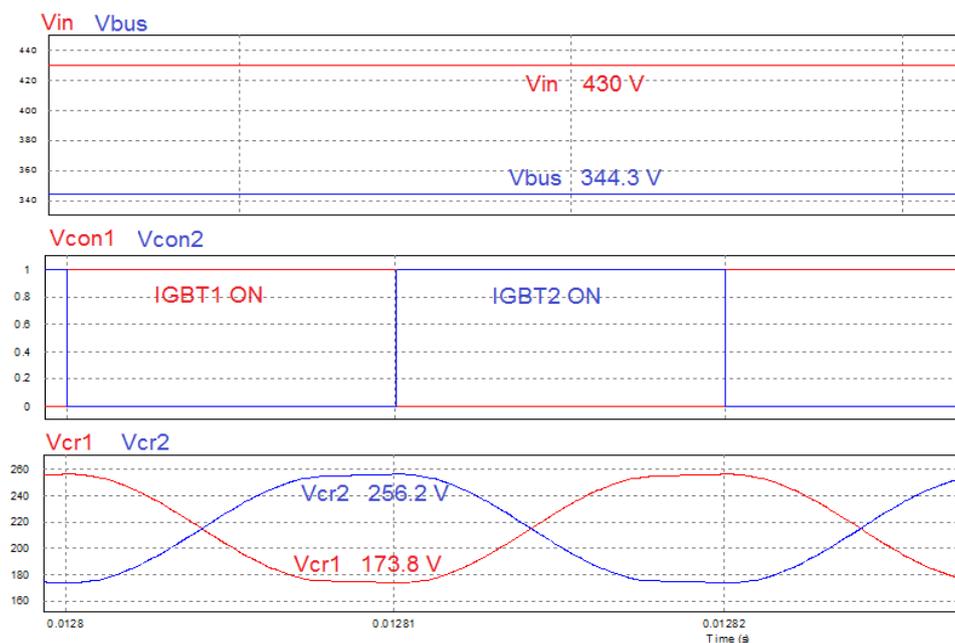


Figura 4.10- Simulación de V_{in} , V_{bus} , V_{con1} , V_{con2} , V_{cr1} and V_{cr2}

En la Figura 4.9 se observa como el valor medio de la tensión del condensador V_{cr1} y V_{cr2} corresponde con la mitad del valor de entrada, es decir 215V ($V_{in}/2$).

En la siguiente gráfica se muestra la conmutación de los IGBTs y la tensión en los condensadores, se puede concluir lo siguiente:

- Cuando IGBT1 ON y IGBT2 OFF → V_{CR1} disminuye mientras V_{CR2} aumenta.
- Cuando IGBT1 OFF y IGBT2 ON → V_{CR1} aumenta mientras V_{CR2} disminuye.

Es necesario analizar las corrientes del sistema, mostradas en la Figura 4.10, para comprobar que la resonancia se produce de forma correcta. Debido a la resonancia, debería darse un instante en cada semiperiodo en el que la corriente por el convertidor fuera cero, momento en el que se produce la conmutación de los IGBTs. Sin embargo, como se comprueba en la siguiente Figura 4.10, esto no ocurre debido a la corriente de magnetización del circuito que corresponde con la corriente de magnetización que circula por la bobina L_m y por la resistencia R_c . Aunque esta última puede considerarse despreciable.

Se comprueba que el valor máximo de I_{res} en régimen permanente es de 45.16 A, tal y como había sido calculado de forma teórica a través de la ecuación (4.15).

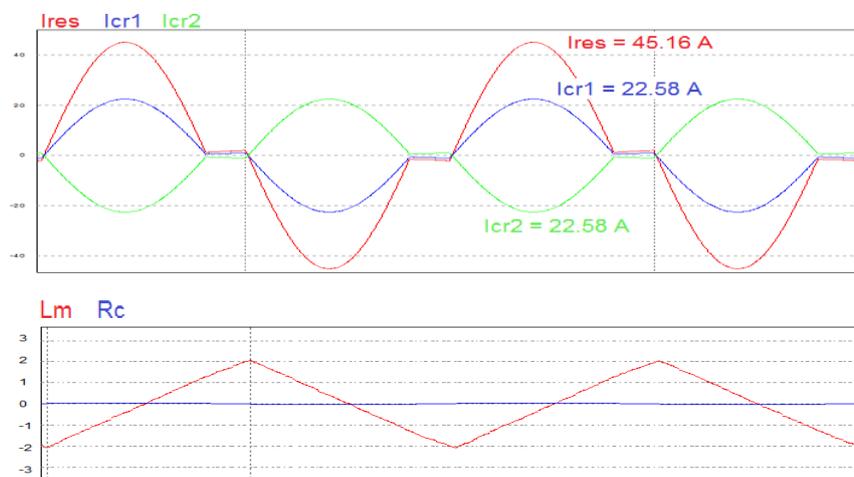


Figura 4.11- Corrientes resonantes, Corriente en L_m y R_c , Tensiones en el transformador y Tensión en L_r .

Se analizan las tensiones del transformador y en la Figura 4.12 se observa como al final de cada semiperiodo se produce una caída de tensión en el transformador. El valor de la caída de tensión, V_{pri} , en bornes del primario del transformador ideal, corresponde con el valor de la caída de tensión en L_r , ya que cuando la corriente que circula por la misma es mínima, la tensión llega a ser casi cero.

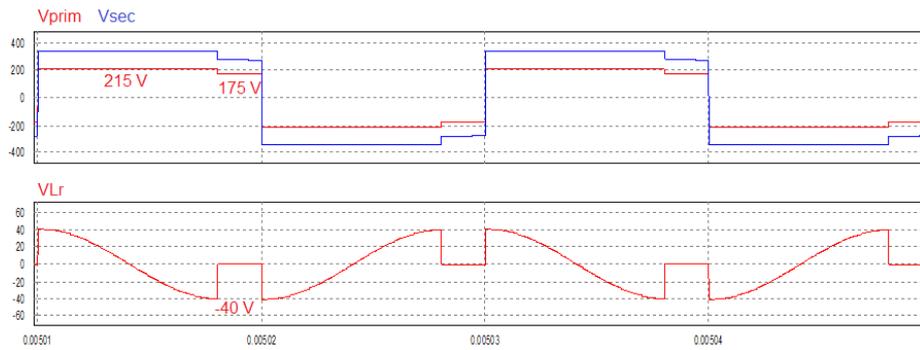


Figura 4.12- Tensiones del transformador ideal y tensión en L_r

- Análisis de la corriente resonante y de magnetización

Se realiza un análisis de las corrientes resonantes y de magnetización de la bobina L_m para comprobar la influencia que tiene la inductancia sobre las mismas.

Primero se simula el sistema actual con el valor de la inductancia de magnetización de 0.5mH para observar el comportamiento de las corrientes.

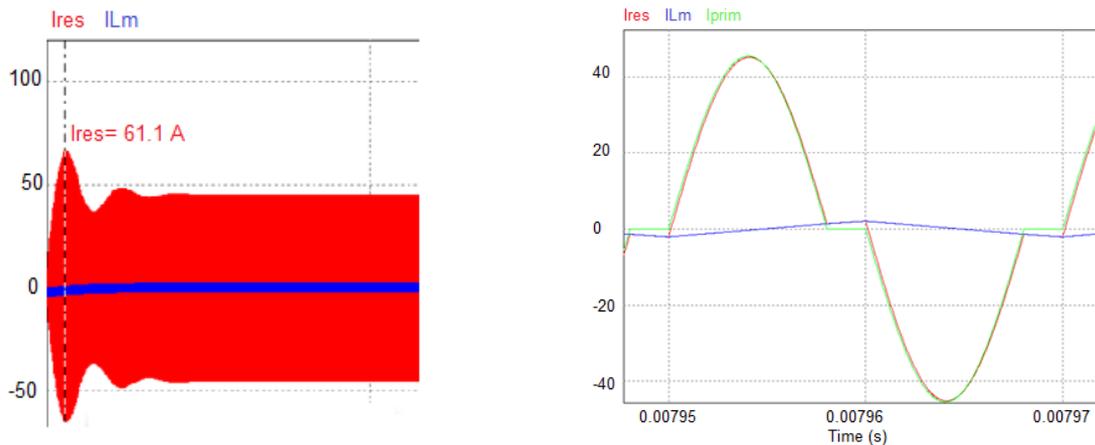


Figura 4.13- Corriente resonante y corriente por L_m cuando $L_m=0.5$ mH (valor real)

En la Figura 4.13 se observa como durante el transitorio que se produce durante los primeros instantes, la corriente de resonancia I_{res} alcanza un valor máximo de 61 A. Por otro lado, cuando se alcanza el régimen permanente, el valor de corriente es de 42.5 A.

Además, en la gráfica de la derecha de la Figura 4.11, se comprueba de forma clara como al final de cada semiperiodo la corriente de resonancia I_{res} es igual a la corriente de magnetización I_{Lm} . En ese instante la corriente por el primario del transformador será cero.

Una vez analizado el sistema actual se comprueba el comportamiento del convertidor para diferentes valores de la inductancia de magnetización.

I. Pruebas para $L_m < 0.5\text{mH}$

Primero se selecciona un valor de 0.1mH . En este caso, se observa en la Figura 4.12 que el pico que alcanza la corriente I_{res} durante el transitorio es mucho mayor, alcanza 150 A .

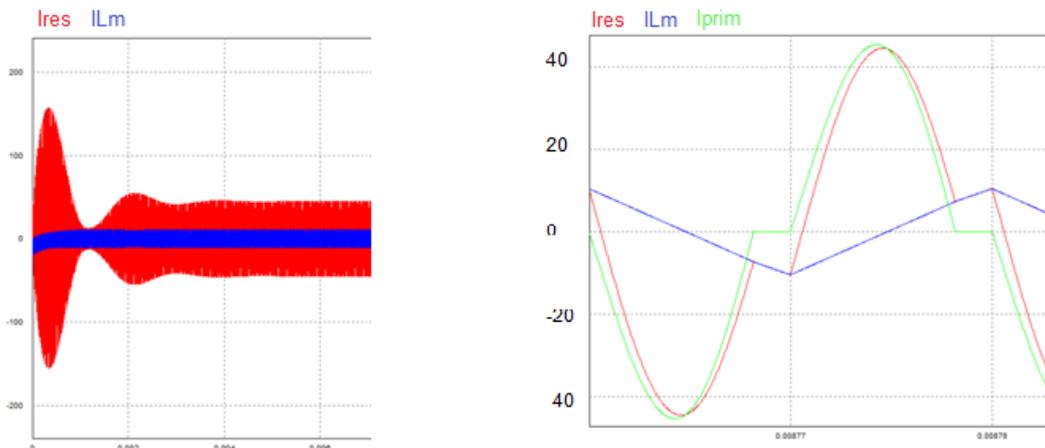


Figura 4.14- Corriente de resonancia y corriente por L_m siendo $L_m = 0.1\text{ mH}$

Por otra parte, la corriente I_{Lm} también ha aumentado con respecto a la anterior (en este caso alcanza el valor de 10 A frente a los 3.5 A de la simulación anterior).

La siguiente simulación, Figura 4.13, se realiza para $10\text{ }\mu\text{H}$. En este caso, el pico de corriente I_{res} durante el transitorio llega hasta los 630 A .

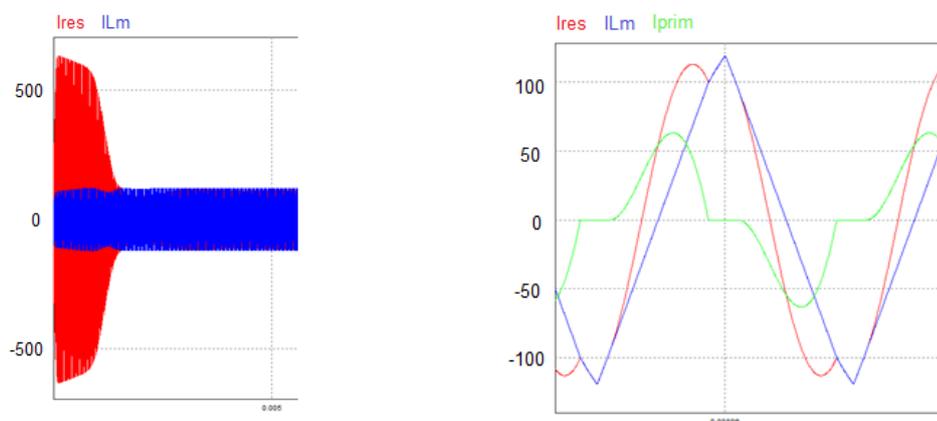


Figura 4.15- Corriente resonante y corriente por L_m siendo $L_m = 10\text{ }\mu$

Además, durante el permanente, el valor de pico de I_{Lm} es mayor que el pico de la señal senoidal de I_{res} . Dado que el objetivo de la resonancia es posibilitar una conmutación

durante valores cero de corriente se puede concluir que un valor demasiado bajo de L_m es perjudicial para el propósito del convertidor.

II. Pruebas para $L_m > 0.5\text{mH}$

La simulación mostrada en la Figura 4.16 se realiza para un valor de L_m igual a 5 mH.

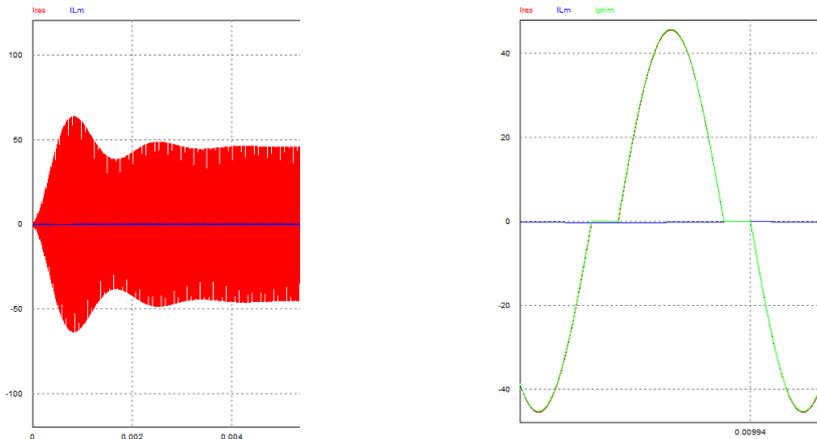


Figura 4.16- Corriente resonante y corriente por L_m siendo $L_m=5\text{mH}$

En este caso el valor del pico inicial es de 60 A, además la corriente por el primario del transformador es igual que la corriente resonante debido a que la corriente por la inductancia de magnetización es prácticamente cero, y un poco inferior al valor obtenido en la Figura 4.11.

A modo de resumen se presentan los valores estudiados en la siguiente tabla:

L_m (mH)	$I_{res,pico}$ (A)	$I_{res, estacionario}$ (A)	I_{prim} (A)	I_{Lm} (A)
50	60	45	45	0.02
5	60	45	45	0.4
0.5	61	45	45	3.5
0.1	150	47	49	10
0.01	630	116	65	120

Tabla 4.3: Influencia del valor de L_m sobre las Corrientes del sistema

El valor establecido de la inductancia de magnetización del transformador es adecuado ya que permite realizar la conmutación suave en corriente, lo que para valores menores de L_m no ocurría y además presenta la corriente necesaria para que pueda darse la conmutación de los IGBTs, que valores altos de L_m no permiten.

La etapa intermedia es una etapa no regulada por lo que los valores de corrientes y tensiones en esta etapa dependen de los controles implementados en los otros dos convertidores.

4.2.2 Conexión a red del sistema completo: análisis y simulación

La etapa inversora se encarga de la conexión a red del circuito. Para ello, como ha sido explicado en la Sección 4.1, se conecta un inversor de Puente en H DC/AC para obtener una onda senoidal a una frecuencia de 50Hz. En la siguiente Figura 4.26 se muestra el esquema de simulación implementado en PSIM, se incluye además el control del puente en H.

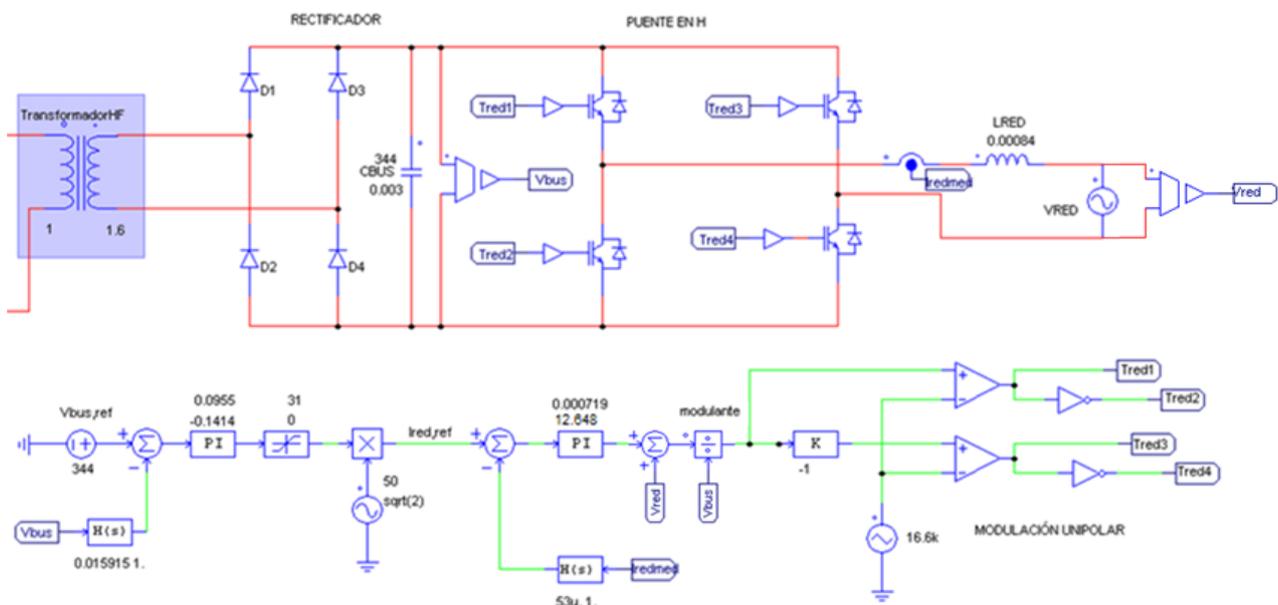


Figura 4.17- Conexión a red del sistema a través de un puente en H

Un inversor en Puente en H es reductor, lo que exige que la señal de entrada al mismo, V_{bus} , deba ser mayor que el valor pico de la tensión de red.

Como ha sido determinado al comienzo, en la Sección 4.2.1, el valor de la tensión del bus de salida del convertidor es de 344V.

4.2.2.1 Control del puente en H

Para realizar el control se define un lazo externo de tensión que controla la tensión del bus de continua, V_{bus} . A su vez, se genera una referencia de corriente correspondiente a la corriente de red que se introduce en el lazo interno de corriente.

Para asegurar el correcto funcionamiento de ambos, el lazo de corriente debe ser al menos una década más rápido que el lazo de tensión de tal forma que el lazo de corriente vea la referencia dada como una constante.

Finalmente, el controlador PI del lazo de corriente genera una onda de control, U_{con} , que se utiliza para realizar la conmutación PWM. Esta modulación se basa en la comparación entre la onda de control y una onda triangular, V_{tri} , la cual define la frecuencia de conmutación de los IGBTs.

EL inversor de puente en H cuenta con cuatro IGBTs, como se muestra en la Figura 4.26. Para realizar el control de los mismos, pueden realizarse dos tipos de modulación PWM:

I. Modulación Bipolar

Esta modulación es la más sencilla, ya que los transistores de cada diagonal quedan emparejados y por tanto solo es necesaria una señal de modulación.

Como ventaja, no introduce variaciones en la tensión en modo común V_{cm} ya que todas las componentes armónicas quedan desfasadas 180° , por lo que no se generarán corrientes en modo común.

Por el contrario, plantea el inconveniente de que los armónicos de conmutación de la tensión de salida aparecen con el doble de amplitud (ya que son igual a la suma de los armónicos de las dos células). Además, la inductancia necesaria en el inversor va a tener un valor cuatro veces mayor que para la modulación unipolar.

II. Modulación Unipolar

Este método de conmutación es utilizado para la simulación debido a la reducción de armónicos que presenta con respecto a la anterior.

Requiere de dos señales para la modulación, una para cada rama. Además opera al doble de la frecuencia de conmutación.

- Control de corriente

Para obtener una onda senoidal a la salida del inversor se debe implementar un lazo de control de corriente. En el control se introduce una corriente de referencia que se ajusta a las propiedades de la corriente de red para cumplir los requerimientos de la misma.

Es importante recordar que la frecuencia de la salida es $F=2 \cdot F_{con}$, debido a que se trata de una modulación unipolar. El ciclo de trabajo se define de la siguiente forma:

Para obtener el modelo del inversor de Puente en H se utiliza la siguiente relación de tensiones a la salida:

A su vez, la tensión en la inductancia se puede expresar de la siguiente forma:

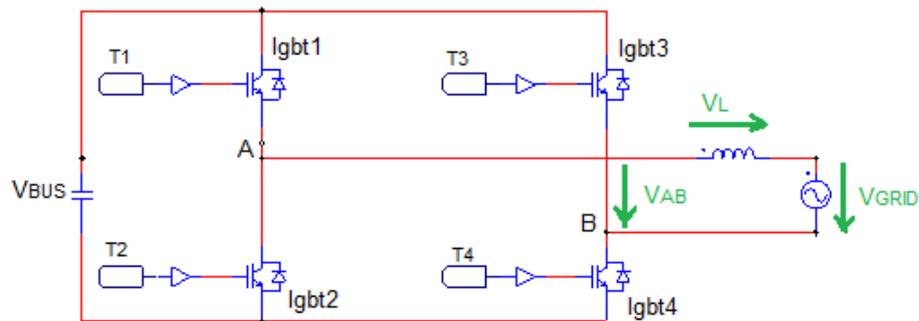


Figura 4.18- Relación de las tensiones de salida, inversor Puente en H

Además, el valor medio de V_{AB} para un periodo de conmutación puede expresarse en función de la tensión de entrada, V_{bus} y el ciclo de trabajo D :

Combinando las ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación que define la corriente de salida del inversor:

▪ **Cálculo del valor de la inductancia**

Dado un comportamiento ideal de todos los elementos, el inversor Puente en H debería entregar a red toda la potencia generada por el sistema.

La corriente de salida del inversor contiene un rizado provocado por el efecto de la inductancia, este rizado no debe superar el 10 %.

El valor de la tensión del bus de continua se establece como constante dado que no sufre cambios importantes para el tiempo evaluado.

El rizado de corriente depende además del ciclo de trabajo, será máximo para una situación con $D=0.5$:

Por tanto, el valor máximo de corriente que circula por la inductancia es:

— — — — —

Se puede concluir qué valor es el máximo permitido para el rizado de corriente por la bobina.

De la expresión anterior se puede obtener el valor de la inductancia de la siguiente forma:

- **Función de transferencia del sistema**

La función de transferencia utilizada para modelar el controlador PI del lazo de control de corriente es la siguiente:

$$\frac{K_p + K_i/s}{s}$$

Donde:

K_p es la constante proporcional

T_n relación de K_p/K_i , siendo K_i la constante de integración

La función de transferencia del sensor es la siguiente:

$$\frac{K_{sc}}{1 + T_{sc}s}$$

Donde:

K_{sc} es la constante del sensor de corriente

T_{sc} es la constante de tiempo del sensor de corriente

La función de transferencia del inversor queda definida de este modo:

$$\frac{1}{1 + T_{inv}s}$$

Por tanto, la función de transferencia del sistema completo en lazo abierto se expresa como:

$$\frac{K_p + K_i/s}{s} \cdot \frac{K_{sc}}{1 + T_{sc}s} \cdot \frac{1}{1 + T_{inv}s}$$

- **Cálculo de los parámetros del PI de corriente:**

El siguiente paso consiste en el cálculo de los parámetros desconocidos de la función de transferencia $L(s)$.

Las características del lazo son las siguientes:

-
- 4000

Las constantes del sensor y los parámetros del inversor ya han sido calculados previamente:

-
-
-
-
-
-
-

El control se puede realizar de dos formas distintas, en función de si se considera la perturbación de la tensión de red.

A) Sin compensación de V_{red}

El diagrama de bloques de control se muestra en la siguiente Figura 4.19:

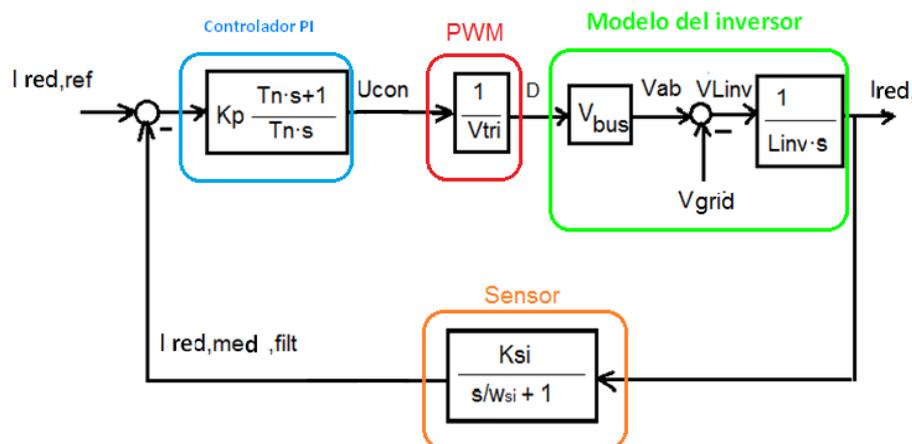


Figura 4.19- Diagrama de bloques del lazo de control con compensación V_{red}

La función de transferencia del sistema en lazo abierto sin compensar la V_{red} se define por la ecuación (4.56).

Se calcula la constante de tiempo T_n de la siguiente forma:

Una vez hallado este valor, es posible calcular la constante proporcional del sistema dada una frecuencia de corte del lazo.

$$\frac{K_p}{T_n} = \frac{1}{T_n} \frac{1}{\omega_c}$$

El objetivo del lazo de control es conseguir que la corriente de red sea igual a la referencia en cada instante. Para comprobar lo anterior se simulan ambas señales.

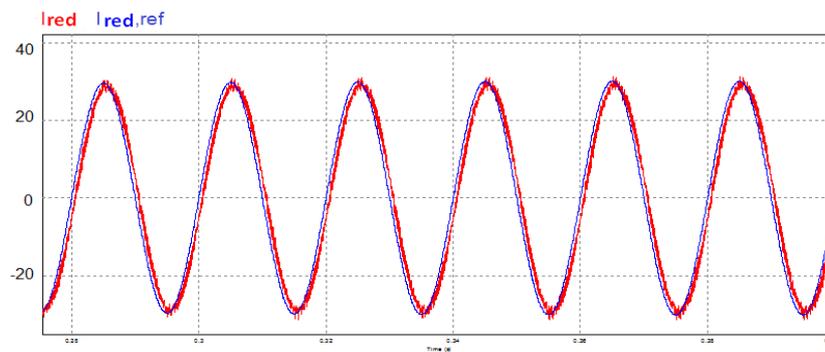


Figure 4.20- Simulación de la corriente de entrada y salida del lazo de control sin compensación V_{red}

Se observa el retraso que se produce entre la corriente de referencia y la corriente de red, esto es debido a la perturbación de la tensión de red. Para mejorar el seguimiento de la corriente a la referencia se implementa el control con compensación de la tensión de red.

B) Con compensación Vred

El diagrama de bloques de control se muestra en la siguiente figura:

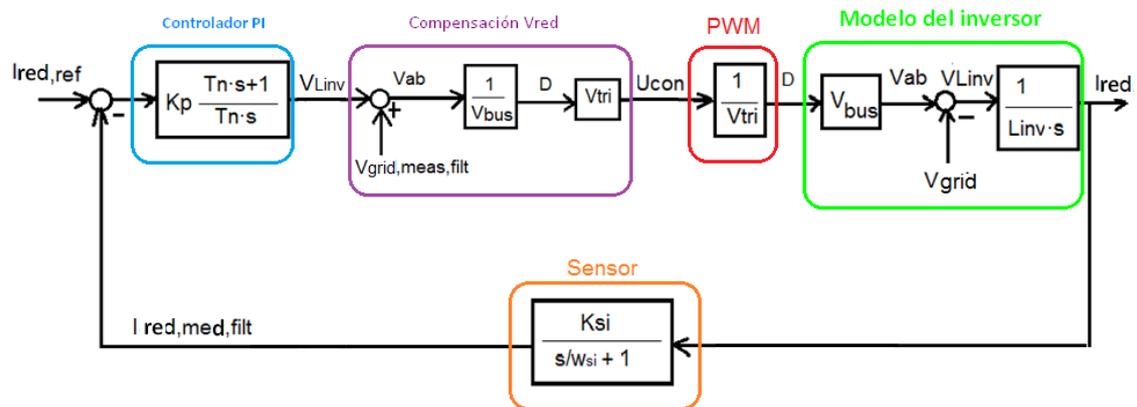


Figura 4.21- Diagrama de bloques del lazo de control de corriente con compensación de Vred

La función de transferencia en lazo abierto queda de la siguiente forma:

Se calculan los valores de Tn y Kp:

Se simulan de nuevo la corriente de red y la referencia para determinar si se produce una mejora debida a la compensación de la perturbación causada por la tensión de red, Figura 4.22.

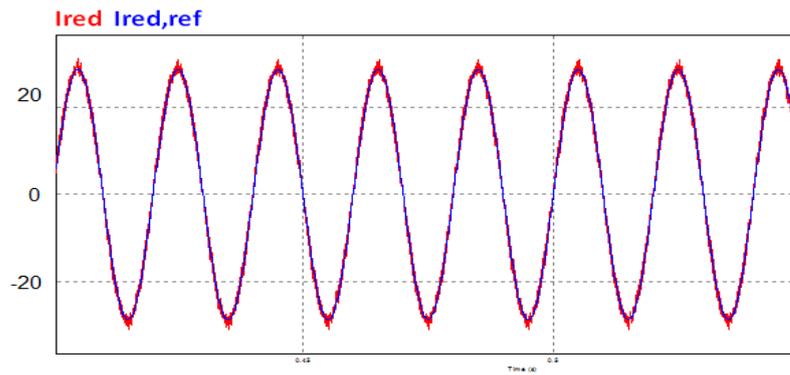


Figura 4.22- Simulación de la entrada y salida al lazo de control con compensación de V_{red}

Como se comprueba en la figura anterior, la corriente de red sigue a la referencia con mayor precisión. Debido a la mejoría que presenta, éste será el control implementado en PSIM.

- Control de tensión

El control de tensión va a ser el encargado de mantener la tensión V_{bus} constante así como de generar la corriente de referencia introducida al lazo de corriente.

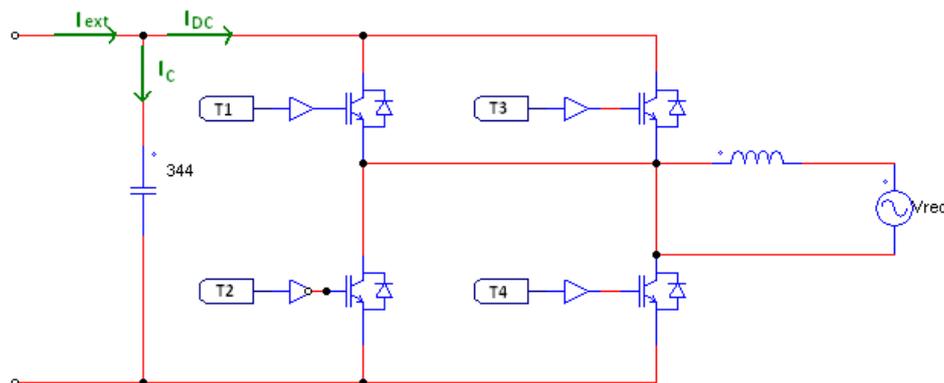


Figura 4.23- Relación de Corrientes de entrada al inversor

Se realiza una relación entre las corrientes de entrada del inversor como se observa en la Figura 4.32 anterior.

Además la corriente en un condensador se expresa como:

Finalmente, cambiando las ecuaciones (4.63) y (4.64) se obtiene la ecuación que define la tensión del bus de continua:

El lazo de control de tensión lo compone un controlador PI, el lazo interno de control de corriente, el modelo del inversor y el sensor, Figura 4.24.

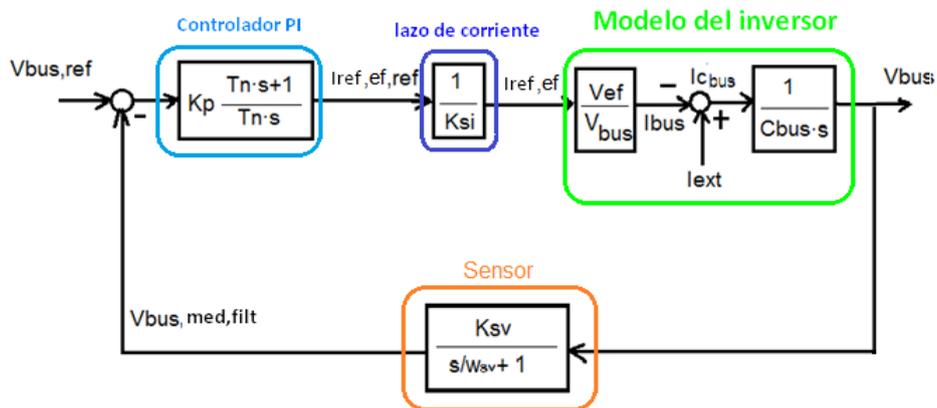


Figure 4.24- Diagrama de bloques del control de tensión del inversor Puente en H

El lazo de control de corriente no se modela mediante su función de transferencia en lazo cerrado debido a que la diferencia entre la velocidad del lazo de corriente con respecto al de tensión es tan grande que puede modelarse simplemente mediante un bloque de ganancia constante.

La función de transferencia del sistema en lazo abierto por tanto, es la siguiente:

▪ Cálculo de los parámetros del PI de tensión

Se dispone de los valores de los parámetros del sensor y puente en H por lo que tan solo habrá que calcular los valores del PI, la ganancia del sistema K_p y la constante de tiempo T_n .

Características del lazo de control:

- $\tau = 10$
- $\tau = 10$

Parámetros conocidos:

- $\tau = 10$
- $\tau = 10$
- $\tau = 10$ — — s
- $\tau = 10$ —
- $\tau = 10$

Finalmente, se hallan los valores de la ganancia del sistema y la constante de tiempo:

$$\frac{K_p}{T_n} = \frac{10}{10} = 1$$

4.2.2.2 Resultados de la simulación

Para estudiar el comportamiento del inversor de Puente-H se simula en PSIM el convertidor resonante DC-DC y el inversor y se realiza el siguiente análisis:

I. Modulación PWM

En la siguiente Figura 4.25 se observan las señales de conmutación generadas. En la imagen a), puede observarse la frecuencia de red prestando atención a la frecuencia de conmutación de la señal. Por otro lado, la imagen b), c) y d), muestran las señales de

encendido y apagado generadas por la comparación de la onda triangular y la señal de conmutación.

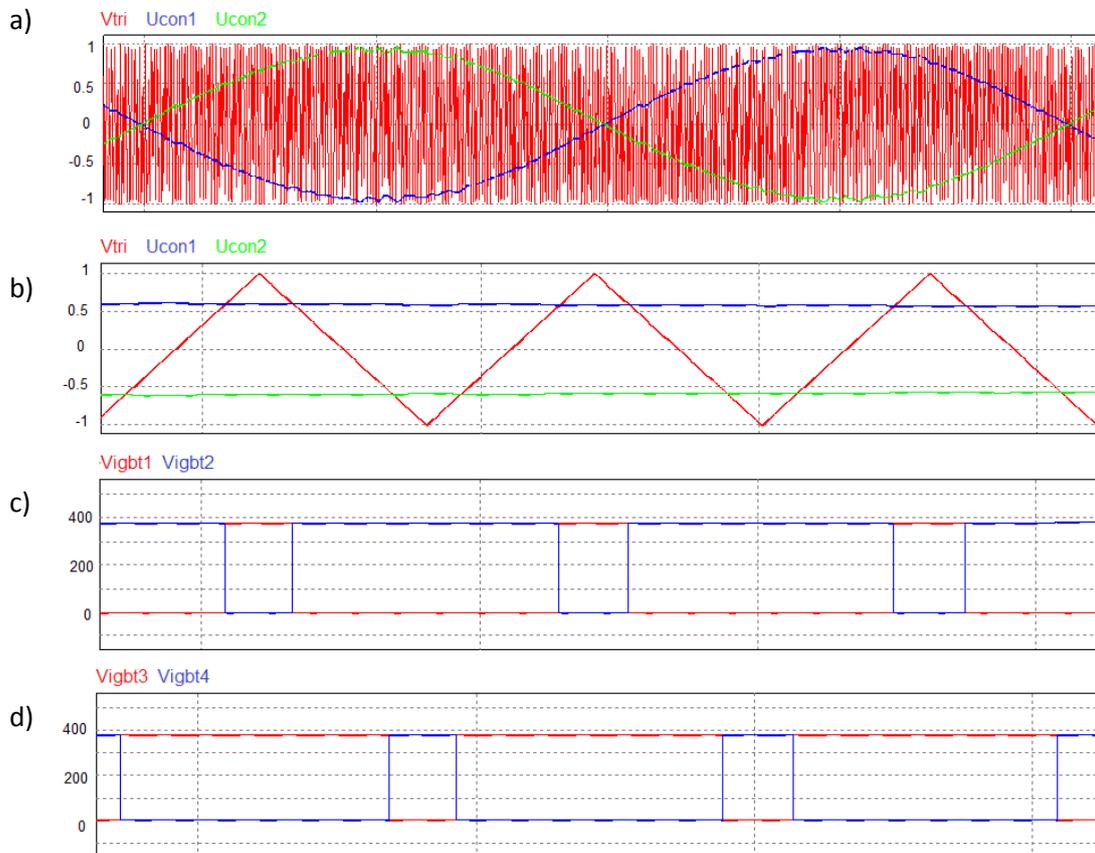


Figura 4.25- Señal de conmutación. Modulación Unipolar

Se comprueba que las señales de conmutación generadas por la modulación que determinan el estado de los transistores son las siguientes:

- $U_{con1} > V_{tri} \rightarrow$ IGBT1 ON & IGBT2 OFF
- $U_{con1} < V_{tri} \rightarrow$ IGBT1 OFF & IGBT2 ON
- $U_{con2} > V_{tri} \rightarrow$ IGBT3 ON & IGBT4 OFF
- $U_{con2} < V_{tri} \rightarrow$ IGBT3 OFF & IGBT4 ON

II. Corriente y tensión de red

La corriente y tensión de red se simula en la Figura 4.26. Se observa como ambas son una onda senoidal con una frecuencia de 50 Hz ($T=20\text{ms}$).

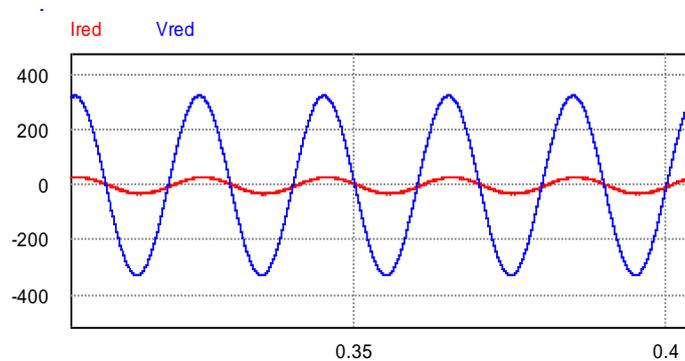


Figura 4.26- Simulación de la tensión y corriente de red.

4.2.3 Convertidor Elevador: análisis y simulación

La tensión de salida de la pila es demasiado baja para poder conectarla directamente al convertidor DC/DC resonante por lo que se empleará un convertidor Elevador que a su vez controla el punto de trabajo de éstas. Este convertidor se compone de una inductancia L_{boost} de 0.75 mH a su entrada, de un diodo, (D0) y un IGBT para realizar la conmutación, además de un $C_{\text{out,boost}}$ de 80 μF a su salida.

Para estudiar el comportamiento del elevador de forma individual en PSIM, se modela el sistema de generación de energía como una fuente DC de tensión de 80V, tensión correspondiente a la conexión de las cuatro pilas conectadas en serie. EL sistema se diseña para la potencia nominal de 4.8 kW, por lo que la corriente máxima generada por la pila será de 60 A.

La salida del elevador debe tomar el valor de 430V ya que este es el valor empleado como entrada para el convertidor DC/DC resonante.

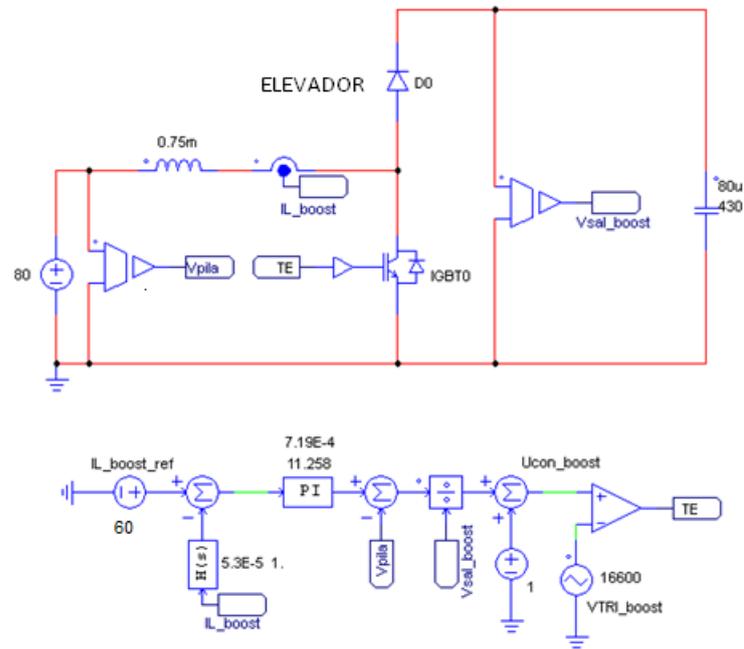


Figura 4.27- Esquema en PSIM del Convertidor Elevador y su control

Por otra parte, para obtener el valor deseado a la salida del convertidor es necesario implementar un lazo de control de corriente con se muestra en la figura de arriba.

4.2.3.1 Control del elevador

Se debe controlar la corriente que circula por la bobina del Elevador, que al conectar el sistema completo, representará también la corriente de salida de la pila. La acción de control es la tensión de control U_{con} que se introduce en la modulación PWM para generar el ciclo de trabajo y en consecuencia, la señal de conmutación del IGBT. La frecuencia de conmutación será de 16.6KHz. Los instantes en los que el IGBT se encuentra conduciendo se denominan, T_{on} y por el contrario, el tiempo para el que se encuentra desconectado se llama T_{off} . El diodo y el IGBT conducen de forma complementaria, por lo que el diodo conducirá durante el T_{off} .

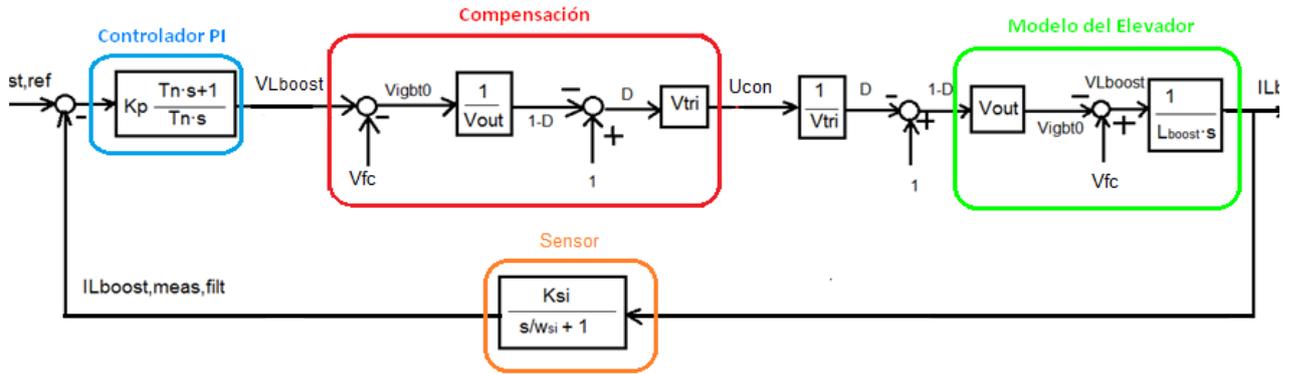


Figura 4.28- Diagrama de bloques del lazo de corriente

Como se muestra en la Figura 4.28, se realiza un control de corriente en lazo cerrado.

La planta del convertidor se modela de la forma indicada en la parte "Modelo del Elevador". Se considera la tensión de salida de las pilas cómo una perturbación. Sin embargo, esta tensión está fuertemente relacionada con la corriente de las pilas (corriente a controlar) por medio de una relación no lineal. Para evitar que esto afecte al sistema, se introduce la compensación de V_{fc}

En la simulación en PSIM se mide la corriente que circula por la bobina, que tras ser filtrada, se compara con la referencia. De este modo se obtiene el error entre ambas, que se introducirá en el controlador PI.

- **Cálculo de los parámetros del PI:**

La función de transferencia del lazo de control de corriente se obtiene a través del diagrama de bloques de la Figura 4.16:

Las características de operación del lazo son:

- Margen de fase, MF=50
- Frecuencia de corte

Valores de los parámetros del sensor y Elevador:

- Lboost=0.75mH
- Ksi= 1
- Fsi=3000 Hz
- Vout = 430V
- Vtri=1V

Se calcula la constante de tiempo Tn y la constante de proporcionalidad Kp a través de las siguientes ecuaciones:

$$MF=50^\circ = \arctg(Tn \cdot \omega) - \arctg(\frac{1}{Kp}) \rightarrow Tn = 0.72 \text{ ms} \quad (4.45)$$

$$= 1 = \frac{1}{Kp} \rightarrow Kp = 11.2586 \quad (4.46)$$

4.2.3.2 Resultados de la simulación

Primero es importante comprobar que tanto la tensión de salida como la de entrada tienen el valor correcto, es decir, 430 y 80 V respectivamente considerando las cuatro pilas conectadas a plena carga. Esto se muestra en la siguiente Figura 4.29.

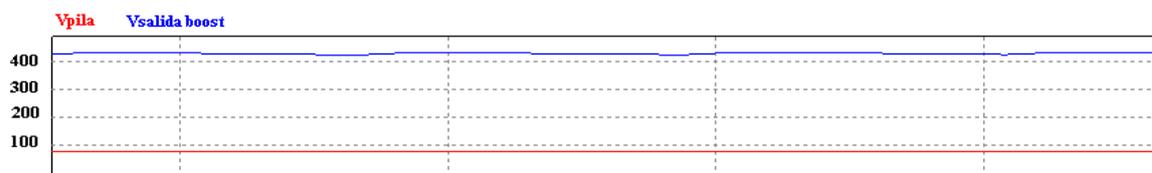


Figura 4.29-Tensión de entrada y salida del Elevador

Es interesante analizar la conmutación del IGBT así como el ciclo de trabajo D que se obtiene. En la Figura 4.18 se observa que el ciclo de trabajo es bastante elevado para conseguir incrementar el valor de tensión de salida.

Se observa además el funcionamiento de la modulación PWM con respecto al estado del IGBT:

- Cuando
- Cuando

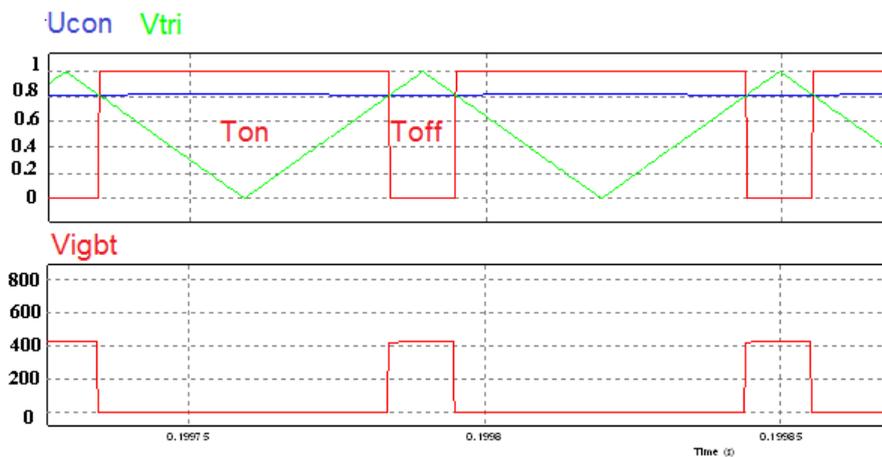


Figura 4.30- PWM y control de señales del Elevador

Otro aspecto importante a analizar son las corrientes y tensiones en la inductancia del Elevado, L_{boost} . En la Figura 4.31 se muestra el rizado en la corriente provocado por la carga y descarga de L_{boost} .

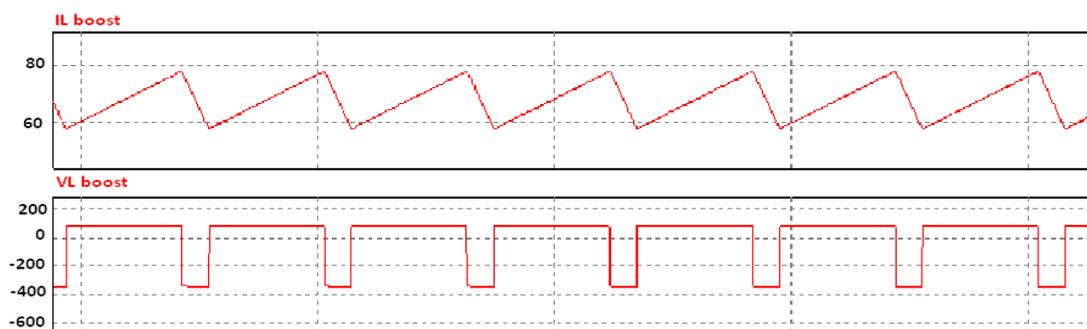


Figura 4.31- Corriente y tensión en la bobina del Elevador

Durante el Ton, el valor de tensión aplicada a la bobina es positivo por lo que se carga aumentando su corriente. Por el contrario, durante el Toff, la tensión sobre la inductancia será negativa, es decir, su corriente disminuye. Se comprueba que el valor medio de la tensión V_{Lboost} es cero.

El rizado de corriente en el elevador, para las condiciones establecidas de 80 V a la entrada y dado un ciclo de trabajo 0.814, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$(4.48)$$

Es importante destacar que en la posterior conexión de las pilas al sistema inversor, la tensión de entrada al elevador no va a ser constante, por lo que el ciclo de trabajo puede variar. El rizado máximo va a darse para la tensión de salida de las pilas más elevada, esto es cuando se encuentren en vacío, es decir, 33V de salida por cada pila lo que conlleva un ciclo de trabajo de 0.693, ecuación (4.47). Por tanto, a través de la ecuación (4.48) se calcula el rizado máximo,

Se debe tener en cuenta que el rizado de corriente de la inductancia del elevador puede afectar a la pila de combustible en la conexión del sistema completo. Este efecto se analizará en profundidad en el Capítulo 5.

4.2.2.2 Cálculo de las pérdidas de potencia en el elevador

Primero se analiza qué elementos conducen para cada instante, Figura 4.32:

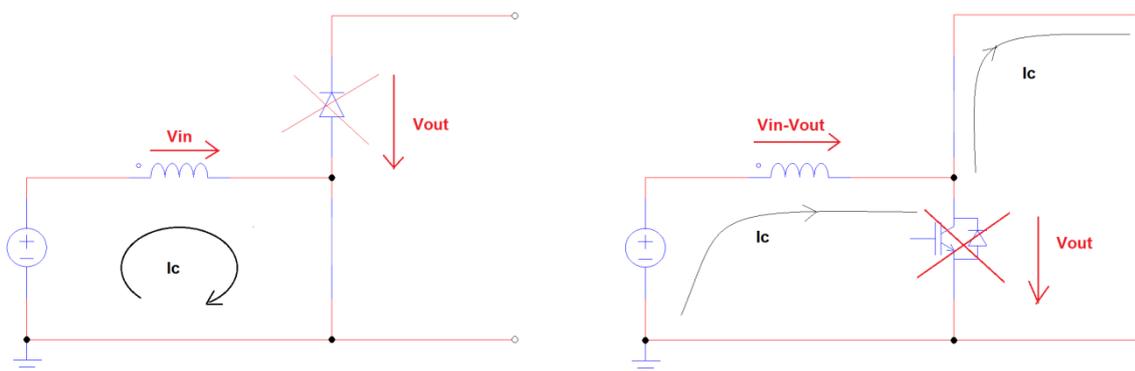


Figura 4.32 -Esquema de la conducción de los elementos del Elevador

- **Durante Ton:**

Como se observa, el IGBT es el elemento que se encuentra conduciendo durante:

- **Durante Toff:**

En este caso es el diodo el elemento que se encuentra conduciendo corriente durante:

Siendo la frecuencia de conmutación 16.6 kHz

Dado un periodo de conmutación entero, los elementos se comportarán como queda definido en la siguiente Figura 4.33. Se evalúa la situación que presenta mayores pérdidas ya que el ciclo de trabajo es alto lo que implica que el IGBT, que es el elemento que más pérdidas produce de ambos, conduzca durante un tiempo mayor.

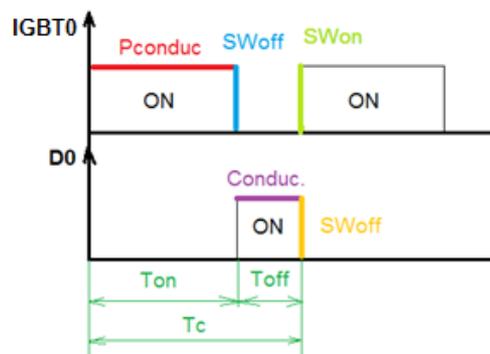


Figura 4.33- Esquema de la conmutación de los elementos

El análisis de pérdidas se realiza sobre dos configuraciones diferentes para el Elevador. La primera es la utilizada en la simulación, y la segunda es la estructura real de Elevador, caracterizada por tener dos IGBTs en paralelo.

- **Configuración 1:**

I. **Pérdidas en el IGBT0:**

En el IGBT se van a producir pérdidas durante la conducción y tanto en el encendido como en el apagado. Por tanto, la energía de pérdidas total será la siguiente:

(4.49)

Para realizar el cálculo de las pérdidas es necesario acudir a la hoja de características del IGBT. En la siguiente tabla se recogen los valores de los parámetros del IGBT de la hoja de características y del circuito real para el que se supone el peor de los casos, es decir, en el que circula el máximo de corriente que se puede extraer de la pila, además, dado que es un sistema comercial se supone que el transistor está preparado para la máxima temperatura posible.

Hoja de características	Circuito real

Tabla 4.4- Parámetros IGBT

a. **Pérdidas de conducción**

Es necesario partir de la corriente que circula por el Elevador, $I_c=60$ A, y de la tensión para hallar el valor de V_{CE} por medio de la siguiente gráfica, Figura 4.34.

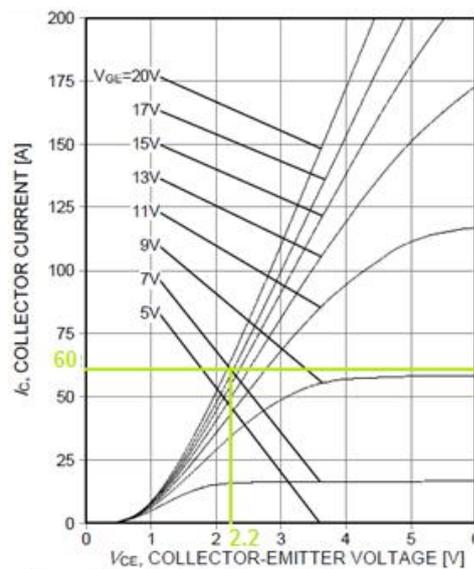


Figure 6. Typical output characteristic
($T_j=175^\circ\text{C}$)

Figura 4.34—Gráfica I_c -VCE [21]

La potencia de pérdidas durante la conducción será la siguiente:

Dado que la conducción del IGBT se realiza durante el Ton, las pérdidas expresadas en energía por ciclo serán las siguientes:

b. Pérdidas de conmutación

Las pérdidas que se van a analizar corresponden con la conmutación del transistor. Para calcularlas hay que tomar el dato del valor de la energía para el encendido y apagado que se encuentra en la hoja de características, Tabla 4.5.

Switching Characteristic, Inductive Load, at $T_{vj} = 175^{\circ}\text{C}$

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	max.	
IGBT Characteristic						
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_{vj} = 175^{\circ}\text{C}$, $V_{CC} = 400\text{V}$, $I_C = 50.0\text{A}$, $V_{GE} = 0.0/15.0\text{V}$, $r_G = 7.0\Omega$, $L_{\sigma} = 90\text{nH}$, $C_{\sigma} = 60\text{pF}$ L_{σ} , C_{σ} from Fig. E Energy losses include "tail" and diode (IKW50N60H3) reverse recovery.	-	23	-	ns
Rise time	t_r		-	31	-	ns
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	273	-	ns
Fall time	t_f		-	24	-	ns
Turn-on energy	E_{on}		-	1.42	-	mJ
Turn-off energy	E_{off}		-	1.13	-	mJ
Total switching energy	E_{is}	-	2.55	-	mJ	

Tabla 4.5- Características de conmutación del IGBT [21]

Dado que los valores de tensión y corriente a los que está referido el dato de energía no corresponden con los del sistema que estamos evaluando habrá que ajustarlos.

$$\frac{E_{on}}{V_{CC} I_C} = \frac{E_{on}}{400 \times 50} = \frac{E_{on}}{20000} \quad \frac{E_{off}}{V_{CC} I_C} = \frac{E_{off}}{400 \times 50} = \frac{E_{off}}{20000}$$

Finalmente, se pueden obtener, a través de la ecuación (4.51), las pérdidas totales del IGBT expresadas en términos de energía para un solo ciclo.

Además se calculan la potencia de pérdidas totales,

—

)

II. Pérdidas en el diodo

El diodo presenta pérdidas durante su conducción además de en el apagado, ya que las pérdidas durante el encendido son mínimas y pueden considerarse despreciables.

Al igual que para el IGBT hay que acudir a la hoja de características del diodo para obtener los parámetros necesarios.

Hoja de características	Circuito real

Tabla 4.6- *Parámetros del diodo*

a. Pérdidas de conducción

A partir de la corriente de 60 A y la temperatura que se supone de $T_c=175$ C dado que se trata de un aparato comercial, se halla por medio de la Figura 4.36 la tensión V_F necesaria para el cálculo de pérdidas, ésta será de 2.5V.

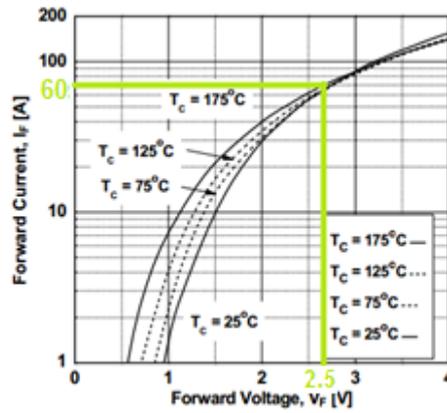


Figura 4.35- Gráfica IF-VF [22]

Las pérdidas durante la conducción por tanto serán:

Dado que el diodo va a conducir durante el t_{off} podemos calcular las pérdidas expresadas en energía.

b. Pérdidas de conmutación

A través de los datos de la Tabla 4.7, se calcula la energía durante el apagado del diodo. Teniendo en cuenta que los valores a los que está referido el dato de energía no corresponden con los del circuito, hay que adaptarlos por medio de la ecuación (4.58).

Electrical Characteristics of the Diode $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max	Units	
V_{FM}	Diode Forward Voltage	$I_F = 30\text{A}$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	-	2.1	2.6	V
			$T_C = 175^\circ\text{C}$	-	1.7	-	
E_{rec}	Reverse Recovery Energy	$I_F = 30\text{A},$ $dI_F/dt = 200\text{A}/\mu\text{s}$	$T_C = 175^\circ\text{C}$	-	127	-	μJ
t_{rr}	Diode Reverse Recovery Time		$T_C = 25^\circ\text{C}$	-	47	-	ns
			$T_C = 175^\circ\text{C}$	-	212	-	
I_{rr}	Diode Peak Reverse Recovery Current		$T_C = 25^\circ\text{C}$	-	3.7	-	A
			$T_C = 175^\circ\text{C}$	-	8.8	-	
Q_{rr}	Diode Reverse Recovery Charge	$T_C = 25^\circ\text{C}$	-	87	-	nC	
		$T_C = 175^\circ\text{C}$	-	933	-		

Tabla 4.7- Características eléctricas del diodo [22]

Por tanto, el total de energía de pérdidas en el diodo puede obtenerse sustituyendo los valores hallados en la ecuación (4.55).

Se calcula también la potencia de pérdidas del diodo teniendo en cuenta que conduce durante T_{off} .

—

(4.59)

Por tanto, la energía y potencia total de pérdidas en los semiconductores del elevador será la siguiente:

Se calcula además la eficiencia del Elevador considerando únicamente las pérdidas en los semiconductores, ya que el propósito de este análisis es la comparación de las dos configuraciones posibles, no se evalúan las pérdidas producidas en la inductancia.

- Configuración 2

El convertidor real de Ingeteam, a partir del cual se basan los valores de los parámetros en la simulación, presenta una configuración diferente. Dispone de dos IGBTs conectados en paralelo como se muestra en la siguiente figura.

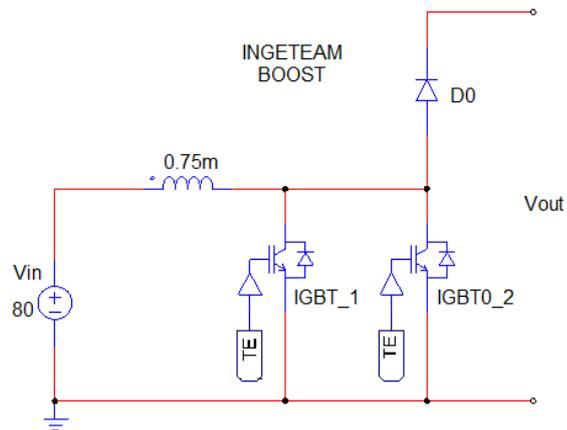


Figura 4.36- Modelo del convertidor Elevador de Ingeteam

La principal diferencia respecto al modelo que se ha evaluado en el punto anterior reside en que durante el T_{on} ambos IGBTs van a encontrarse conduciendo y por tanto, la corriente que circulará través de ellos será, —

Debido a la reducción de la corriente, el convertidor tendrá menores pérdidas de conducción. Por otro lado, las pérdidas de conmutación serán el doble que para el caso con un solo IGBT por lo que se va a realizar que estructura resulta más conveniente.

I. Pérdidas en el IGBT

Como para el caso anterior, los datos de los parámetros necesarios se recogen en la siguiente Tabla 4.8:

Hoja de características	Circuito Real

Tabla 4.8- Valores de operación

a. Pérdidas de conducción

Se va a realizar el cálculo de pérdidas para un único transistor teniendo en cuenta que la nueva corriente que circula es de 30 A. Dado que se cuenta con dos interruptores por los

que circula la misma corriente se concluye que las pérdidas de conducción totales serán el doble de las calculadas para un transistor.

A partir de la corriente que va a circular por el IGBT y la tensión VGE se obtiene la tensión VCE por medio de la gráfica, Figura 4.37.

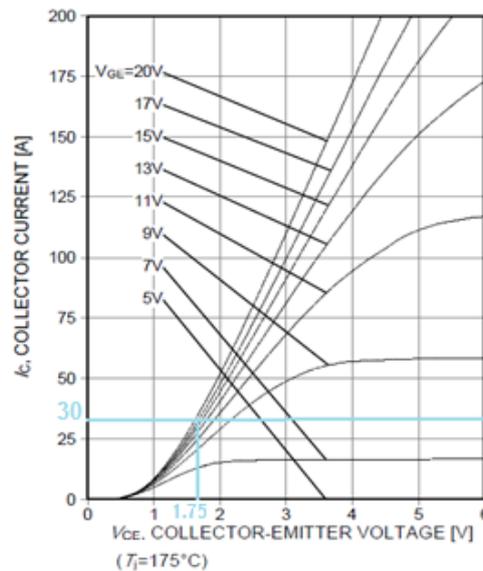


Figura 4.37- Curva I_c - V_{GE} de las características del IGBT [21]

Se observa que el valor de V_{GE} es de 1.75V.

Por tanto se puede hallar el valor de las pérdidas tanto en términos de potencia como de energía ya que como para la configuración anterior, el IGBT va a conducir durante el T_{on} . Además, dado que se compone de dos IGBTs, habrá que sumar las pérdidas de cada uno de ellos.

b. Pérdidas de conmutación

Al igual que para el caso con un IGBT, se acude a las hojas de características para conocer el valor de la energía durante el encendido y apagado. Además, dado que dicho valor de energía no está referenciado a los valores reales de corriente y tensión del circuito habrá que escalarlo. Por último, habrá que tener en cuenta que la configuración presenta dos IGBTs.

$$\frac{P_{IGBT1} + P_{IGBT2}}{P_{IGBT1} + P_{IGBT2} + P_{Diodo}}$$

Por tanto, las pérdidas totales para una estructura con dos IGBTs se calculan por medio de la ecuación (4.49):

Se calcula además las pérdidas de potencia:

$$P_{Diodo}$$

II. Pérdidas en el Diodo

Las pérdidas en el diodo van a continuar siendo las mismas, ya que para esta nueva configuración solo se modifican los IGBTs.

Por tanto se puede calcular la energía y potencia de pérdidas total del sistema.

$$\frac{P_{Diodo}}{P_{Diodo} + P_{IGBT1} + P_{IGBT2}}$$

Se calcula el rendimiento del Elevador,

$$\frac{P_{Diodo}}{P_{Diodo} + P_{IGBT1} + P_{IGBT2}}$$

- Comparativa de estructuras

En la Tabla 4.9 se incluyen las pérdidas y rendimientos para cada estructura denominadas, estructura 1-IGBT e 2-IGBT.

ELEVADOR	
Estructura 1-IGBT	Estructura 2-IGBT

Tabla 4.9: Comparativa entre las dos estructuras del Elevador

Analizando los resultados recogidos en la tabla anterior, se observa la ligera mejora producida en la eficiencia del sistema colocando en paralelo dos IGBTs.

CAPÍTULO 5

SISTEMA COMPLETO: CONVERTIDOR Y PILAS DE COMBUSTIBLE

5.1. Introducción

La estructura final capaz de entregar a red la potencia generada por la pila de combustible se compone de los siguientes elementos:

- 4 pilas de combustible
- Convertidor Elevador
- Convertidor Resonante HF
- Inversor

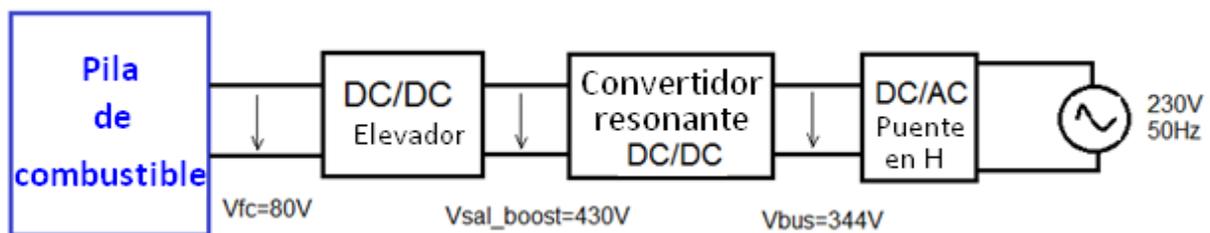


Figura 5.1- Estructura final con niveles de tensión de cada etapa.

Dado el sistema completo se debe asegurar que ningún elemento se ve afectado por la conexión de las pilas con la etapa inversora, para ello se analiza el comportamiento del mismo y se examinan las tensiones de cada etapa.

Además, es necesario incidir en las interacciones entre la pila de combustible y convertidor global. En concreto estudiar cómo afectan los rizados de corriente y tensión que demanda el convertidor ya que podría verse afectada por el rizado de corriente presente a la salida de la pila o la resonancia del convertidor.

Para obtener la máxima potencia para la que se ha diseñado el sistema, la pila de combustible debe generar 60 A y 80V trabajando a una temperatura óptima de 55°C. Esta potencia, dado un comportamiento ideal de los elementos que componen el sistema, se entrega en su totalidad a red. Como ha sido mencionado en el capítulo 4, será necesario

realizar un control de potencia sobre la pila de combustible para regular el punto de funcionamiento de las mismas.

5.2. Efecto de los rizados de corriente y tensión introducido por el convertidor en la pila

5.2.1 Etapa resonante: rizado de 100 kHz

La resonancia es un efecto de alta frecuencia y puede resultar perjudicial para las pilas de combustible por lo que se debe evaluar si la corriente resonante del Convertidor DC/DC Resonante podría afectar a las pilas.

Para examinar el posible efecto se simulan las corrientes que circulan entre la pila y la entrada al Convertidor DC/DC resonante, es decir, la corriente de entrada al tanque resonante, la entrada y salida al Elevador y la salida de las pilas de combustibles, Figura 5.2.

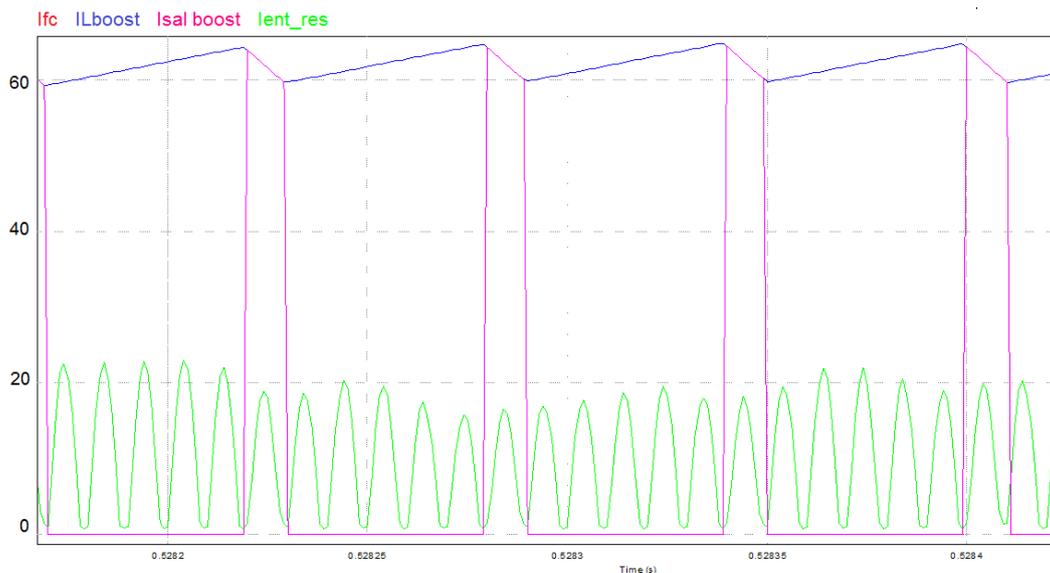


Figura 5.2- Simulación de las Corrientes que pueden verse afectadas por la resonancia

Se observa como el efecto de la resonancia no alcanza al Elevador dado que es absorbida por el condensador de 80 μF que se encuentra entre el Elevador y el inversor de Medio-Puente. Por lo tanto tampoco afectará a la pila de combustible.

5.2.2 Elevador: rizado de 16.6 kHz en la corriente de la pila

La principal diferencia al operar con el sistema completo reside en que el rizado de corriente de 16.6kHz del Elevador alcanza a la pila. Por tanto, las corrientes y tensiones generadas por la pila van a verse afectadas, como se observa en la Figura 5.3 y 5.4.

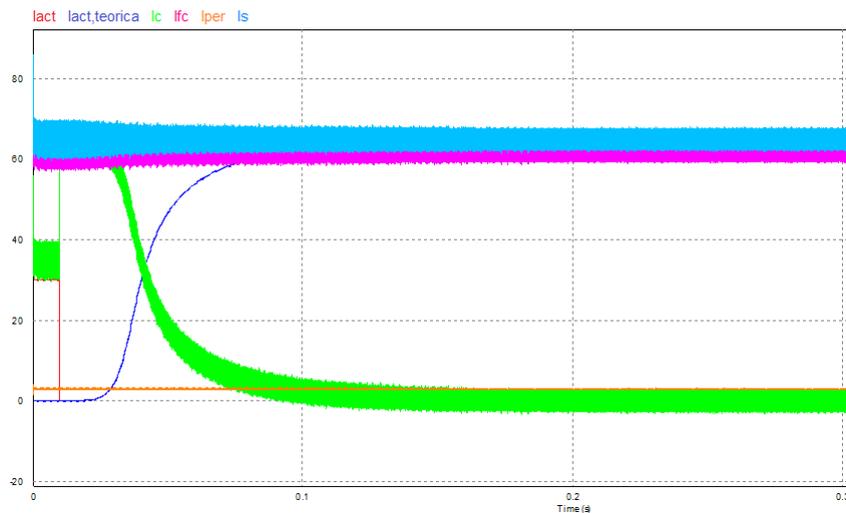


Figura 5.3- Corrientes generadas por la pila de combustible con el sistema completo conectado a $T=55$

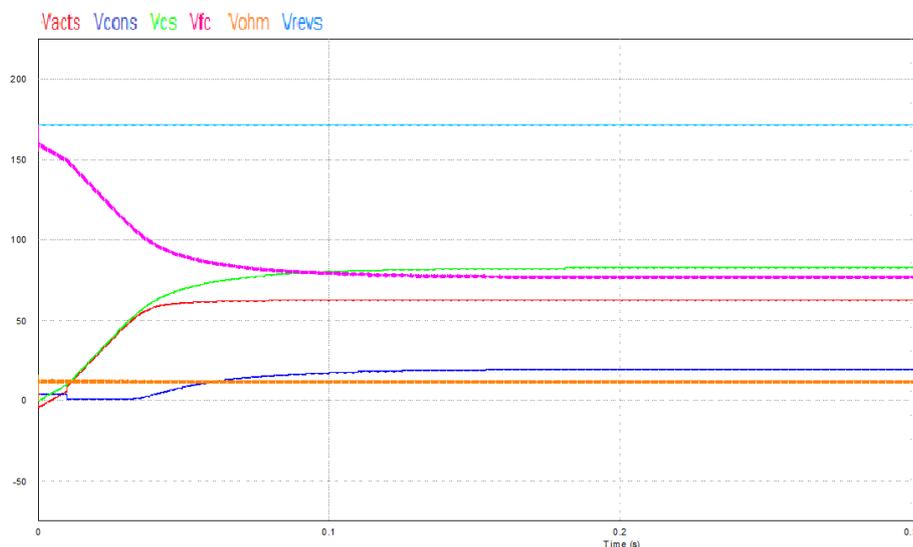


Figura 5.4- Tensiones generadas por la pila de combustible con el sistema completo conectado a $T=55$

A pesar del rizado que presentan las ondas, los valores medios tanto de las corrientes como de las tensiones son los mismos que han sido obtenidos para el estudio de la pila de forma individual, como se comprueba en la siguiente imagen:



Figura 5.5- Valores medios de tensión y corriente generados por la pila

Debido a que la tensión y corriente presentan un rizado, la potencia entregada por la pila por tanto también tendrá un rizado como se muestra en Figura 5.7.

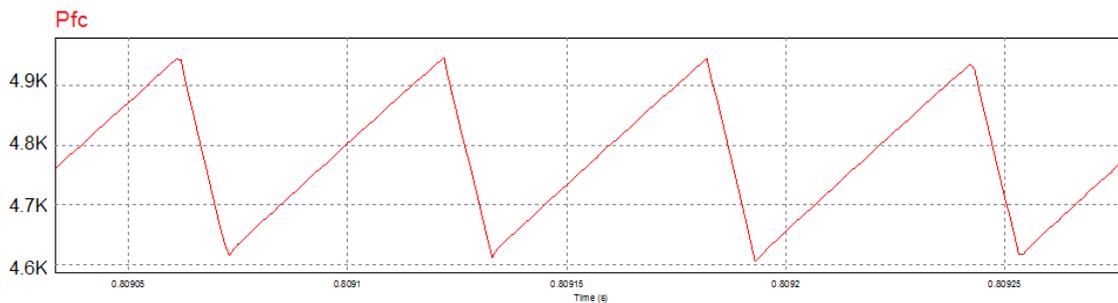


Figura 5.6- Rizado en la potencia entregada por la pila de combustible, a $T=55$

El valor de potencia varía entre 4.6 kW y 4.95 kW, y su valor medio seguirá siendo el adecuado:

Se realiza un estudio para analizar el efecto del rizado sobre pila de forma individual. Para incluir el rizado de corriente al modelo en la simulación de la pila se utiliza un interruptor

que habilita una fuente senoidal en paralelo con la fuente DC de corriente, tal y como se muestra en la Figura 5.7.

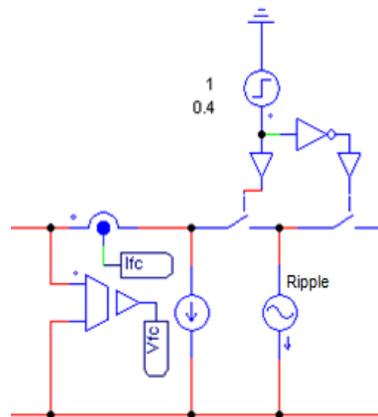


Figura 5.7- Rizado de corriente

Durante los primeros instantes se simula el sistema para 55°C y con una fuente DC de corriente de 60 A. Una vez alcanzado el estacionario se añade un rizado senoidal a 100 Hz, con un valor de 6 A pico a pico. Los resultados de la simulación se muestran en la siguiente figura:

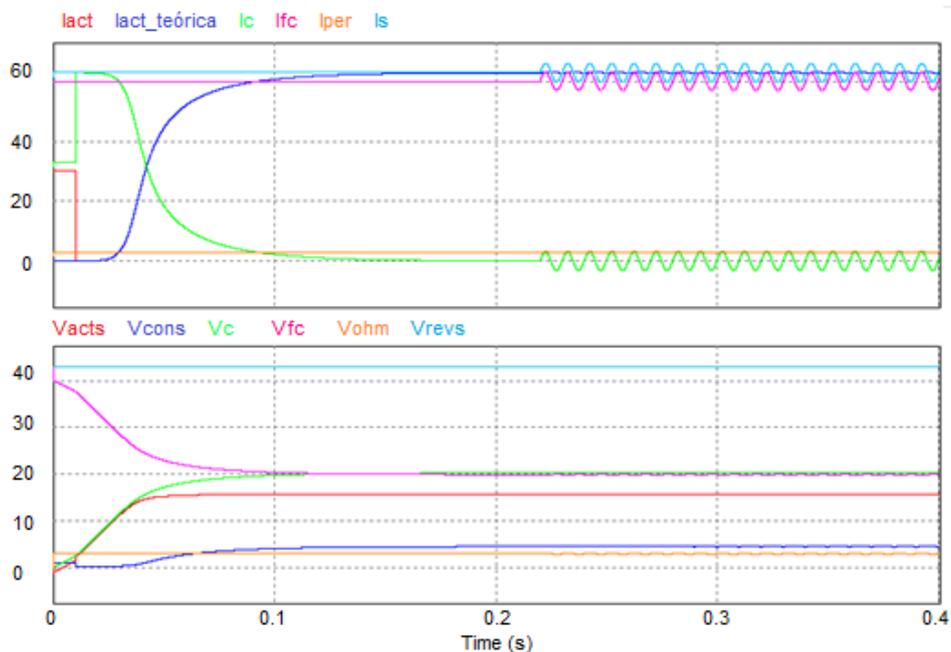


Figura 5.8- Tensiones y corrientes para $T=55^{\circ}\text{C}$, $I_{fc}=60\text{ A}$ con un rizado senoidal de corriente de amplitud 6 A y a una frecuencia de 100Hz para $t=0.22$.

Al igual que en la simulación del sistema completo, un rizado en la corriente de salida afecta al resto de corrientes y tensiones.

Para observar el efecto sobre la potencia de la pila se añade un rizado a diferentes frecuencias. Los resultados se recogen en la Tabla 5.1.

RIZADO	POTENCIA
Fuente de corriente DC	Pfc= 1193 W
F=0.1Hz	Pfc=1190 W
F=1Hz	Pfc=1190.4 W
F=10Hz	Pfc=1192.2 W
F=100Hz	Pfc=1192.7 W

Tabla 5.1- Potencia entregada por la pila para distintos rizados de corriente

Analizando los resultados se comprueba como prácticamente la potencia no se ve afectada por el rizado de corriente. Aún y todo, el efecto es ligeramente superior para frecuencias bajas. Por otra parte, para altas frecuencias, el condensador no aprecia el rizado por lo que la pila se comporta como si fuera una fuente DC de corriente.

5.2.3 Etapa inversora: rizado de 100 Hz

Debido a la conexión a red de la etapa inversora, la pila de combustible va a verse afectada por un rizado de corriente de 100 Hz. Además, debido a la relación entre la corriente y tensión de la pila por medio de la curva I-V, dicho rizado también afectará a las tensiones de la misma. Este rizado puede plantear problemas internos en la pila ya que al no ser una frecuencia elevada podría llegar a afectar al comportamiento químico de ésta.

5.3. Análisis y simulación del sistema completo

5.3.1. Comprobación de los niveles de tensión

Un factor importante que hay que comprobar es el del nivel de tensión de cada bloque. Para la situación en la que se extrae la máxima potencia de la pila de combustible,

4.8kW, existen unas tensiones definidas en cada etapa que aseguran el correcto funcionamiento del sistema y posibilitan la entrega de potencia a red.

Los valores de tensión adecuados ya han sido analizados sistema en la Sección 4, y son los siguientes:

- $V_{fc} = 80 \text{ V}$
- $V_{out,boost} = 430 \text{ V}$
- $V_{bus} = 344 \text{ V}$
- $V_{red} = \text{---} \text{ V (pico pico)}$

Se realiza la simulación del sistema completo con el objetivo de observar si algún elemento se ha visto afectado. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.2.

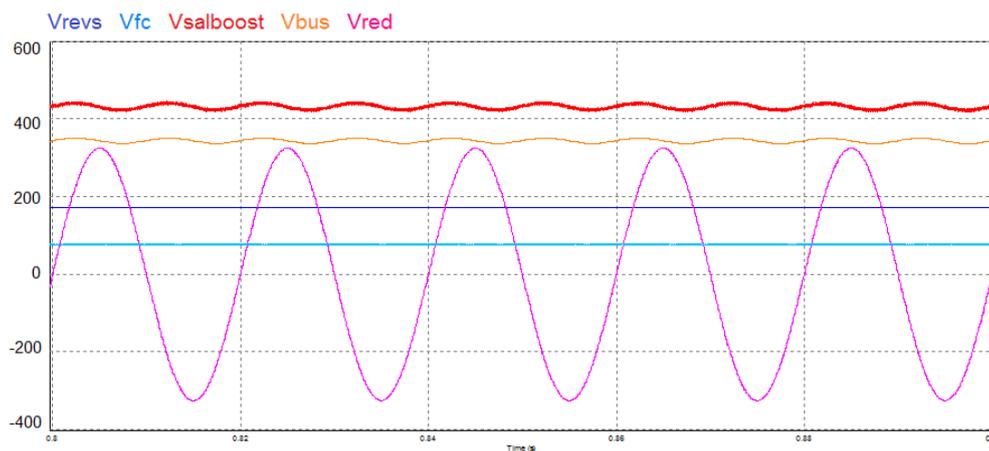


Figura 5.9- Simulación de los niveles de tensión del sistema

La tensión del bus debe permanecer constante, para ello, como ya ha sido explicado, se realiza un control de tensión en el puente en H.

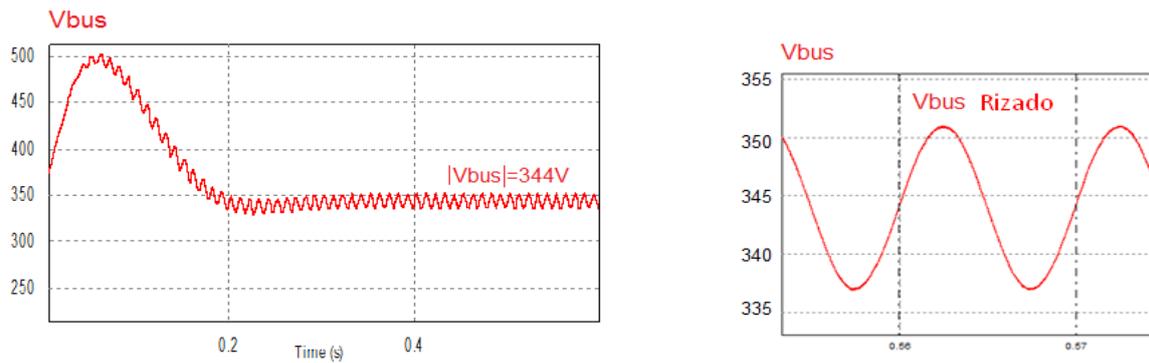


Figura 5.10- Simulación de V_{bus} y su rizado.

Se observa un rizado a 100 Hz en la tensión que provoca una oscilación del valor de V_{bus} entre 336.84 V y 351.15 V, por lo que la amplitud del rizado es de 14.3 V.

Sin embargo el valor medio de V_{bus} , una vez alcanzado el estado estacionario es el óptimo, 344 V.

El porcentaje del rizado es bajo por lo que se puede concluir que el valor del condensador utilizado en el bus de continua es el adecuado.

5.2.2 Análisis de la potencia del sistema

Se analiza la potencia generada por la pila de combustible que pasará por el resto del sistema para inyectarla a la red eléctrica. Dicha potencia de entrada y salida del sistema se muestra en la Figura 5.3.

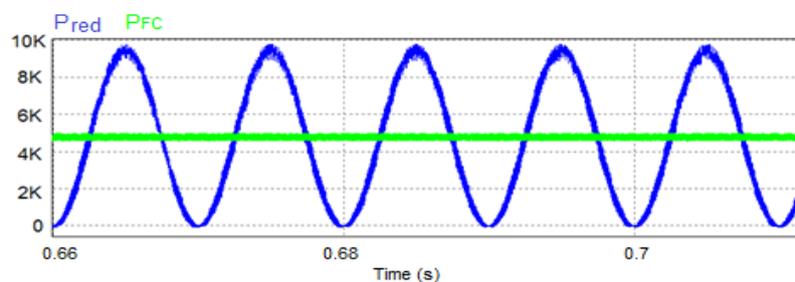


Figura 5.11- Simulación de la potencia generada por la pila de combustible, y la potencia entregada a red

5.4. Lazos de control de potencia

Es necesario implementar un control sobre el punto de operación de la pila para poder extraer la potencia deseada. Por ello, dependiendo de la potencia requerida, se generará por medio del control una corriente de referencia que se introduce en el lazo de control de corriente del elevador.

Para ello se plantean tres opciones. Las dos primeras están dirigidas para el sistema trabajando con las cuatro pilas de combustible al mismo tiempo. La opción más simple se realiza en lazo abierto a través del elemento "look-up table", mientras que la segunda se implementa a través de un control en lazo cerrado mediante el elemento "C-block". Por último, la tercera opción plantea un control en lazo cerrado para el seguimiento de puntos de máxima eficiencia a través de la conexión y desconexión de las pilas de combustible. De esta forma, se notifica el número de pilas y el punto de trabajo de éstas para entregar la potencia deseada maximizando el rendimiento

5.4.1 Control en lazo abierto

Como se ha mencionado antes, se establece un control en lazo abierto introduciendo un elemento llamado "look-up table" que consiste en una tabla en la que se pueden almacenar datos. En este caso es necesario introducir los valores de potencia y corriente que describen el comportamiento de la pila que han sido obtenidos en el Capítulo 2.

Introduciendo la potencia de referencia requerida, P_{ref} , el "Look-up Table" genera el valor de corriente de pila correspondiente a dicha potencia. Este valor es introducido al lazo de control de corriente del elevador como la corriente de referencia.

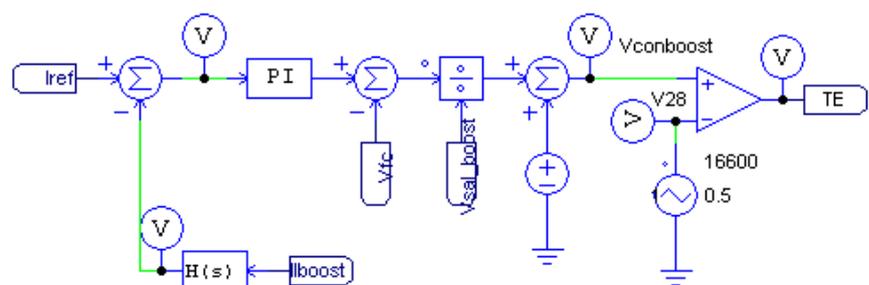
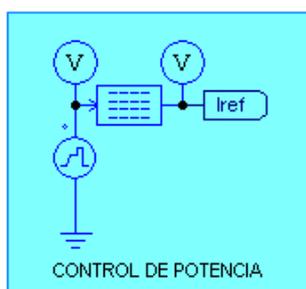


Figura 5.12- Control de potencia en lazo abierto

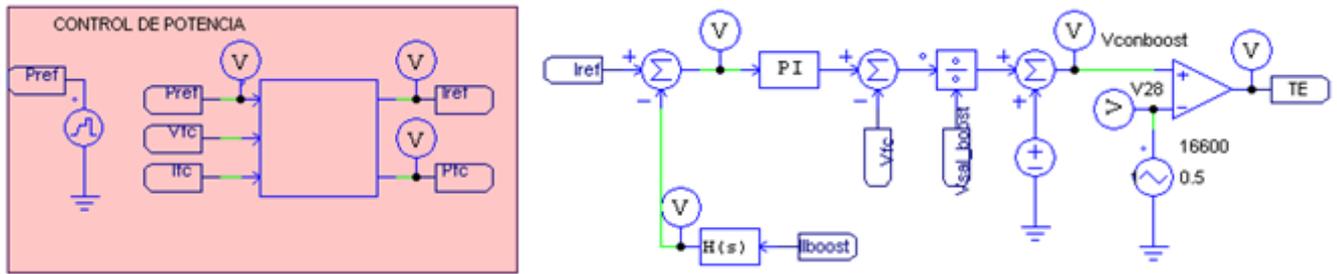


Figura 5.14- Control en lazo cerrado

En primer lugar, analizando el comportamiento de la potencia y la corriente de la pila a una temperatura de 55 °C, se observa como la relación entre ambas se puede aproximar de forma lineal si se establecen cuatro tramos, Figura 5.12. Esto servirá para poder asignar el valor inicial para la corriente de referencia a través de la expresión de la recta del tramo en el que se encuentre la potencia demandada.

La potencia depende de la temperatura de la pila, por tanto, la aproximación planteada mediante ecuaciones lineales sería errónea para temperaturas que no fueran la establecida en las medidas (55 °C). Por ello, en segundo lugar, se realiza una comparación entre la potencia de referencia y la medida. En función de la diferencia entre ambos, en el modelo para determinar si existe una gran diferencia, en cuyo caso la corriente de referencia se incrementa o disminuye según sea necesario hasta reducir la diferencia por debajo de unos límites aceptados.

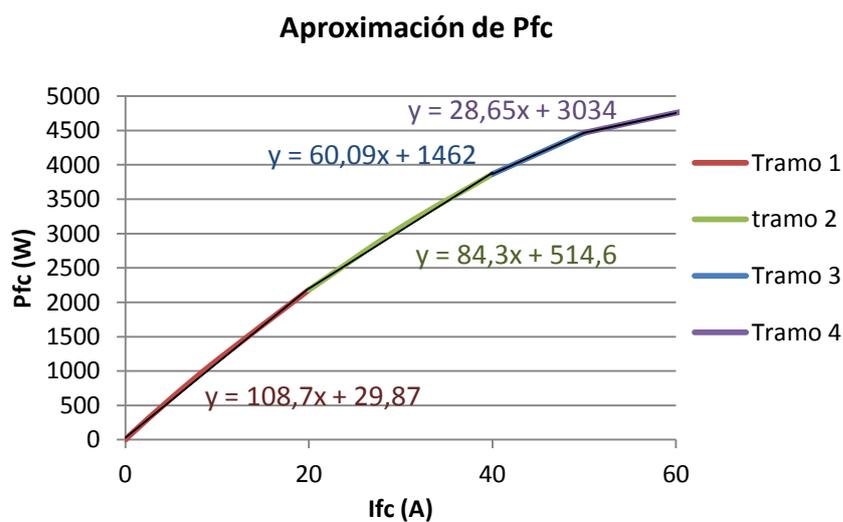


Figura 5.15- Aproximación de la curva de potencia en cuatro tramos

Por lo tanto, el código de control, incluido en el Anexo 1, que ha sido implementado deberá realizar lo siguiente:

- I. Leer la referencia, P_{ref} .
- II. Determinar la región correspondiente a la potencia de referencia.
- III. Calcular la corriente inicial de referencia, I_{ref} (para 55°C).
- IV. Obtener la potencia de la pila, P_{fc} a través de la lectura de la tensión V_{fc} y corriente I_{fc} del modelo.
- V. Comparar las potencias P_{fc} y P_{ref} , y evaluar la diferencia. Si la diferencia es mayor de 50W , el programa generará una nueva referencia de corriente.
- VI. Calcular la nueva corriente de referencia:
 - I_f
 - I_f

Para exponer de forma más clara el comportamiento de este programa se muestra en la Figura 2.13 la evolución de los puntos de operación establecidos por el programa dada una temperatura de trabajo de 25°C .

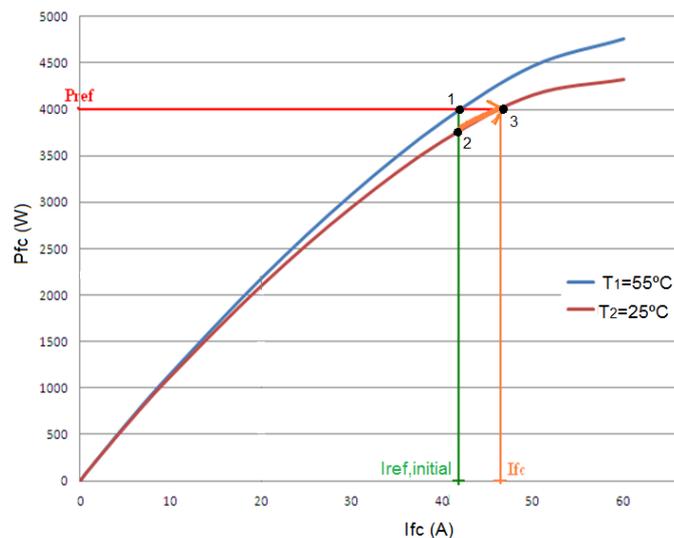


Figura 5.16- Operación del programa para 25°C

- Punto 1: Primera aproximación

Tras introducir P_{ref} , se obtiene un valor de corriente I_{ref} para la curva de potencia a 55°C .

- Punto 2: Potencia generada por la pila para Iref

El valor de dicha potencia es distinto al de la Pref demandada ya que la temperatura de operación de las pilas no es la óptima.

- Punto 3: Pfc=Pref

La Iref deberá incrementarse hasta que la potencia entregada por la pila sea igual a la demandada.

Para comprobar el funcionamiento del control se realiza una simulación en la que se impone como potencia de referencia un cambio de 3000 a 2000W para la temperatura de operación óptima, 55 °C y para 25 °C. Los resultados se muestran en la Figura 5.14.

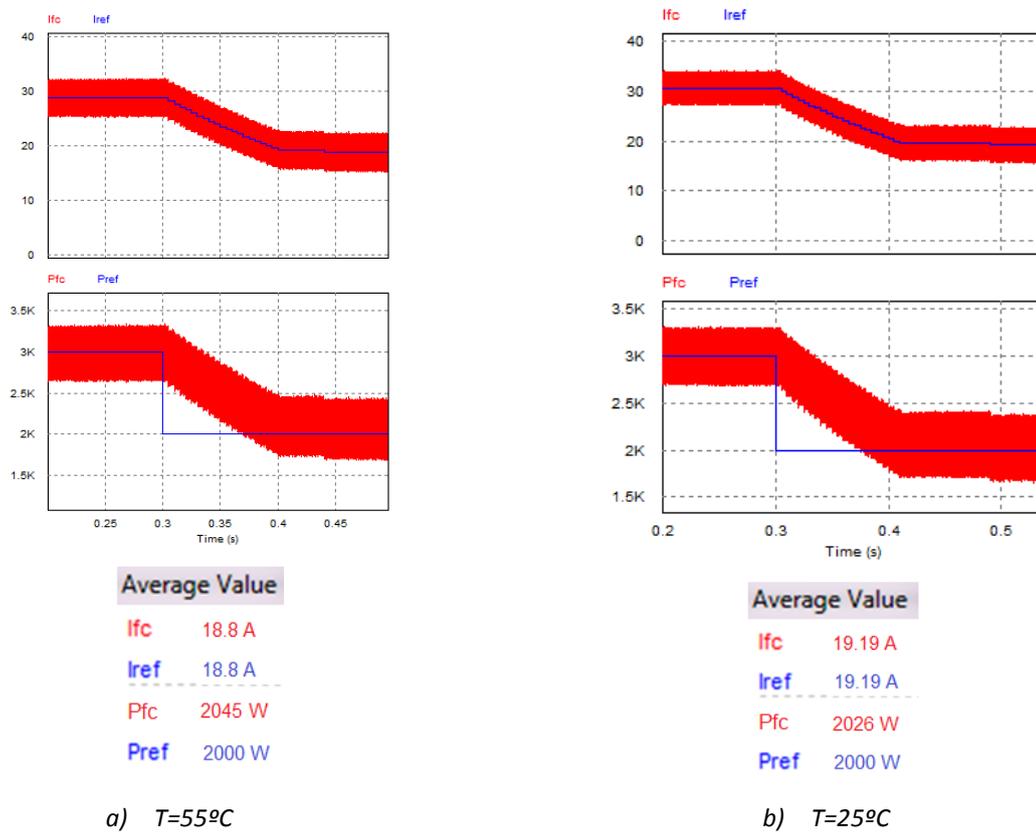


Figura 5.17- Simulación de la corriente y potencia para 55 °C y 25 °C

Se observa como la corriente de referencia para obtener 2000 W a una temperatura de 25°C es mayor que la requerida a 55°C, lo que implica que se está ajustando la corriente para alcanzar la potencia de referencia impuesta.

5.3.3 Control para el seguimiento del punto máxima eficiencia (MEPT)

En el Capítulo 3 se ha examinado el rendimiento de la pila y el comportamiento de la conexión desde 1 a 4 pilas en serie. Las conclusiones que podemos extraer de ese estudio son las siguientes:

- Si se considera un consumo de combustible asociado a los periféricos para las pilas que no se encuentran conectadas, se determina que la configuración óptima siempre será la conexión de las 4 pilas de combustible en serie. En este caso podría utilizarse el control en lazo cerrado realizado en la sección anterior.
- Si se establece que las pilas de combustibles que se encuentran desconectadas son invisibles para el resto del sistema, es decir, su consumo es nulo, se puede determinar que para bajas potencias el sistema es más eficiente para menos pilas conectadas.

Se realiza un último estudio la relación entre la corriente de la pila y la potencia eléctrica obtenida a la salida de ésta para la conexión de 1 a 4 pilas, teniendo en cuenta la influencia de la temperatura.

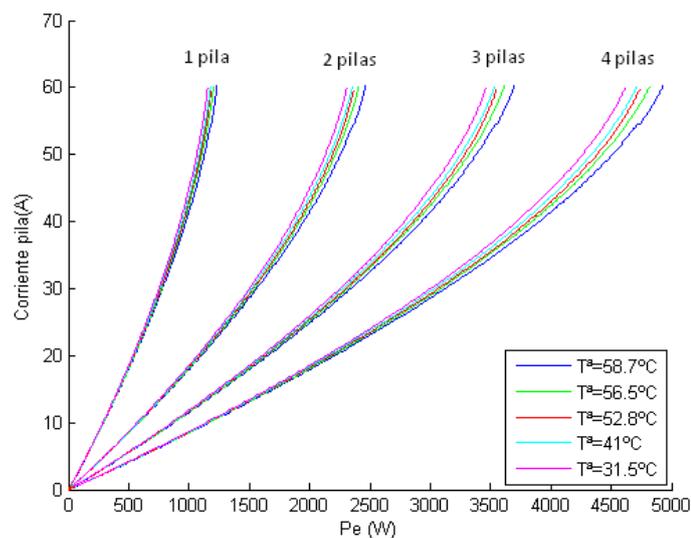


Figura 5.18- Corriente de la pila para la conexión de 1 a 4 pilas en serie distintas temperaturas

Se percibe el efecto de la temperatura, ya que dada cierta potencia, a temperaturas altas de operación, es necesaria una corriente menor y viceversa.

En este apartado se pretende utilizar dichos resultados para realizar un control que determine el número de pilas conectadas según la potencia que se esté demandado, además de qué corriente debe circular por las mismas. Este control se llamará "Control para el seguimiento del punto de máxima eficiencia (MEPT)".

En este caso, y dado que la temperatura nominal de operación es de 55°C, se utilizarán para el control los datos correspondientes a una temperatura de 56.5°C ya que es la que más se aproxima.

Es importante recalcar que debido a las pérdidas que se producen en la bobina y el diodo del elevador, ya que no es ideal, la tensión mínima a la que se puede alimentar es de aproximadamente 40 V. Esto se debe a que para valores más bajos, el ciclo de trabajo sería demasiado alto.

Por tanto, debido a que la tensión de salida de una única pila es de 20 V, serán siempre necesarias como mínimo dos pilas conectadas en serie, es decir, 40V, para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Por tanto, en número de pilas conectadas en serie podrá ser:

- 2 pilas de combustible
- 3 pilas de combustible
- 4 pilas de combustible

Finalmente se determinan a partir de la Figura 3.13, los rangos de potencia que aseguran la máxima eficiencia para cada configuración:

Número de pilas en funcionamiento	Potencia (W)
2	0 - 1182
3	1182 – 1668.5
4	1668.5-4800

Tabla 5.2- Rangos de potencia que maximizan el rendimiento para 2,3 y 4 pilas en serie

Para su implementación en PSIM se debe escribir un código en “C-Block” cuyas salidas determinen la corriente de referencia que se introduce al lazo de corriente del Elevador así como las órdenes de encendido o apagado de las pilas, Figura 5.15.

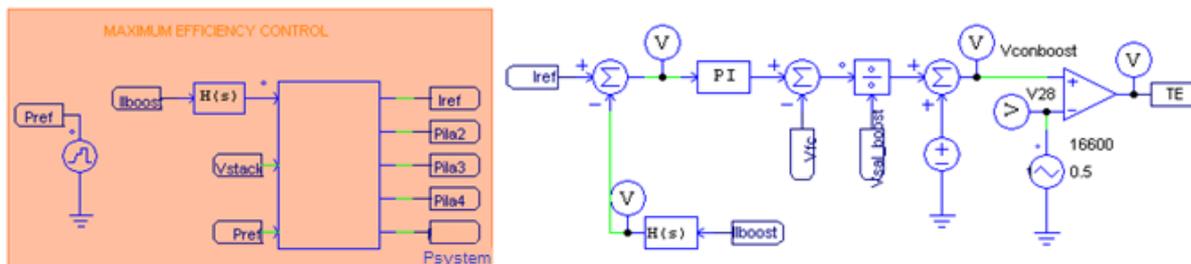


Figura 5.19- Control de seguimiento de máxima eficiencia en PSIM

Hasta ahora, las cuatro pilas se encuentran siempre operando. Sin embargo, para este último control se debe implementar la forma de conectar y desconectar las pilas. Para ello se utilizan interruptores que aseguren el correcto funcionamiento del sistema. En la simulación, se debe tener en cuenta que las fuentes de tensión no pueden trabajar en cortocircuito mientras que las de corriente no pueden operaren circuito abierto.

Como ha sido explicado en el Capítulo 2, el problema de la conexión en serie es que si un módulo opera en diferentes condiciones que el resto, provoca una disminución de la eficiencia del sistema global. En la simulación, las pilas que se encuentren apagadas afectarán al resto del sistema y por tanto es necesario añadir un diodo en anti paralelo a cada pila.

El esquema en PSIM de la conexión final de las pilas de combustible, así como la interacción n con el bloque de conversión se incluye en el Anexo 1.

El código del control que se incluye en el Anexo 1 va a realizar lo siguiente:

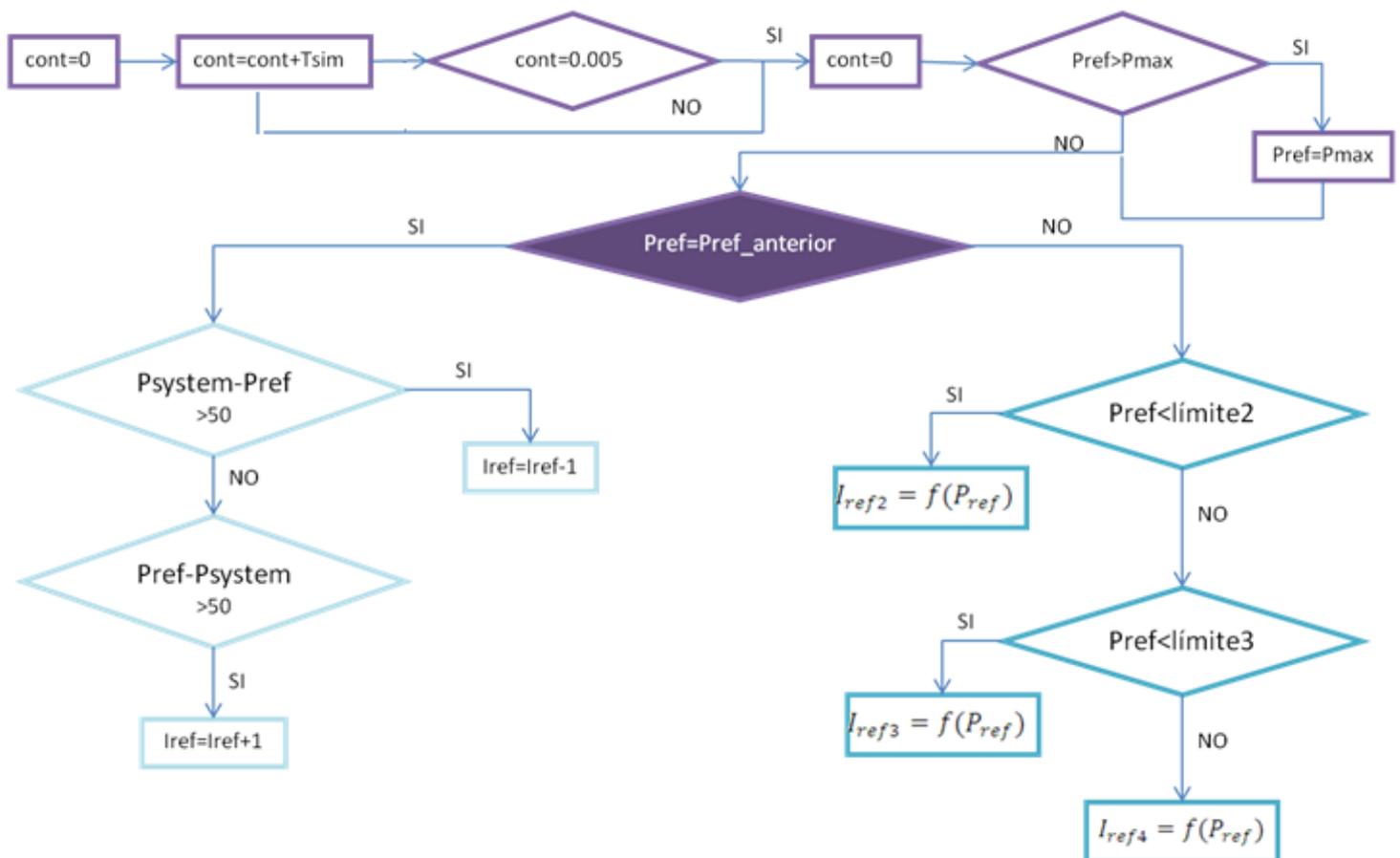
I. Asignar la configuración y la corriente I_{ref} según la potencia demandada P_{ref}

Tras la lectura del valor de referencia y de la potencia de salida del sistema, cada vez que la potencia demandada cambia, el control evalúa que configuración es la óptima para el sistema (número de pilas que deben conectarse) y calcula la corriente I_{ref} para alcanzar la potencia de referencia.

II. Variaciones en la corriente de referencia

Cuando la potencia de referencia es constante, el control comprueba si el valor de potencia generado por las pilas de combustible es el mismo que el demandado. Si esto no es así, normalmente ocurre debido a que se opera para una temperatura distinta de los 56.5 °C, la corriente de referencia aumenta o disminuye hasta que las potencias tengan un valor parecido.

5.3.3.1 Diagrama de flujo



5.3.3.2 Simulación

Para comprobar el correcto funcionamiento del control, se introduce una referencia de potencia. Dicha potencia varía a lo largo del tiempo. Se observará la rapidez y precisión del control ante diferentes tipos de referencia.

Primero se introduce una referencia rampeada, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura.

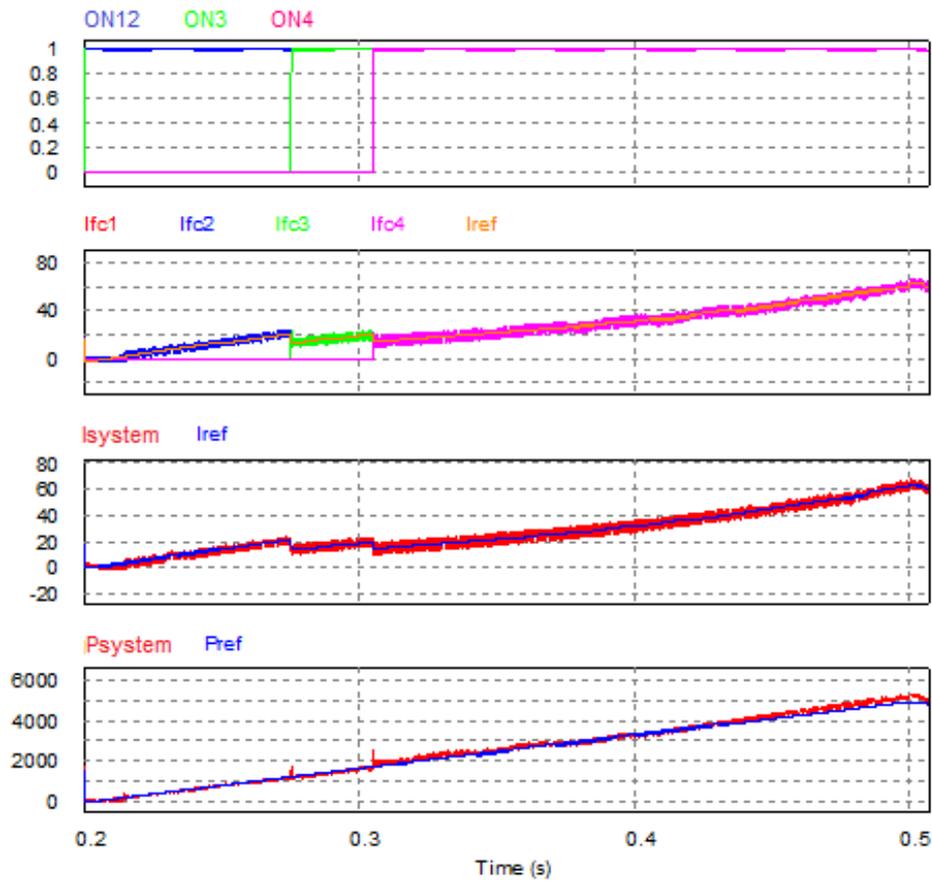


Figura 5.20- Simulación del sistema para una referencia tipo rampa

Se observa que cuando la referencia de potencia aumenta, la referencia de corriente también lo hace, y por tanto la corriente de las pilas y su potencia.

Al comienzo de la simulación se encuentran operando únicamente dos pilas, sin embargo, cuando la referencia de potencia alcanza el límite de 673.9 W (Tabla 5.1), el control conecta la tercera pila. Después de esto, cuando la referencia llega al valor del segundo límite, 1668.5 W, las cuarta pila comienza a generar.

Se percibe que en los momentos en los que una nueva pila es conectada, la corriente de la pila desciende, por lo que cantidad de combustible necesaria para alimentarlas es menor.

En la siguiente figura se simula el sistema para una demanda de la potencia de referencia descendente. En este caso el análisis se centra sobre la desconexión de las pilas:

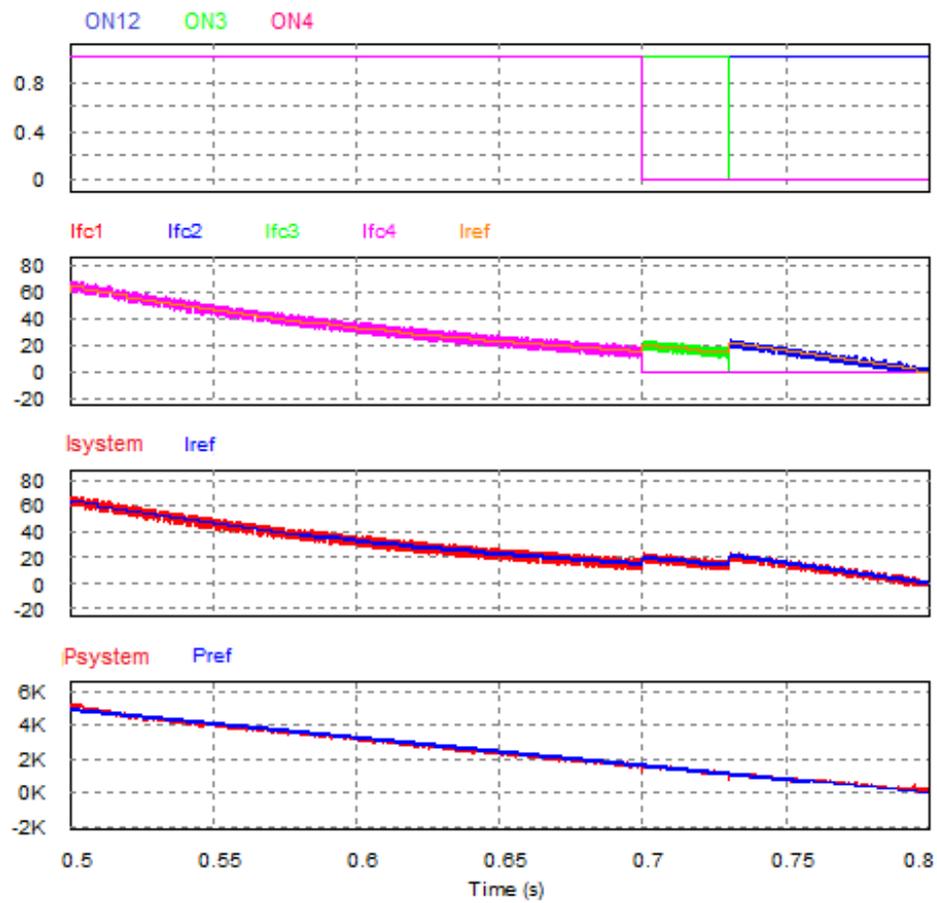


Figura 5.21- Simulación del sistema para una referencia de tipo rampa

Finalmente, en la última figura se comprueba el comportamiento del circuito ante un cambio brusco en la referencia. Para ello se somete al sistema a un escalón en la potencia de referencia que va desde 0 a 3000 W, por tanto, el número de pilas operativas debe pasar de 2 a 4.

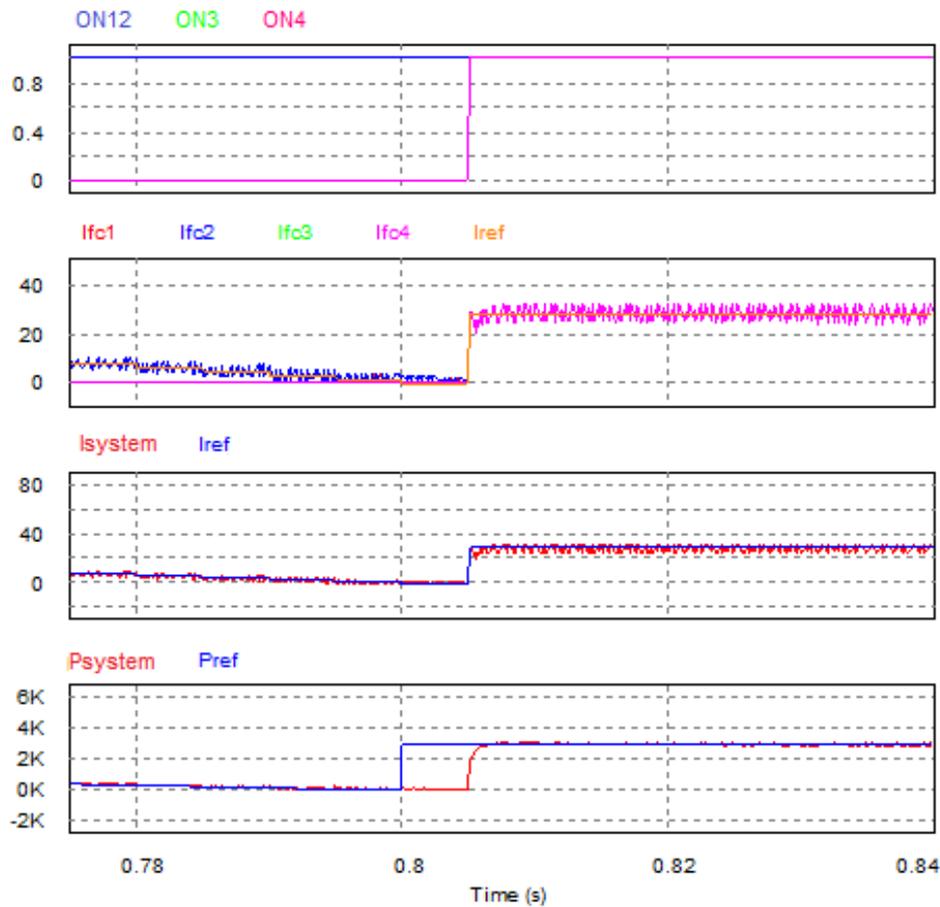


Figura 5.22- Simulación del sistema para una referencia de tipo escalón

Como se puede observar un periodo de tiempo en el que las nuevas pilas conectadas presentan un rizado en la tensión. Sin embargo, este periodo es muy corto y el rizado nunca alcanza valores peligrosos de tensión.

Como ejemplo, las curvas de eficiencia y los puntos de operación de las pilas para un cambio en la potencia de referencia de 1000 a 3000W, se muestra en la Figura 5.24.

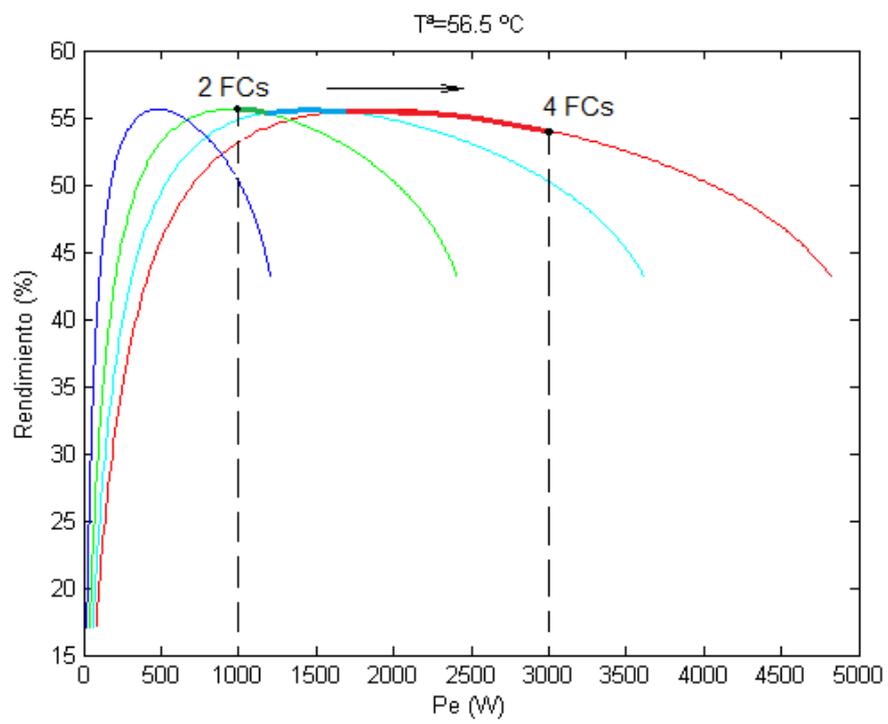


Figura 5.23- Cambio en la conexión de las pilas para una referencia de 1000 a 3000

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

Se ha realizado el análisis teórico del funcionamiento de un sistema de generación eléctrica formado por pilas de combustible y una etapa inversora.

Se ha hecho especial hincapié en el análisis del funcionamiento de las pilas desde el punto de vista eléctrico. Para ello se ha presentado el modelo eléctrico de las mismas que posteriormente ha sido simulado. Se ha comprobado que la potencia generada depende de la corriente extraída y de la temperatura de operación principalmente.

Se ha realizado un estudio de las posibles etapas de conversión de potencia que permitan la correcta inyección a red de la potencia generada por las pilas de combustible. Se ha concluido con la selección del inversor más adecuado. Éste se compone de un Elevador, que permite aumentar la tensión de salida de las pilas de combustible, un convertidor resonante DC/DC, que proporciona aislamiento galvánico y permite reducir las pérdidas de conmutación de los transistores y un inversor en puente en H, capaz de convertir la tensión del bus de continua a alterna y adaptarla para su inyección a red.

Se ha desarrollado un estudio teórico de los elementos que componen la etapa inversora y que permiten, mediante la implementación de un control de potencia, establecer el punto de trabajo de la pila de combustible.

Se han analizado las posibles interacciones entre la pila y el convertidor centrando el estudio en los efectos que podría tener los rizados de corriente generados a 16.6kHz de frecuencia en el Elevador, a 100kHz en el convertidor resonante y a 100 Hz en la etapa inversora.

Además, se ha desarrollado un algoritmo de control para el seguimiento del punto de máxima eficiencia (MEPT) cuando se desea entregar una potencia determinada. Éste control se basa en la conexión y desconexión de las pilas que componen el sistema. Para ello se ha realizado un estudio de cada configuración estableciendo unos rangos de potencia para los que cada configuración maximiza la eficiencia del sistema.

Como líneas futuras se plantea la adaptación de la etapa elevadora del inversor de Ingeteam, ya que éste está dirigido a operar en sistemas fotovoltaicos, por lo que habría que modificarlo para las condiciones V-I de la instalación de las pilas de combustible.

Además se realizaría la conexión serie de las pilas añadiendo un sistema de protección que actuará ante fallos en las pilas permitiendo que el sistema continúe generando potencia.

Para la implementación del algoritmo MEPT, sería necesario realizar una evaluación de la ganancia en eficiencia tras la implantación del control frente a los costes que conlleva la conexión de las pilas y la colocación de una protección extra.

Por último se plantea la validación experimental del proyecto realizado en especial el control de seguimiento del punto de máxima eficiencia (MEPT) planteado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Petr Moldrik, Roman Chvalek, *“PEM Fuel Cells - The Basic Characteristics”*, Department of Electrical Power Engineering, VSB - Technical University of Ostrava, Czech Republic.
- [2] Vincenzo Naso, Marco Lucentini, Marco Aresti, *“Evaluation of the overall efficiency of a low pressure Proton-Exchange Membrane Fuel Cell power unit”*, 2000, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering.
- [3] J. Larminie and A. Dicks, *“Fuel Cell Systems Explained – Second Edition”*, 2003, Wiley, Oxford, England.
- [4] K. Kordesh and G. Simander, *“Fuel Cells and Their Applications”*, 1996, VCH, Publishers, Inc., New York, USA.
- [5] Idoia San Martín, Alfredo Ursúa, Pablo Sanchis, *“Modeling of PEM Fuel Cell Performance: Steady-State and Dynamic Experimental Validation”*, Energies 2014.
- [6] Alberto Berrueta, *“Caracterización de sistemas electroquímicos para su aplicación en una microrred”*, 2013, UPNA.
- [7] Petr Moldrik, Roman Chvalek, *“PEM Fuel Cells - The Effect of Fuel Parameters on Efficiency and Quality of Electric Power Supply”*, Department of Electrical Power Engineering VSB - Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic.
- [8] Carlos Andrés Ramos-Paja, Carlos Bordons, Alfonso Romero, Roberto Giral and Luis Martínez-Salamero, *“Minimum Fuel Consumption Strategy for PEM Fuel Cells”*, IEEE.
- [9] Burak Ozpineci, Zhong Du, Leon M. Tolbert, Donald J. Adams, Donald Collings, *“Integrating multiple solid oxide fuel cell modules”*, Department of Electrical and Computer Engineering, Tennessee.
- [10] Gérard Coquery, Alexandre De Bernardinis, *“First Approach for a Fault Tolerant Power Converter Interface for Multi-Stack PEM Fuel Cell Generator in Transportation Systems”*.
- [11] Hendrik Dohle, *“Current source with series connected cells”*, 2000, Patent number: CA 2 398727 (A1).
- [12] Denis Candusso, Alexandre De Bernardinis, Marie-Cécile Péra, Fabien Harel, Xavier François, Daniel Hissel, Gérard Coquery, Jean-Marie Kauffmann, *“Fuel cell operation under degraded working modes and study of diode by-pass dedicated to multi-stack association”*, 2007, Elsevier.

- [13] Denis Candusso, Alexandre De Bernardinis, Fabien Harel, Xavier François, Gérard Coquery, *“Experiments of a 20 cell PEFC operating under fault conditions with diode bypass circuit for uninterrupted power delivery”*, 2009.
- [14] Josef Lersch, Arno Matthejat, *“Direct-current power supply device comprising a number of series-connected fuel cell blocks”*, Siemens, 2001, Patent number: WO 02/045197 (A3).
- [15] Victor W. Logan, James W. Dandaliedes, *“System stack contingency and efficiency switching”*, General Motors Corporation, 2007, Patent number: US 7247398.
- [16] Timothy LaBreche, *“Fuel cell including bypass circuit for interconnecting fuel cell”*, 2010, Adaptive Materials Inc, Patent number: US 7799481 (B2).
- [17] Shanna D. Knights, Jacob W. De Vaal, Michael V. Lauritzen, David P. Wilkinson, *“Electrochemical fuel cell stack having a plurality of integrated voltage reversal protection diodes”*, Ballard Power Systems Inc, 2005, Patent number: US 7235315 (B2)
- [18] I. Sánchez, *“Integración de sistemas de producción de hidrógeno en parques eólicos conectados a la red: configuraciones, estrategias de gestión y topologías de conversión electrónica”*, UPNA, España, 2013.
- [19] Hoja de características del IGBT del Elevador: IGW50N60H3, 600 V high speed switching series third edition, Infeneon.
- [20] Hoja de características del diodo del Elevador: PCFF30S65W, 650 V, 30 A, Stealth.
- .

ANEXOS 1

PROGRAMA PARA EL CONTROL DE POTENCIA

1. Control básico de potencia

```
//Definición de parámetros
```

```
double Pref;  
double Ifc,Vfc,Pfc;  
static double counter=0;  
static double i=0;  
static double Iref;
```

```
#define lim0 2179.6  
#define lim1 3865.6  
#define lim2 4466.5  
#define lim3 4778
```

```
#define m0 108.7  
#define n0 29.87
```

```
#define m1 84.3  
#define n1 519.6
```

```
#define m2 60.09  
#define n2 1462
```

```
#define m3 28.65  
#define n3 3034
```

```
//Entradas
```

```
Pref=in[0];  
Vfc=in[1];  
Ifc=in[2];
```

```
//Algoritmo de control
```

```
Pfc=Ifc*Vfc;  
if (Pref>lim3)  
    Pref=lim3;  
counter=counter+delt;
```

```
//Valor inicial de Iref

if (counter>0.005){
    counter=0;
    i=i+1;

    if (i<10){
        if (Pref<lim0){
            Iref=(Pref-n0)/m0;}
        else
            if (Pref<lim1){
                Iref=(Pref-n1)/m1;}
            else
                if (Pref<lim2){
                    Iref=(Pref-n2)/m2;}
                else
                    Iref=(Pref-n3)/m3;
        }
    Else
        if ((Pfc-Pref)>50)
            Iref=Iref*0.98;
        if ((Pref-Pfc)>50)
            Iref=Iref*1.02
    }

//Salidas
out[0]=Iref;
out[1]=Pfc;
```

2. Control del seguimiento del punto de máxima eficiencia (MEPT)

```
// ALGORITMO DE CONTROL PARA LA CONEXIÓN DE PILAS

//Definición de parámetros

double Pref,Pref_anterior=0;
double Ifc,Vsystem,Psystem;
static double contador=0;
static double Iref;
int Pila2=0,Pila3=0,Pila4=0;
int num_pilas;
static double i=0;
//Potencia máxima
    #define Pmax 5000

//Límite de potencia para el paso de pilas conectadas 2 a 3
    #define lim2 1182

//Límite de potencia para el paso de pilas conectadas 3 a 4
    #define lim3 1668.5

//Iref para 2 pilas conectadas
    #define m11 (3.141E-9)
    #define m12 (-6.2416E-6)
    #define m13 0.021681
    #define m14 (-0.69679)

//Iref para 3 pilas conectadas
    #define m21 (9.367E-10)
    #define m22 (-2.774E-6)
    #define m23 0.01445
    #define m24 (-0.69679)

//Iref para 4 pilas conectadas
    #define m31 (3.9263E-10)
    #define m32 (-1.56E-6)
    #define m33 0.01084
    #define m34 (-0.69679)

//Entradas

Ifc=in[0];
Vsystem=in[1];
Pref=in[2];
```

```
//Algoritmo de control
```

```

Psystem=Ifc*Vsystem;
if (Pref>Pmax){
    Pref=Pmax;}

contador=contador+delt;

if (contador>0.005){
    contador=0;

    if (Pref==Pref_anterior){
        if ((Psystem-Pref)>200)
            Iref=Iref-1;
        if ((Pref-Psystem)>200)
            Iref=Iref+1;}

    else{
        if (Pref<lim2){
            num_pilas=2;
            Pila2=1;
            Pila3=0;
            Pila4=0;
            Iref=(m11*(Pref*Pref*Pref))+(m12*(Pref*Pref))+(m13*Pref)+m14;}

        else{
            if (Pref<lim3){
                num_pilas=3;
                Pila2=1;
                Pila3=1;
                Pila4=0
                Iref=(m21*(Pref*Pref*Pref))+(m22*(Pref*Pref))+(m23*Pref)+m24;}

            else{
                num_pilas=4;
                Pila2=1;
                Pila3=1;
                Pila4=1;
                Iref=(m31*(Pref*Pref*Pref))+(m32*(Pref*Pref))+(m33*Pref)+m34;}}

    Pref_anterior=Pref;}

```

```
//Salidas
```

```

out[0]=Iref;
out[1]=Pila2;
out[2]=Pila3;
out[3]=Pila4;
out[4]=Psystem;

```

ANEXO 2

PROGRAMA EN MATLAB

```

%% POTENCIAS Y RENDIMIENTOS
%% Datos reales
load('datos_IV')
load('datos_H2')
load('ecuaciones') %(ecuaciones que aproximan la curva de potencia de hidrógeno y periféricos)

%% Potencia eléctrica
Pe1=I1.*V1;
Pe2=I2.*V2;
Pe3=I3.*V3;
Pe4=I4.*V4;
Pe5=I5.*V5;

%% Potencia hidrógeno
PCI=3;% Poder calorifico inferior del hidrogeno [kWh/Nm3]

Ph2_1=f1*(60/1000)*PCI*1000;
Ph2_2=f2*(60/1000)*PCI*1000;
Ph2_3=f3*(60/1000)*PCI*1000;
Ph2_4=f4*(60/1000)*PCI*1000;
Ph2_5=f5*(60/1000)*PCI*1000;

%Cálculo Ph2 para I1,I2,I3,I4,I5
for i=1:length(I1)
    Ph21(i)=ecuacion1.coeff(1)*I1(i)+ecuacion1.coeff(2);%potencia hidrógeno para I1
end
for i=1:length(I2)
    Ph22(i)=ecuacion2.coeff(1)*I2(i)+ecuacion2.coeff(2);%potencia hidrógeno para I2
end
for i=1:length(I3)
    Ph23(i)=ecuacion3.coeff(1)*I3(i)+ecuacion3.coeff(2);%potencia hidrógeno para I3
end
for i=1:length(I4)
    Ph24(i)=ecuacion4.coeff(1)*I4(i)+ecuacion4.coeff(2);%potencia hidrógeno para I4
end
for i=1:length(I5)
    Ph25(i)=ecuacion5.coeff(1)*I5(i)+ecuacion5.coeff(2);%potencia hidrógeno para I5
end

%Función de I que aproxima la potencia de hidrógeno
pendientepH2=[ecuacion1.coeff(1),ecuacion2.coeff(1),ecuacion3.coeff(1),ecuacion4.coeff(1),ecuacion5.coeff(1)];
ordenadaspH2=[ecuacion1.coeff(2),ecuacion2.coeff(2),ecuacion3.coeff(2),ecuacion4.coeff(2),ecuacion5.coeff(2)];

m_media=mean(pendientepH2);
n_media=mean(ordenadaspH2);

for i=1:length(I1)
    Ph2_med1(i)=m_media*I1(i)+n_media;%potencia hidrógeno para I1
end
for i=1:length(I2)
    Ph2_med2(i)=m_media*I2(i)+n_media;%potencia hidrógeno para I5
end
for i=1:length(I3)

```

```

Ph2_med3(i)=m_media*I3(i)+n_media;%potencia hidrógeno para I5
end
for i=1:length(I4)
Ph2_med4(i)=m_media*I4(i)+n_media;%potencia hidrógeno para I5
end
for i=1:length(I5)
Ph2_med5(i)=m_media*I5(i)+n_media;%potencia hidrógeno para I5
end

```

%Cálculo de Ph2 TOTAL (suma de la potencia de hidrógeno de las pilas on)

```

pilas_total=4;
for i=1:length(I1)%Tª1
for pilas_conectadas=1:pilas_total
Ph2total1(pilas_conectadas,i)=pilas_conectadas*Ph21(i);
end
end
for i=1:length(I2)%Tª2
for pilas_conectadas=1:4
Ph2total2(pilas_conectadas,i)=pilas_conectadas*Ph22(i);
end
end
for i=1:length(I3)%Tª3
for pilas_conectadas=1:4
Ph2total3(pilas_conectadas,i)=pilas_conectadas*Ph23(i);
end
end
for i=1:length(I4)%Tª4
for pilas_conectadas=1:4
Ph2total4(pilas_conectadas,i)=pilas_conectadas*Ph24(i);
end
end
for i=1:length(I5)%Tª5
for pilas_conectadas=1:4
Ph2total5(pilas_conectadas,i)=pilas_conectadas*Ph25(i);
end
end

```

%% Rendimiento

%Cálculo rendimiento para I1,I2,I3,I4,I5 SIN PERIFERICOS

```

for i=1:length(I1)
rend_pila1(i)=(Pe1(i)/Ph2_med1(i)*100);
end
for i=1:length(I2)
rend_pila2(i)=(Pe2(i)/Ph2_med2(i)*100);
end
for i=1:length(I3)
rend_pila3(i)=(Pe3(i)/Ph2_med3(i)*100);
end
for i=1:length(I4)
rend_pila4(i)=(Pe4(i)/Ph2_med4(i)*100);
end
for i=1:length(I5)
rend_pila5(i)=(Pe5(i)/Ph2_med5(i)*100);
end

```

%Calculo del rendimiento TOTAL, CON PERIFERICOS

```

pilas_total=4;
for i=1:length(I1)%Tª1
for pilas_conectadas=1:4
rendimientototal1(pilas_conectadas,i)=100*(pilas_conectadas*Pe1(i)-(4-
pilas_conectadas)*Pper(1))/(Ph2_med1(i)*pilas_conectadas);
end
end

```

```

for i=1:length(I2)%T^2
for pilas_conectadas=1:4
    rendimientototal2(pilas_conectadas,i)=100*(pilas_conectadas*Pe2(i)-(4-
pilas_conectadas)*Pper(1))/(Ph2_med2(i)*pilas_conectadas);
end
end
for i=1:length(I3)%T^3
for pilas_conectadas=1:4
    rendimientototal3(pilas_conectadas,i)=100*(pilas_conectadas*Pe3(i)-(4-
pilas_conectadas)*Pper(1))/(Ph2_med3(i)*pilas_conectadas);
end
end
for i=1:length(I4)%T^4
for pilas_conectadas=1:4
    rendimientototal4(pilas_conectadas,i)=100*(pilas_conectadas*Pe4(i)-(4-
pilas_conectadas)*Pper(1))/(Ph2_med4(i)*pilas_conectadas);
end
end
for i=1:length(I5)%T^5
for pilas_conectadas=1:4
    rendimientototal5(pilas_conectadas,i)=100*(pilas_conectadas*Pe5(i)-(4-
pilas_conectadas)*Pper(1))/(Ph2_med5(i)*pilas_conectadas);
end
end

```

%% Potencia periféricos

%%Cálculo lper real

```

ko=1.524;
k1=-1.208*(10^-3);
k2=4.118*(10^-4);
for i=1:length(I1)
    lper1(i)=k2*I1(i)^2+k1*I1(i)+ko;
end
for i=1:length(I2)
    lper2(i)=k2*I2(i)^2+k1*I2(i)+ko;
end
for i=1:length(I3)
    lper3(i)=k2*I3(i)^2+k1*I3(i)+ko;
end
for i=1:length(I4)
    lper4(i)=k2*I4(i)^2+k1*I4(i)+ko;
end
for i=1:length(I5)
    lper5(i)=k2*I5(i)^2+k1*I5(i)+ko;
end

```

%%toma de datos manual(figura 9 articulo)

```

Vfcper=[31,29.5,28.3,27.5,27,25.5,23.9,22.5,21];
lfcper=[0,5,10,15,20,30,40,50,60];

```

```

for i=1:length(lfcper)
    lper(i)=k2*lfcper(i)^2+k1*lfcper(i)+ko;
    Pper(i)=lper(i)*Vfcper(i);
end

```

%%Cálculo de la Pper para I1,I2,I3,I4,I5

```

for i=1:length(I1)
    Pper1(i)=ecuacionper.coeff(1)*(I1(i))^3+ecuacionper.coeff(2)*(I1(i))^2+ecuacionper.coeff(3)*I1(i)
)+ecuacionper.coeff(4);
end
for i=1:length(I2)
    Pper2(i)=ecuacionper.coeff(1)*(I2(i))^3+ecuacionper.coeff(2)*(I2(i))^2+ecuacionper.coeff(3)*I2(i)
)+ecuacionper.coeff(4);
end

```

```

end
for i=1:length(I3)
Pper3(i)=ecuacionper.coeff(1)*(I3(i))^3+ecuacionper.coeff(2)*(I3(i))^2+ecuacionper.coeff(3)*I3(i)
)+ecuacionper.coeff(4);
end
for i=1:length(I4)
Pper4(i)=ecuacionper.coeff(1)*(I4(i))^3+ecuacionper.coeff(2)*(I4(i))^2+ecuacionper.coeff(3)*I4(i)
)+ecuacionper.coeff(4);
end
for i=1:length(I5)
Pper5(i)=ecuacionper.coeff(1)*(I5(i))^3+ecuacionper.coeff(2)*(I5(i))^2+ecuacionper.coeff(3)*I5(i)
)+ecuacionper.coeff(4);
end

```

%% Balance de pérdidas

```

%%Cálculo de Pérdidas para I1,I2,I3,I4,I5
for i=1:length(I1)
Pperdidas1(i)=Ph21(i)-Pe1(i)-Pper1(i);
end
for i=1:length(I2)
Pperdidas2(i)=Ph22(i)-Pe2(i)-Pper2(i);
end
for i=1:length(I3)
Pperdidas3(i)=Ph23(i)-Pe3(i)-Pper3(i);
end
for i=1:length(I4)
Pperdidas4(i)=Ph24(i)-Pe4(i)-Pper4(i);
end
for i=1:length(I5)
Pperdidas5(i)=Ph25(i)-Pe5(i)-Pper5(i);
end

```

%% GRÁFICA CURVA I-V MAS CONSUMO H2

```

figure
title('Curva I-V')
hold all %gráfica de la tensión y corriente de la pila (Ifc,Vfc)
plotyy(I1,V1,I1f,f1), xlabel('Ifc (A)'), ylabel('Vfc (V)')%Tª=58.7
plotyy(I2,V2,I2f,f2)%Tª=56.5
plotyy(I3,V3,I3f,f3)%Tª=52.8
plotyy(I4,V4,I4f,f4)%Tª=41
plotyy(I5,V5,I5f,f5)%Tª=31.5
legend('Tª=58.7°C', 'Tª=56.5°C', 'Tª=52.8°C', 'Tª=41°C', 'Tª=31.5°C')

plot(I1f,f1)%gráfica del consumo de hidrógeno(NL min^-1) y la corriente
plot(I2f,f2)
plot(I3f,f3)
plot(I4f,f4)
plot(I5f,f5)

```

%% GRÁFICA RENDIMIENTO RESPECTO I

```

figure %gráfica del rendimiento de la pila
title ('1 PILA')
hold all
plot(I1,rend_pila1),xlabel('Ifc (A)'), ylabel('rendimiento')
plot(I2,rend_pila2)
plot(I3,rend_pila3)
plot(I4,rend_pila4)
plot(I5,rend_pila5, 'r')

```

%% GRÁFICA POTENCIA ELÉCTRICA,HIDRÓGENO Y RENDIMIENTO

```

figure
title ('1 PILA')
hold all

```

```

plotyy(I1,Ph2_med1,I1,rend_pila1)%potencia de hidrógeno y rendimiento
plotyy(I1,Ph2_med1,I2,rend_pila2)
plotyy(I1,Ph2_med1,I3,rend_pila3)
plotyy(I1,Ph2_med1,I4,rend_pila4)
plotyy(I1,Ph2_med1,I5,rend_pila5)
legend('Tª=58.7°C','Tª=56.5°C','Tª=52.8°C','Tª=41°C','Tª=31.5°C')
%% GRÁFICA POTENCIA ELÉCTRICA, HIDRÓGENO, PER, PÉRDIDAS
figure
title('1 PILA, POTENCIAS')
hold all
plotyy(I1,Ph2,Ifcper,Pper), xlabel('Corriente (A)'),ylabel('Potencia (W)')%potencia de hidrógeno

plot(I1,Pe1,'b')%potencia eléctrica
plot(I2,Pe2,'g')
plot(I3,Pe3,'r')
plot(I4,Pe4,'c')
plot(I5,Pe5,'m')

plot(I1,Pperdidas1,'b')%potencia pérdidas
plot(I2,Pperdidas2,'g')
plot(I3,Pperdidas3,'r')
plot(I4,Pperdidas4,'c')
plot(I5,Pperdidas5,'m')
legend('Tª=58.7°C','Tª=56.5°C','Tª=52.8°C','Tª=41°C','Tª=31.5°C')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% CONEXIÓN DE PILAS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% 1 PILA
%%GRÁFICA pH2 y rendimiento frente a potencia eléctrica
figure
hold all
plotyy(Pe1,rend_pila1,Pe1,Ph2), xlabel('Pe (W)'), ylabel('Rendimiento (%)')
plotyy(Pe2,rend_pila2,Pe1,Ph2)
plotyy(Pe3,rend_pila3,Pe1,Ph2)
plotyy(Pe4,rend_pila4,Pe1,Ph2)
plotyy(Pe5,rend_pila5,Pe1,Ph2)
legend('Tª=58.7°C','Tª=56.5°C','Tª=52.8°C','Tª=41°C','Tª=31.5°C')
title('1 PILA')

%% 4 EN SERIE
figure
hold all
plotyy(Pe1*4,Ph2_med1*4,Pe1*4,rend_pila1)
plotyy(Pe1*4,Ph2_med1*4,4*Pe2,rend_pila2)
plotyy(Pe1*4,Ph2_med1*4,4*Pe3,rend_pila3)
plotyy(Pe1*4,Ph2_med1*4,4*Pe4,rend_pila4)
plot(Pe1*4,Ph2_med1*4,Pe5*4,rend_pila5)
xlabel('Pe (W)'),ylabel('Ph2')
title('4PILAS')

%% 4PILAS SIN CONSIDERAR CONSUMO PERIFERICOS en las pilas en off
%Rendimiento
figure
title('RENDIMIENTO sin considerar el consumo de perifericos en pilas off')
hold all
legend('Tª=58.7°C','Tª=56.5°C','Tª=52.8°C','Tª=41°C','Tª=31.5°C')
plot(Pe1*4,rend_pila1,'b')%T1
plot(3*Pe1,rend_pila1,'b')
plot(2*Pe1,rend_pila1,'b')
plot(1*Pe1,rend_pila1,'b')

plot(Pe2*4,rend_pila2,'g')%T2

```

```

plot(3*Pe2,rend_pila2,'g')
plot(2*Pe2,rend_pila2,'g')
plot(1*Pe2,rend_pila2,'g')

plot(Pe3*4,rend_pila3,'r')%T3
plot(3*Pe3,rend_pila3,'r')
plot(2*Pe3,rend_pila3,'r')
plot(1*Pe3,rend_pila3,'r')
plot(Pe4*4,rend_pila4,'c')%T4
plot(3*Pe4,rend_pila4,'c')
plot(2*Pe4,rend_pila4,'c')
plot(1*Pe4,rend_pila4,'c')
plot(Pe5*4,rend_pila5,'m')%T5
plot(3*Pe5,rend_pila5,'m')
plot(2*Pe5,rend_pila5,'m')
plot(1*Pe5,rend_pila5,'m')
xlabel('Pe (w)'), ylabel('Rendimiento (%)')

figure
title('RENDIMIENTO sin considerar el consumo de perifericos en pilas off')
subplot(1,5,1),plot(Pe1*4,rend_pila1,'-r'),hold on, plot(Pe1*3,rend_pila1,'-c'),plot(Pe1*2,rend_pila1,'-g'),plot(Pe1,rend_pila1,'-b'), title(' Tª=58.7 ºC '), xlabel('Pe (W)'),ylabel('Rendimiento (%)')
axis([0 5000 0 60])
subplot(1,5,2),plot(Pe2*4,rend_pila2,'-r'),hold on, plot(Pe2*3,rend_pila2,'-c'),plot(Pe2*2,rend_pila2,'-g'),plot(Pe2,rend_pila2,'-b'), title(' Tª=56.5 ºC '), xlabel('Pe (W)')
axis([0 5000 0 60])
subplot(1,5,3),plot(Pe3*4,rend_pila3,'-r'),hold on, plot(Pe3*3,rend_pila3,'-c'),plot(Pe3*2,rend_pila3,'-g'),plot(Pe3,rend_pila3,'-b'), title(' Tª=52.8 ºC '), xlabel('Pe (W)')
axis([0 5000 0 60])
subplot(1,5,4),plot(Pe4*4,rend_pila4,'-r'),hold on, plot(Pe4*3,rend_pila4,'-c'),plot(Pe4*2,rend_pila4,'-g'),plot(Pe4,rend_pila4,'-b'), title(' Tª=41 ºC '), xlabel('Pe (W)')
axis([0 5000 0 60])
subplot(1,5,5),plot(Pe5*4,rend_pila5,'-r'),hold on, plot(Pe5*3,rend_pila5,'-c'),plot(Pe5*2,rend_pila5,'-g'),plot(Pe5,rend_pila5,'-b'), title(' Tª=31.5 ºC '), xlabel('Pe (W)')
axis([0 5000 0 60])
legend('4pilas','3pilas','2pilas','1pila')

```

%Potencia hidrógeno

```

figure
title('POTENCIA HIDRÓGENO sin pper')
plot(Pe1*4,Ph2*4,'-r'),hold on, plot(Pe1*3,Ph2*3,'-c'),plot(Pe1*2,Ph2*2,'-g'),plot(Pe1,Ph2,'-b'),
xlabel('Pe (W)'), ylabel('Potencia Hidrógeno(W)')
legend('4pilas','3pilas','2pilas','1pila')

```

%% 4PILAS CONSIDERANDO CONSUMO PERIFERICOS

%Rendimiento

```

figure
title('RENDIMIENTO consumo de perifericos en pilas off')
for pilas_conectadas=1:4
hold all
plot(Pe1*pilas_conectadas,rendimientototal1(pilas_conectadas,:),'(b)'),
plot(Pe2*pilas_conectadas,rendimientototal2(pilas_conectadas,:),'(g)'),
plot(Pe3*pilas_conectadas,rendimientototal3(pilas_conectadas,:),'(r)'),
plot(Pe4*pilas_conectadas,rendimientototal4(pilas_conectadas,:),'(c)'),
plot(Pe5*pilas_conectadas,rendimientototal5(pilas_conectadas,:),'(m)'),legend(),xlabel('Pfc (W)'), ylabel('Rendimiento (%)')
legend('Tª=58.7ºC','Tª=56.5ºC','Tª=52.8ºC','Tª=41ºC','Tª=31.5ºC')
end

```

```

figure
title('RENDIMIENTO 4 PILAS considerando consumo de perifericos en pilas off')

```

```

subplot(1,5,1),plot(Pe1*4,rendimientototal1(4,:),'-r'),hold on,
plot(Pe1*3,rendimientototal1(3,:),'-c'),plot(Pe1*2,rendimientototal1(2,:),'-
g'),plot(Pe1,rendimientototal1(1,:),'-b'), title(' Ta=58.7 °C '), xlabel('Pe (W)'), ylabel('Rendimiento
(%')
axis([0 5000 0 60])
subplot(1,5,2),plot(Pe2*4,rendimientototal2(4,:),'-r'),hold on,
plot(Pe2*3,rendimientototal2(3,:),'-c'),plot(Pe2*2,rendimientototal2(2,:),'-
g'),plot(Pe2,rendimientototal2(1,:),'-b'), title(' Ta=56.5 °C '), xlabel('Pe (W)')
axis([0 5000 0 60])
subplot(1,5,3),plot(Pe3*4,rendimientototal3(4,:),'-r'),hold on,
plot(Pe3*3,rendimientototal3(3,:),'-c'),plot(Pe3*2,rendimientototal3(2,:),'-
g'),plot(Pe3,rendimientototal3(1,:),'-b'), title(' Ta=52.8 °C '), xlabel('Pe (W)')
axis([0 5000 0 60])
subplot(1,5,4),plot(Pe4*4,rendimientototal4(4,:),'-r'),hold on,
plot(Pe4*3,rendimientototal4(3,:),'-c'),plot(Pe4*2,rendimientototal4(2,:),'-
g'),plot(Pe4,rendimientototal4(1,:),'-b'), title(' Ta=41 °C '), xlabel('Pe (W)')
axis([0 5000 0 60])
subplot(1,5,5),plot(Pe5*4,rendimientototal5(4,:),'-r'),hold on,
plot(Pe5*3,rendimientototal5(3,:),'-c'),plot(Pe5*2,rendimientototal5(2,:),'-
g'),plot(Pe5,rendimientototal5(1,:),'-b'), title(' Ta=31.5 °C '), xlabel('Pe (W)')
axis([0 5000 0 60])

```

%Potencia hidrogeno

```

title('POTENCIA HIDRÓGENO con pper')
figure
for pilas_conectadas=1:4
hold all
plot(Pe1*pilas_conectadas-(4-
pilas_conectadas)*Pper(1),Ph2total1(pilas_conectadas,:)),xlabel('Pfc (W)'), ylabel('Ph2 (W)')
end
legend('1pila','2pilas','3pilas','4pilas')

```

%% GRÁFICO CORRIENTE IFC REFERENCIA

```

figure
for pilas_conectadas=1:4
hold all
plot(Pe1*pilas_conectadas,I1,('b'))
plot(Pe2*pilas_conectadas,I2,('g'))
plot(Pe3*pilas_conectadas,I3,('r'))
plot(Pe4*pilas_conectadas,I4,('c'))
plot(Pe5*pilas_conectadas,I5,('m')),xlabel('Pe (W)'), ylabel('Corriente pila(A)')
legend('Ta=58.7°C','Ta=56.5°C','Ta=52.8°C','Ta=41°C','Ta=31.5°C')
end

```

%%GRÁFICO 3D

%Vectores de Ifc y Vfc

```

Ifc=[0,5,10,20,30,40,50,55,60];
Vfc=[32,30.3,29.25,27.6,26.05,24.4,22.56,21.62,20.54;
32,30.23,29.1,27.35,25.7,24,22.1,21.15,20.06;
32,30.04,28.87,27.14,25.57,23.82,21.9,20.86,19.6;
32,29.98,28.8,26.94,25.29,23.59,21.67,20.67,19.3;
32,29.76,28.54,26.73,25.03,23.22,21.29,20.29,18.8];

```

Temperature=[58.7,56.5,52.8,41,31.5];

```

for i=1:5
for j=1:length(Ifc)
Pfc(i,j)=Ifc(1,j)*Vfc(i,j);
end
end

```

%Función de I que aproxima la potencia de hidrógeno

```

pendientepH2=[ecuacion1.coeff(1),ecuacion2.coeff(1),ecuacion3.coeff(1),ecuacion4.coeff(1),ecuacion5.coeff
f(1)];

```

```
ordenadaspH2=[ecuacion1.coeff(2),ecuacion2.coeff(2),ecuacion3.coeff(2),ecuacion4.coeff(2),ecuacion5.coeff(2)];

m_media=mean(pendientepH2);
n_media=mean(ordenadaspH2);

for i=1:length(lfc)
    Ph2(i)=m_media*lfc(i)+n_media;
end

%% Rendimiento
%Cálculo rendimiento, apagando pilas(SIN PERIFERICOS)
%Para 1, 2, 3 y 4 pilas

    for i=1:5
        for j=1:length(lfc)
            rend1(i,j)=(Pfc(i,j)/Ph2(1,j)*100);
            rend2(i,j)=(2*Pfc(i,j)/(2*Ph2(1,j))*100);
            rend3(i,j)=(3*Pfc(i,j)/(3*Ph2(1,j))*100);
            rend4(i,j)=(4*Pfc(i,j)/(4*Ph2(1,j))*100);
        end
    end

figure
hold on
surf(1*Pfc,Temperature,rend1)
surf(2*Pfc,Temperature,rend2)
surf(3*Pfc,Temperature,rend3)
surf(4*Pfc,Temperature,rend4)
```

ANEXO 3

SIMULACIÓN DE LA ESTRUCTURA FINAL

