

2016

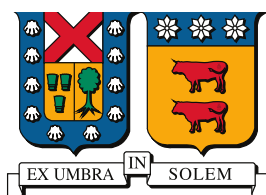
# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN CELDA DE POTENCIA PARA CONVERTIDOR MMC

ROJAS VILLARROEL, JULIÁN ARIEL

---

<http://hdl.handle.net/11673/22961>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*



**UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA**

**”DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN  
DE CELDA DE POTENCIA  
PARA CONVERTIDOR MMC”**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO  
INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO MENCIÓN ELECTRÓNICA  
INDUSTRIAL**

**JULIÁN ARIEL ROJAS VILLARROEL**

**Profesor Supervisor  
Dr. MARCELO PÉREZ LEIVA**

**Co-Referente  
Dr. CHRISTIAN ROJAS**

**DICIEMBRE 2016**



*En memoria de Silvia Elena Villarroel Casas-Cordero Q.E.P.D.*



---

---

# AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer principalmente mi familia y amigos, que han contribuido en mi formación personal. A mi familia por haberme criado y cuidado, además de estar incondicionalmente en mis decisiones, a mis amigos y polola con los cuales he compartido esta importante etapa de mi vida. Finalmente agradecer a mi profesor guía por haber sido protagonista en el desarrollo de mi proyecto de titulación, por haberme ayudado a culminar mis estudios de una muy buena manera a pesar de contratiempos y obstáculos que se presentaron.

---

---

# RESUMEN

LOS convertidores multinivel han sido una tecnología que ha permitido una fuerte penetración de la electrónica en aplicaciones tanto de media como alta potencia. Dicha tecnología permite alcanzar niveles de tensiones mayores a la tensión de bloqueo de los semiconductores utilizados e incluso desarrollados hasta el día de hoy pueden soportar, ya que la estructura del convertidor está basada en conexiones serie de ellos. Como consecuencia de lo anterior, haciendo uso de una estrategia de control y modulación adecuada, es posible obtener tensiones de varios niveles a la salida del convertidor, disminuyendo las diferencias entre los niveles discretos de tensión y aumentando con ello la calidad de la energía.

Dentro de la literatura se puede encontrar una gran cantidad de topologías multinivel, siendo las más populares NPC (neutral point clamped), FC (flying capacitor) y CHB (cascade H bridge), las cuales han sido fuertemente incorporadas en sistemas de media tensión y alta potencia como compresores, bombas, motores, e incluso en sistemas de generación eólica y fotovoltaica.

Dentro de las topologías también se encuentra el MMC (modular multilevel converter) del cual durante la última década se ha desarrollado una gran cantidad de investigación sobre aplicaciones HVDC, llevándolo a ser uno de los convertidores más populares en dicho campo. El proyecto realizado consiste en el diseño e implementación de una celda de potencia y montaje para un convertidor MMC. Para ello se realizó un breve análisis de funcionalidad de cada uno de los módulos que se utilizarán en cada celda del convertidor, es decir tarjeta de disparo y comunicación por fibra óptica. Se verificó una coherencia entre las señales de manera que las tarjetas sean compatibles entre ellas. Luego se realizó el trabajo en el software Altium Designer, llevando a cabo el diseño considerando restricciones físicas, finalizando con ello la primera etapa del proyecto.

Se midió y definió el montaje más adecuado para el convertidor de acuerdo al espacio disponible en el gabinete. Posteriormente se compró elementos necesarios para la canalización de cables y fibras ópticas del convertidor, cables adecuados al nivel de potencia del sistema, y rieles DIN con los que se montó las conexiones eléctricas y el soporte donde se ubican las celdas.

Finalmente se realizó la simulación de una celda puente H y la del convertidor multinivel modular de 4 celdas por rama, con lo que se analizó resultados de distintas formas de onda y características del convertidor.

## Palabras Claves

Convertidor multinivel, Calidad de energía, Potencia.

---

---

# ABSTRACT

**M**ULTILEVEL converters are a technology that has allowed a strong penetration of electronics in medium and high power applications. This technology allows achieving levels of voltages over which the semiconductors used and even developed until today can hold, since the structure of the converter it is based in serial connections. As a consequence of the above, using an adequate control strategy and modulation, it is possible to obtain a lot of voltages levels at the converter output, reducing derivative between discrete voltage levels and increasing the energy quality.

In literature we can find a great number of multilevel topologies, the most popular are NPC (neutral point clamped), FC (flying capacitor) and CHB (H-bridge cascaded), which have been strongly incorporated in high power and voltage systems as compressors, pumps, engines, and even wind generation systems and photovoltaic.

One of the not mentioned topologies it is MMC (modular multilevel converter) which during the last decade has developed a great number of applications for HVDC, taking the converter to be the most popular on this field.

The project consists of the design and implementation of a power cell and assembly for a modular multilevel converter. For this, a brief analysis of the functionality of each module that it will be used in the power cell, driver and communication by optic fiber, was performed.

It was verified the consistency between the signals which means that all the PCB were compatibles. Then the work was done in the software Altium Designer, carrying out the design considering physical constraints, thus finishing the first stage of the project.

After, the most suitable assembly for the converter was defined according to the space available in the rack. Subsequently necessary elements for the assembly were purchased, like cable trunking for power cables and optical fibers, cables appropriate to the power level of the system, and DIN rails which the electrical connections and the support for the power cells were assembled.

Finally, the simulation of a full bridge cell, and the modular multilevel converter of 4 cells per branch was performed, analyzing results of different waveforms and converter characteristics.

## Palabras Claves

Multilevel Converter, Energy quality, Power.



---

---

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>VIII</b>
<b>ABREVIACIONES</b>	<b>IX</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Comienzo de sistemas HVDC . . . . .	1
1.2. Aspectos Generales . . . . .	2
1.3. Rectificador puente trifásico . . . . .	3
1.4. Rectificador Multipulso . . . . .	5
1.5. Convertidores Fuente de Voltaje . . . . .	6
1.5.1. Convertidor trifásico de 2 niveles . . . . .	6
1.5.2. Convertidor multinivel NPC . . . . .	7
1.5.3. Convertidor Multinivel Modular . . . . .	9
1.6. Contribución del proyecto . . . . .	10
1.7. Objetivo General, Específicos, Alcances y Limitaciones . . . . .	10
1.8. Estructura del Documento . . . . .	10
<b>2. CONVERTIDOR MMC</b>	<b>11</b>
2.1. Convertidor Multinivel Modular . . . . .	11
2.2. Ejemplos de montaje para MMC . . . . .	12
2.3. Convertidores HVDC comerciales . . . . .	16
<b>3. RESULTADOS DE SIMULACIONES DE CONVERTIDOR MMC</b>	<b>18</b>
3.1. Celda de potencia . . . . .	18
3.2. Simulación de convertidor modular multinivel . . . . .	21
<b>4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CELDA PARA MMC</b>	<b>29</b>
4.1. Diseño conceptual . . . . .	29

---

4.1.1.	Compatibilidad con tarjeta de comunicación . . . . .	30
4.1.2.	Compatibilidad con la tarjeta de disparo . . . . .	33
4.1.3.	Circuito de medición . . . . .	34
4.1.4.	Módulo de potencia . . . . .	35
4.1.5.	Alimentación de circuitos de disparo y comunicación . . . . .	35
4.2.	Diseño en Altium Designer . . . . .	36
4.2.1.	Diseño esquemático . . . . .	36
4.2.2.	Diseño PCB . . . . .	38
<b>5.</b>	<b>ESQUEMA ELÉCTRICO DE MMC</b>	<b>44</b>
5.1.	Diagrama unilineal de conexión a red del convertidor . . . . .	44
5.2.	Esquema eléctrico de MMC . . . . .	45
<b>6.</b>	<b>ESQUEMA MECÁNICO DE MONTAJE PARA MMC</b>	<b>50</b>
6.1.	Montaje en rack de 19 pulgadas . . . . .	50
6.2.	Elementos utilizados en montaje . . . . .	52
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>57</b>
7.1.	Resultados . . . . .	57
7.2.	Conclusiones . . . . .	58
7.3.	Trabajos Futuros . . . . .	58

---

---

# Índice de figuras

1.1. Curva comparativa de costos para transmisión DC y AC . . . . .	2
1.2. Puente trifásico . . . . .	3
1.3. Corrientes y tensiones para $\alpha = 45^\circ$ respectivamente . . . . .	3
1.4. Corrientes de rectificador de 12 pulsos, fuente: Material de AICE, Samir Kouro	5
1.5. FFT de corrientes del rectificador de 12 pulsos con $\alpha = 0$ . . . . .	5
1.6. Inversor trifásico de 2 niveles . . . . .	6
1.7. Tensión de salida y su respectiva FFT . . . . .	6
1.8. Inversor monofásico de 3 niveles . . . . .	7
1.9. Convertidor multinivel modular . . . . .	9
2.1. Celdas de 2 y 3 niveles respectivamente . . . . .	11
2.2. Esquema conceptual de convertidor modular multinivel . . . . .	12
2.3. Ejemplo de montaje 1, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile . . . . .	12
2.4. Ejemplo 2 de montaje de convertidor multinivel Harbin Institute of Technology, China, sistema de 10[kW] . . . . .	13
2.5. Ejemplo 3 de montaje de convertidor multinivel, Imperix, proveedor de sistemas eléctricos . . . . .	14
2.6. Ejemplo 4 de montaje de convertidor multinivel, Harbin Institute of Technology, China, sistema de 0.5[MW] . . . . .	15
2.7. Diagrama circuital de Xuangjiaba . . . . .	16
2.8. Sistema Estlink HVDC . . . . .	16
2.9. Sistema HVDC Light Dolwin 1 . . . . .	17
2.10. Sistema HVDC Namibia-Zambia . . . . .	17
3.1. Esquema convertidor puente H . . . . .	18
3.2. Voltaje y corriente a la salida de puente H . . . . .	20
3.3. FFT de voltaje de la salida de puente H . . . . .	20
3.4. FFT de corriente de la salida de puente H . . . . .	21
3.5. Esquema de modelo equivalente de convertidor MMC . . . . .	21
3.6. Esquema de control de corrientes . . . . .	22
3.7. Esquema de control final . . . . .	23
3.8. Zoom de voltaje generado por el convertidor . . . . .	24
3.9. Voltaje generado por el convertidor . . . . .	24
3.10. Corriente a la salida del convertidor . . . . .	24
3.11. Corriente a la salida del convertidor en dominio d . . . . .	25

3.12. Corriente a la salida del convertidor en dominio q . . . . .	25
3.13. Evolución del control de balance en las celdas de fase A . . . . .	25
3.14. Voltaje en cada celda de la fase A . . . . .	26
3.15. Zoom a voltaje en cada celda de la fase A . . . . .	26
3.16. Zoom a promedio de voltaje de celdas fase A . . . . .	26
3.17. Promedio de voltaje de celdas fase A . . . . .	27
3.18. Corriente circulante . . . . .	27
3.19. Corrientes trifásicas a la salida de convertidor . . . . .	28
4.1. Esquema conceptual de celda para MMC . . . . .	29
4.2. Pines de tarjeta de comunicación y ranura de comunicación MMC . . . . .	30
4.3. Pines de programador PIC . . . . .	32
4.4. Pines de tarjeta de disparo y conexión requerida hacia IGBT . . . . .	33
4.5. Esquema de circuito de medición . . . . .	34
4.6. Diagrama de celda de MMC . . . . .	35
4.7. Circuito equivalente de módulo INFINEON FS35R12KT3 . . . . .	36
4.8. Esquemático de Altium Designer . . . . .	37
4.9. Footprint de módulo trifásico INFINEON FS35R12KT3 . . . . .	38
4.10. Capas superiores de celda MMC diseñada . . . . .	39
4.11. Capas inferiores de celda MMC diseñada . . . . .	40
4.12. Vista superior de celda para MMC . . . . .	41
4.13. Vista inferior de celda para MMC . . . . .	42
5.1. Diagrama uniineal de conexión a red . . . . .	44
5.2. Propuesta de conexión a red del convertidor . . . . .	45
5.3. Esquema de MMC implementado . . . . .	46
5.4. Esquema de gabinete . . . . .	46
5.5. Diagrama de conexiones en borneras traseras . . . . .	47
5.6. Diagrama de conexiones en borneras delanteras . . . . .	47
5.7. Arreglo de conexiones figura 5.6 . . . . .	48
5.8. Arreglo de conexiones figura 5.5 . . . . .	48
5.9. Esquema conceptual de conexión de comunicación . . . . .	48
5.10. Diagrama de canalización de fibra óptica . . . . .	49
6.1. Esquema de montaje MMC . . . . .	51
6.2. Bornera DIN . . . . .	52
6.3. Soporte construido para rack . . . . .	53
6.4. Vista lateral izquierda de montaje de celda en soporte construído sin disipador	54
6.5. Vista lateral derecha de montaje de celda en soporte construído sin disipador	54
6.6. Canalización para fibra y potencia . . . . .	55

---

---

# Índice de tablas

3.1. Parámetros de simulación para puente H . . . . .	19
3.2. Disparos para semiconductores de puente H unipolar . . . . .	19
3.3. Parámetros de simulación para puente H . . . . .	23
4.1. Tabla descriptiva de señales del circuito de disparo . . . . .	31
4.2. Tabla descriptiva de señales del circuito de disparo . . . . .	33
4.3. Tabla Componentes para celda MMC . . . . .	43
6.1. Tabla de código americano para cables . . . . .	52
6.2. Tabla Componentes . . . . .	56
6.3. Descripciones de tamaños . . . . .	56

---

---

# ABREVIACIONES

## Mayúsculas

MMC : modular multilevel converter.

PWM : pulsewidth modulation.

SVM : space vector modulation

PI : proportional-integral coefficients of linear controllers

2L-VSI two-level voltage source inverter

3L-VSI three-level voltage source inverter

DSP : digital signal processor.

CHB : cascade H-bridge inverter

FCI : flying capacitor inverter

## Minúsculas

dc : direct current

ac : alternate current

# INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se desarrolla una introducción a los convertidores utilizados en sistemas de alta tensión de corriente continua (HVDC) con un estado del arte de cómo ha evolucionado dicho campo, luego se definen los objetivos y alcances del proyecto.

### 1.1. Comienzo de sistemas HVDC

El inicio de los sistemas de conversión de energía se remonta a más de doscientos años, cuando los procesos de transformación solamente eran mecánicos o térmicos, utilizando cajas de engranajes, calderas de agua, etc. Sin embargo los sistemas de conversión mecánica son extremadamente ineficientes si se quiere transmitir energía a distancia, pero dado a que los centros de consumo eran concentrados en las industrias, no se presentaba problema alguno y las demandas energéticas eran satisfechas.

Con la utilización de la electricidad, fue posible distribuir la energía de forma más eficiente, la red de distribución de más alta potencia hasta ese entonces, basado en un esquema conocido como Lyon-Moutiers DC, el cual consistía en un enlace DC conectando múltiples motores de corriente continua en serie alcanzando una tensión de  $150[kV]$  con una eficiencia del 70%. Poco después la eficiencia de sistemas de transmisión DC pasó a ser muy bajo en comparación a transmitir energía elevando tensión alterna con un transformador, por lo que en el año 1936 el sistema de red DC fue desmantelado, utilizando desde entonces redes AC en la mayoría de los sistemas de transmisión de energía.

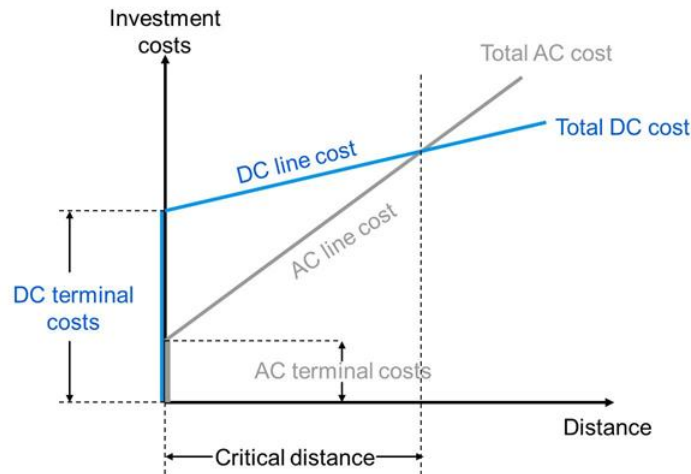


Figura 1.1: Curva comparativa de costos para transmisión DC y AC

## 1.2. Aspectos Generales

Hoy en día existen dos formas de transmitir la energía eléctrica, la más conocida e implementada corresponde a transmisión AC y la otra opción que fue desarrollada a nivel de nicho hace más de 30 años es transmisión DC. Un concepto básico a tener en cuenta en transmisión es que se debe elevar tensión para disminuir las pérdidas de conducción de los cables.

Para elevar tensión en una red AC es sumamente fácil ya que se utiliza un transformador. Sin embargo elevar tensión DC era extremadamente costoso, uno de los ejemplos de sistema HVDC más antiguo consistía en la conexión serie de muchos motores DC, por lo que se desarrollaron redes AC para la gran mayoría de las redes de transmisión en el mundo.

Ya que la gran mayoría de las tecnologías se desarrolla en función de intereses económicos que pueda generar, existe un gráfico muy utilizado que compara ambas tecnologías en función del costo y distancia de transmisión.

Como se aprecia en la figura 1.1 se puede identificar que los costes fijos de una instalación AC son extremadamente bajos en comparación a una DC, sin embargo las pérdidas de conducción dadas por el efecto Skin en los conductores, hace que las pérdidas en DC sean considerablemente menores, por lo que a largas distancias, el costo total es menor para un sistema DC. Además vale aclarar que la curva expuesta puede variar, sin embargo es una buena aproximación del contexto en general.

Otra ventaja destacable de la transmisión DC es la posibilidad de reducir la distancia entre las líneas, pudiendo enviar dos grandes conductores a una menor distancia entre ellos. Lo anterior es imposible de llevar a cabo con líneas AC, ya que las capacitancias parásitas generada por la cercanía entre los conductores influyen en la operación del sistema, reduciendo su eficiencia, sin embargo para líneas DC las propiedades dinámicas del condensador se vuelven estacionarias, por lo que no influyen en su funcionamiento. El uso más común de dicha ventaja es la transmisión de energía por líneas submarinas.



A continuación se presentan topologías HVDC en base a electrónica de potencia.

### 1.3. Rectificador puente trifásico

Con el uso del tiristor en el año 1956, topologías de convertidores HVDC basadas en diodos como el rectificador puente trifásico incorporan este nuevo elemento con un grado de control adicional, pudiendo controlar la tensión media en la salida y por ende la corriente por la carga DC.

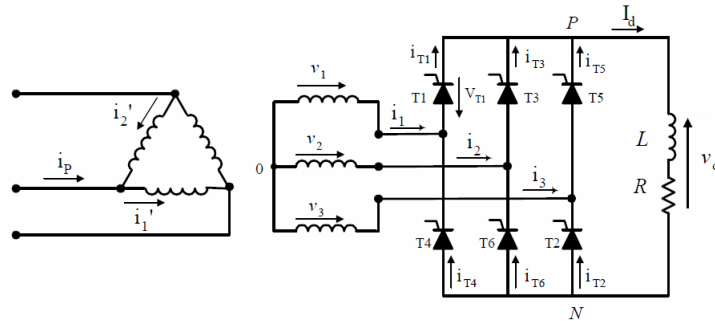


Figura 1.2: Puente trifásico

Cada tiristor es disparado en función a un ángulo de corrimiento llamado  $\alpha$ , dicho ángulo es medido respecto al punto en que dicho tiristor puede comenzar a conducir corriente como se muestra en la figura 1.2 <sup>1</sup>.

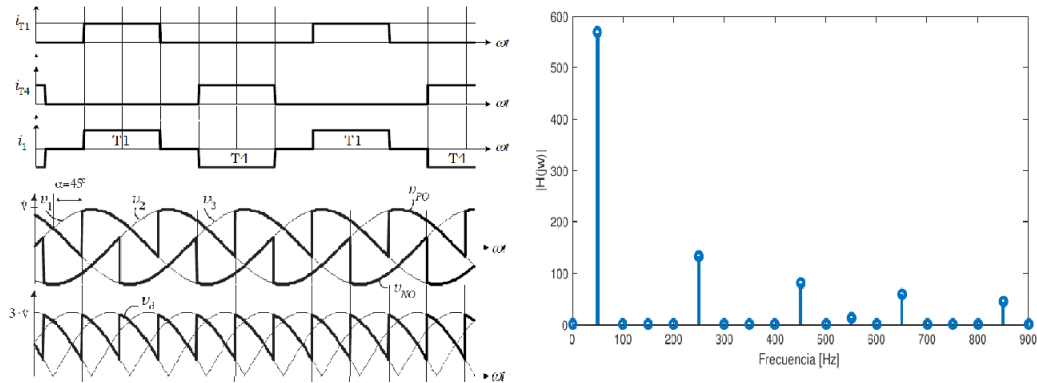


Figura 1.3: Corrientes y tensiones para  $\alpha = 45^\circ$  respectivamente

Por lo tanto, cada tiristor conmuta 1 vez por ciclo de fundamental, lo que reduce las pérdidas del sistema. Sin embargo el rectificador produce corrientes en forma de pulsos como se ve en la figura 1.3 <sup>2</sup>, introduciendo una gran cantidad de armónicos en la corriente por la

<sup>1</sup>Material de AICE rectificador controlado, Samir Kouro

<sup>2</sup>Material de AICE formas de onda rectificador controlado, Samir Kouro

red AC, disminuyendo la eficiencia del sistema de distribución. En vista de lo anterior existe una serie de normas para el THD de acuerdo a los niveles de potencia del sistema que se esté conectando, ya que a mayor potencia consumida, mayor sería la inyección de armónicos, por lo que las normas son más estrictas para sistemas de mayor potencia, como por ejemplo para sistemas cuya tensión de operación sea mayor a  $110[kV]$  la quinta armónica no debe exceder el 2% de la tensión total, y para sistemas con tensión de operación menor a  $110[kV]$  no se debe exceder el 6% (norma chilena sobre límites de armónicas en tensión). Por lo tanto para respetar dichas normas, el rectificador puente trifásico requiere una serie de filtros para compensar la distorsión generada, aumentando el costo del sistema completo.

## 1.4. Rectificador Multipulso

El rectificador de 12 pulsos como se aprecia en la figura 1.4 <sup>3</sup>, corresponde a dos rectificadores puente trifásico conectados en serie para alcanzar mayores tensiones o conectados en paralelo para mayores corrientes, alimentado por devanados secundarios diferentes y desfasados en  $30^\circ$  entre si.

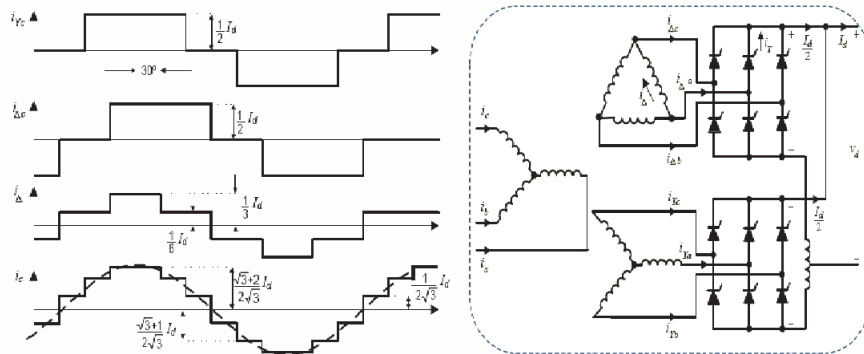


Figura 1.4: Corrientes de rectificador de 12 pulsos, fuente: Material de AICE, Samir Kouro

Los pulsos de corriente generados en el primario de la red AC posee una mayor cantidad de niveles de tensión, eliminando gran parte del contenido armónico generado por cada rectificador conectado directamente a la red.

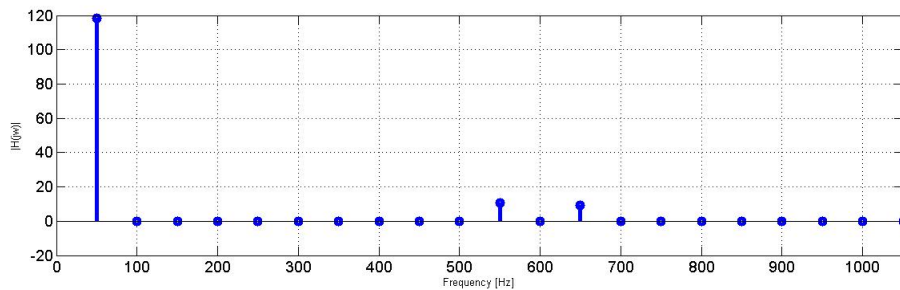


Figura 1.5: FFT de corrientes del rectificador de 12 pulsos con  $\alpha = 0$

Como se aprecia en la figura 1.5, si se supone una carga perfectamente filtrante, la primera armónica de corriente que aparece es la número 11, seguido por la 13, reduciendo el tamaño y costo del filtro que requeriría en el lado AC y alcanzando tensiones mayores a la salida del enlace DC. Por lo tanto el rectificador multipulso es adecuado para estaciones HVDC ya que permite un aumento en la tensión del enlace DC y disminuye el contenido armónico en el lado AC.

<sup>3</sup>Material de AICE, Samir Kouro

## 1.5. Convertidores Fuente de Voltaje

En el año 1968 sale al mercado por primera vez el IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor), el cual a diferencia del tiristor, permite tanto el encendido como el apagado del semiconductor y además ser conmutado a una frecuencia mucho mayor. Este semiconductor es ampliamente utilizado en convertidores fuente de voltaje, para aplicaciones de media y alta potencia desde 1980. Gracias a los grados de control que ofrece la tecnología de los IGBT's el convertidor fuente de voltaje puede ser modulado, las técnicas de modulación más conocidas son PWM y SVM, lo que permite conmutar el semiconductor de acuerdo a una referencia dada.

### 1.5.1. Convertidor trifásico de 2 niveles

La primera topología basada en IGBT que aparece en sistemas HVDC es el convertidor fuente de voltaje de dos niveles en el año 1997, en un proyecto llevado a cabo en Suecia llamado Hellsjon.

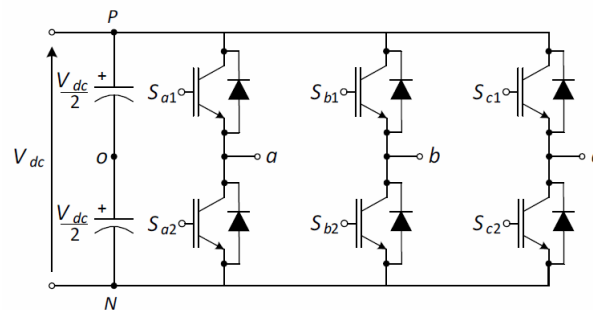


Figura 1.6: Inversor trifásico de 2 niveles

Como se aprecia en la figura 1.6, la topología expuesta consiste en la misma del rectificador puente trifásico, pero los semiconductores han sido reemplazados por IGBT's.

Por lo tanto, con un lazo de control y técnica de modulación adecuada, es posible implementar dicho convertidor en aplicaciones tanto de carga como regenerativas gracias al diodo en antiparalelo.

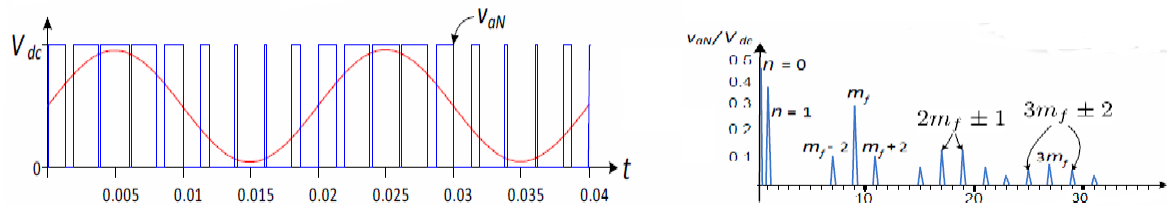


Figura 1.7: Tensión de salida y su respectiva FFT

Como se aprecia en la figura 1.7 <sup>4</sup> el convertidor es modulado con PWM bipolar, entregando 2 niveles en  $V_{aN}$ ,  $V_{bN}$ ,  $V_{cN}$ . Una ventaja de modular una referencia con PWM en el convertidor es que el equivalente en frecuencia de la señal obtenida es la convolución de la referencia con la portadora, generando la aparición de los primeros armónicos en torno a la frecuencia de la portadora (frecuencia de conmutación). Lo anterior es muy conveniente ya que considerando una carga R-L, cuya característica filtrante se comporta como un filtro pasa-bajos, es posible obtener a la salida trifásica corrientes con muy baja distorsión armónica.

A partir del año 1997 hasta el 2012, los convertidores fuente de voltaje para aplicaciones HVDC eran basados en el convertidor fuente de voltaje de 2 niveles, sin embargo al ser un sistema de muy alta potencia se requiere que la frecuencia de conmutación sea lo más baja posible de modo de disminuir las pérdidas y con ello el dimensionamiento del sistema de refrigeración. Por lo tanto al conmutar solo 2 niveles de muy alta tensión a una frecuencia baja, el contenido armónico de la corriente en el lado AC del sistema de potencia sigue resultando ser un problema por lo que se requiere filtros.

### 1.5.2. Convertidor multinivel NPC

En vista de lo anterior, una alternativa para mejorar la calidad del THD de corriente es utilizar un convertidor de 3 niveles, NPC o (neutral point clamped).

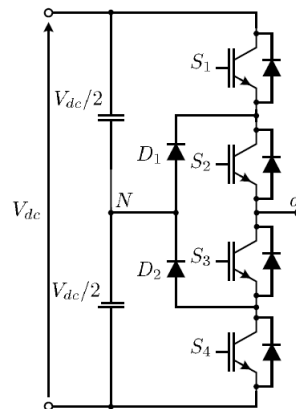


Figura 1.8: Inversor monofásico de 3 niveles

Como se ve en la figura 1.8 la topología posee diodos de enclavamiento, los cuales son utilizados para la generación del nivel 0 a la salida del convertidor, disminuyendo con ello las derivadas entre niveles discretos de tensión y el contenido armónico en la corriente del lado AC. Otra ventaja del convertidor es que las componentes están mejor distribuidas, permitiendo que los semiconductores tengan una tensión de bloqueo fraccional de la tensión total, pudiendo utilizar semiconductores menos costosos. Un importante proyecto que se llevó a cabo empleando NPC para HVDC es Murraylink el cual conecta la ciudad de Berri en

<sup>4</sup>Material de AICE, Samir Kouro

una isla al sur de Australia con Victoria en la zona continental utilizando cables submarinos. A pesar de haber reducido considerablemente el contenido armónico a la salida del convertidor a una frecuencia más baja que en un convertidor fuente de voltaje de 2 niveles, la complejidad y costo del convertidor aumentan de sobremanera si se desea escalar el sistema para alcanzar mayores tensiones, por lo que dicha topología es utilizada para niveles de tensión menores a 150[kV] aumentando las pérdidas de conducción en sistemas de transmisión.

### 1.5.3. Convertidor Multinivel Modular

El convertidor multinivel modular (MMC, Modular Multilevel Converter) corresponde a una topología multinivel menos común de convertidores fuente de voltaje para sistemas HVDC.

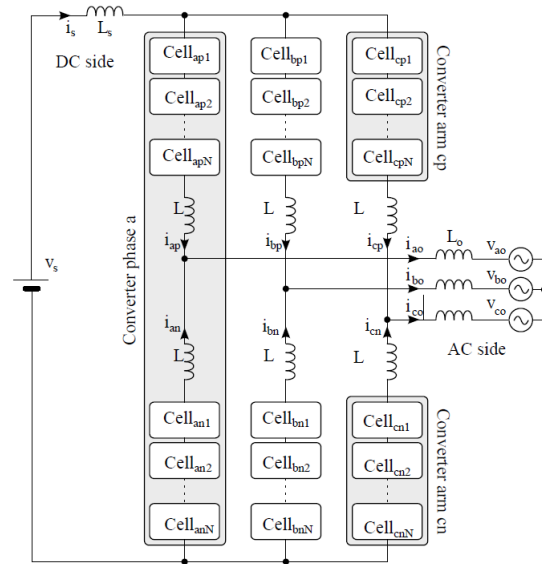


Figura 1.9: Convertidor multinivel modular

Como se aprecia en la figura 1.9 el convertidor consiste en un enlace DC conectado a múltiples celdas en serie, las cuales corresponden a puente H o semipuentes.

Además el convertidor se divide en ramas positiva y negativa, las cuales se interconectan mediante una inductancia de inter-rama, cuyo punto medio es conectado al lado AC. Los niveles positivos y negativos del lado AC son generados por las celdas de la rama positiva y negativa respectivamente. Como se ve en la figura 1.9 el convertidor es altamente escalable, ya que consiste en conexiones serie de semipuentes o puente H con un enlace DC.

Actualmente el MMC es el convertidor fuente de voltaje más utilizado en desarrollo de sistemas HVDC, alcanzando tensiones de hasta 600[kV] conectando cientos de celdas en serie (200-400 celdas por rama) gracias a su escalabilidad. Además gracias a la cantidad de niveles que es capaz de entregar el convertidor hace posible que no se requiera filtros en el lado AC. Sin embargo los esquemas de control requeridos por el MMC son mucho más complejos en comparación a el convertidor fuente de voltaje de 2 niveles, por lo que se ha llevado a cabo una gran cantidad de investigación asociada a dicho campo. Hoy en día, el convertidor MMC es la opción más prometedora aún en desarrollo para sistemas de gran escala, es decir para transmisión de muy alta potencia por tramos de más de 600 kilómetros de extensión.

## 1.6. Contribución del proyecto

El proyecto es netamente de implementación, contempla diseño de módulos de potencia del convertidor y montaje del mismo, el que estará disponible en laboratorio para obtener resultados experimentales.

En sistemas de transmisión HVDC, los niveles de tensión a los cuales se opera son del orden de  $400 - 800[kV]$ , gracias a la escalabilidad del convertidor, es posible alcanzar dichos voltajes utilizando entre 200 a 400 celdas en serie. Actualmente el laboratorio cuenta con dos MMC con dos celdas por rama cada uno lo cual no permite analizar efectos que sistemas a escala real manifiestan, como por ejemplo el ripple en los condensadores. En el nuevo diseño del MMC, se utilizarán cuatro celdas por rama con un montaje modular, habilitando la posibilidad de conectar más celdas en caso de que sea necesario.

Además se simuló el convertidor, realizando un análisis de las formas de ondas y características del sistema.

## 1.7. Objetivo General, Específicos, Alcances y Limitaciones

El objetivo de esta memoria es diseñar e implementar a nivel de PCB una celda de potencia para un convertidor MMC con su respectivo montaje. Dicha celda debe operar en conjunto con una tarjeta de comunicación que toma la información enviada vía fibra óptica desde una plataforma de control y la envía mediante pulsos eléctricos a una tarjeta de disparo, la que finalmente conmutará los semiconductores de potencia de la celda. Además el montaje del convertidor el cual consta de 24 celdas de potencia, plataforma de control, inductancias de rama, contactores, etc, se deberá llevar a cabo en un rack de 19 pulgadas de ancho y 2 metros de alto, poniendo una restricción en cuanto a espacio. El convertidor debe trabajar con rangos de potencia limitados por la capacidad del laboratorio, por lo que debe ser correctamente dimensionado.

El alcance del proyecto es realizar el diseño de la celda y el montaje del sistema eléctrico, por lo que no se alcanzará a ver el funcionamiento del sistema completo, ya que no se incluye el montaje del sistema de comunicaciones, ni de control, por lo que se detallarán resultados de simulación de la celda y el convertidor.

## 1.8. Estructura del Documento

Este documento está dividido en 7 capítulos. El capítulo 1 comienza con una breve introducción a convertidores HVDC con un pequeño estado del arte, mostrando una evolución dentro de los sistemas HVDC. En el capítulo 2 se comentan aspectos generales del convertidor modular multinivel y ejemplos de montajes de convertidores llevados a cabo en universidades. En el capítulo 3 se detalla el trabajo circuital, diseño y compatibilidad de la celda para el convertidor. El capítulo 4 muestra el esquema del montaje eléctrico llevado a cabo en el convertidor. Luego el capítulo 5 detalla el esquema del montaje mecánico. En el capítulo 6 se presentan simulaciones de la celda y del convertidor completo comentando los resultados obtenidos. Finalmente el capítulo 7 se resume los resultados obtenidos, las conclusiones y trabajos futuros del proyecto.



# CONVERTIDOR MMC

En este capítulo se profundizan aspectos generales de transmisión HVDC y del convertidor MMC a nivel teórico y práctico. Se comienza describiendo los sistemas HVDC de transmisión, abordando aspectos físicos y prácticos que convierten a esta tecnología en desarrollo altamente atractiva, luego se describe la topología del convertidor MMC a nivel conceptual y teórico, denotando ventajas y desventajas. Finalmente se comentará acerca de montajes que se han llevado a cabo en otros lugares y de qué se espera obtener como resultado.

### 2.1. Convertidor Multinivel Modular

Consiste en una topología multinivel, basada en conexión serie de sub-módulos llamadas celdas de potencia las que consisten en topologías puente H o semipuente conectadas a un condensador flotante como se muestra en la figura 2.1.

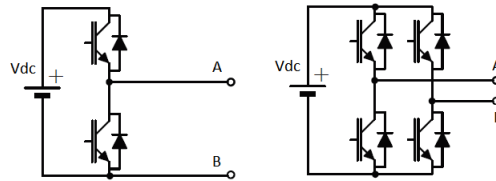


Figura 2.1: Celdas de 2 y 3 niveles respectivamente

Cada fase del convertidor está compuesto por una rama positiva y una negativa, ambas conectadas mediante 2 inductancias, cuyo punto medio corresponde a la salida AC de la fase como se muestra a continuación.

Como se puede apreciar, el convertidor es altamente escalable ya que es posible agregar tantas celdas como se requiera de manera sencilla conectando más sub-módulos en serie, Alcanzando tensiones de hasta 600[kV]. Además, gracias a la posibilidad de generar una gran cantidad de niveles de tensión, reduce considerablemente los costos de un filtro en el

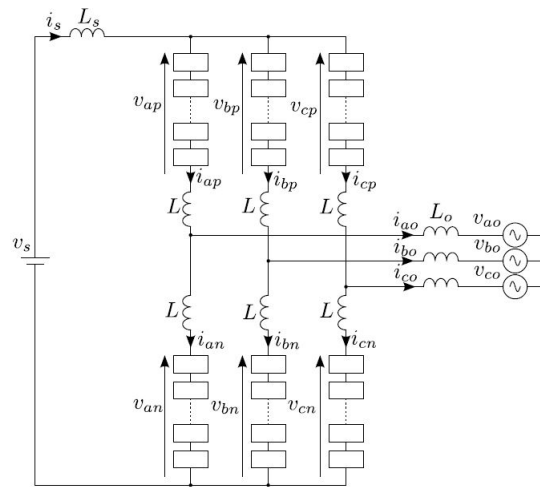


Figura 2.2: Esquema conceptual de convertidor modular multinivel

lado AC.

Otras características que vuelven más atractivo este convertidor son sus bajos costos de manufactura, operación sin transformador y un gran número de redundancias que pueden ser utilizadas para fines de control.

## 2.2. Ejemplos de montaje para MMC

Para tener una idea del posible montaje que se desarrollará se sugiere ver ejemplos de montajes en convertidores multiniveles a escala y comerciales.

Como se aprecia en la figura 2.3 el MMC corresponde al setup actualmente disponible en



Figura 2.3: Ejemplo de montaje 1, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

laboratorio, el cual posee 2 celdas por rama. Se aprecia que el montaje es posicionando las tarjetas sobre la tapa del gabinete. De esta forma la operación de cableado interno se encuentra al alcance, sin embargo el cableado a conexiones de carga y control es realizado fuera del convertidor. Otro ejemplo de montaje a tener en consideración es el presentado en

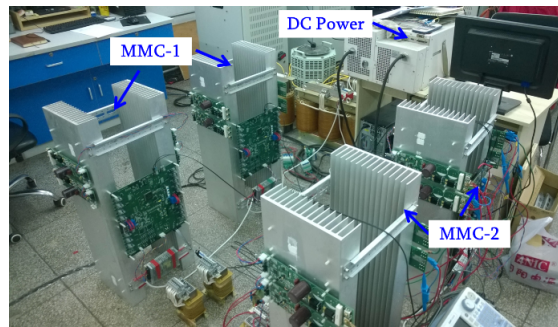


Figura 2.4: Ejemplo 2 de montaje de convertidor multinivel Harbin Institute of Technology, China, sistema de 10[kW]

la figura 2.4, el cual consiste en un montaje desordenado. Como se aprecia en dicha figura, se señala a qué corresponde cada unidad sin embargo es prácticamente inentendible qué tipo de sistema es, además, todo el cableado resulta ser con cables sueltos.

Un objetivo definido en el capítulo anterior es lograr un montaje lo más completo posible, con un orden establecido para que cualquier usuario del convertidor tenga una idea y entienda sobre qué está trabajando, designando zonas para los cableados, canalización correcta de cables, código de colores establecidos, etiquetas, etc.



Figura 2.5: Ejemplo 3 de montaje de convertidor multinivel, Imperix, proveedor de sistemas eléctricos

Otra interesante opción para montaje es utilizando subracks y guías para cada tarjeta como se muestra en la figura 2.5. Como se aprecia cada una de los subracks corresponde a una fase del convertidor, por lo que es mucho más simple identificar cada parte. Además la unidad de control situada por encima de las fases también es montada en el rack. La configuración anterior resulta ser un muy buen comienzo para dar una idea de lo que se desarrollará en el proyecto, debido a que el montaje será realizado en un rack, sin embargo faltaría definir la zona de cableado de potencia, contactores e inductores.

Se presenta el ejemplo de montaje de convertidor multinivel como se ve en la figura 2.6.



Figura 2.6: Ejemplo 4 de montaje de convertidor multinivel, Harbin Institute of Technology, China, sistema de 0.5[MW]

Si bien la configuración presentada resulta bastante elegante para trabajar, resulta ser un modelo industrial, en el que se utiliza un rack para cada unidad del convertidor con 12 celdas por fase, lo que está fuera de alcance para el proyecto ya que se dispone de un solo rack para todo el sistema. Sin embargo un concepto rescatable es la separación de los contactores e inductores de las celdas de potencia, de dicha forma el usuario puede realizar cambios en el sistema en partes designadas.

A modo de concluir el capítulo se opta por un montaje similar al presentado en la figura 2.5, ya que se dispone de componentes muy similares. El trabajo desarrollado se detalla en el capítulo 5.

### 2.3. Convertidores HVDC comerciales

El primer modelo comercial que se introduce es Xiangjiaba-Shanghai HVDC system, el cual es actualmente el sistema HVDC más grande instalado en el mundo. A base de tiristores, alcanza tensiones de  $\pm 800[kV]$  cuya potencia nominal instalada es  $7200[MW]$

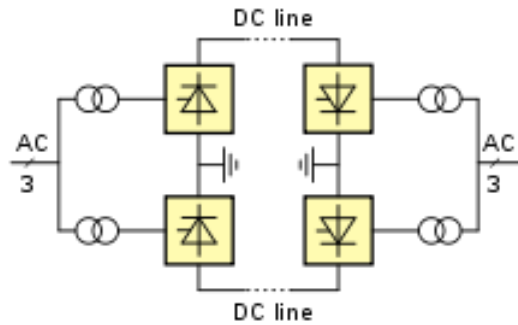


Figura 2.7: Diagrama circuital de Xuangjiaba

Como se aprecia en la figura 2.6 la topología consiste en rectificadores controlados basados en válvulas de tiristores, los que corresponden a varios tiristores conectados en serie para alcanzar mayores niveles de tensión.

Otro importante sistema HVDC instalado en el mundo corresponde a Itaipu, Brasil, basado en la misma topología de Xuangjiaba-Shanghai, alcanzando una tensión de  $\pm 600[kV]$  y una potencia de hasta  $6400[MW]$ . El sistema de Itaipu conecta la generación hidroeléctrica de la zona con un punto de consumo ubicado en Sao Paulo a  $780[km]$ .

Las topologías descritas anteriormente consisten en sistemas basados en tiristores, los que alcanzan mayores potencia que los IGBT.

Uno de los sistemas HVDC basado en IGBT o HVDC Light <sup>1</sup>, es Estlink HVDC.



Figura 2.8: Sistema Estlink HVDC

Mediante una línea submarina conecta Estonia con Finlandia. La topología empleada en los sistemas HVDC Light corresponden a MMC, dicho sistema opera a una tensión de  $\pm 150[kV]$

<sup>1</sup>Sistema HVDC de ABB en base a IGBT

a una potencia de  $350[MW]$ . Otro sistema basado en IGBT, y uno de los de mayor potencia en el mundo es Dolwin1 offshore wind HVDC, el que consiste en un sistema HVDC que conecta una granja eólica ubicada en el mar, con las costas de Alemania.



Figura 2.9: Sistema HVDC Light Dolwin 1

Dicho sistema opera a una tensión DC de  $\pm 320[kV]$  con una potencia instalada de  $800[MW]$ . En Namibia, África también existe un sistema HVDC Light instalado, cuyo enlace DC es de  $350[kV]$ , con una potencia instalada de  $300[MW]$ . El sistema conecta las zonas de Namibia con Zambia, el que además comercializa energía entre ambos países.



Figura 2.10: Sistema HVDC Namibia-Zambia

# RESULTADOS DE SIMULACIONES DE CONVERTIDOR MMC

En este capítulo se expone resultados de simulación de formas de onda de la celda de potencia y del convertidor multinivel modular.

### 3.1. Celda de potencia

El convertidor puente H corresponde a una topología basada en 4 semiconductores de potencia y un enlace DC como se muestra en la figura 3.1.

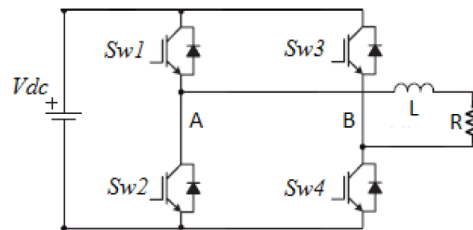


Figura 3.1: Esquema convertidor puente H

Además, el convertidor puede entregar 3 niveles de tensión a la salida de sus terminales los que corresponden a  $+V_{dc}$ ,  $-V_{dc}$  y 0, para ello se propone utilizar modulación unipolar para la generación del 0. La lógica de pulsos para obtener cada uno de los niveles posibles se adjunta a continuación.

Una gran ventaja de la modulación unipolar en comparación a la bipolar presentada en el capítulo 1, es que la modulación unipolar entrega una frecuencia de conmutación ficticia del doble de frecuencia en sus terminales, esto implica que el espectro de la tensión será el



resultado de convolución en frecuencia de la portadora ahora del doble de frecuencia con la referencia. Lo anterior implica que se puede utilizar un filtro inductivo más pequeño en la salida, logrando corrientes altamente sinusoidales como se presenta a continuación.

Parámetro	Valor
Resistencia lado ac	10[Ω]
Inductancia lado ac	20[mH]
Frecuencia de conmutación	1000[Hz]
Voltaje enlace DC	600[V]

Tabla 3.1: Parámetros de simulación para puente H

Vab	Sw1	Sw2	Sw3	Sw4
+Vdc	1	0	0	1
-Vdc	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	0	1	0	1

Tabla 3.2: Disparos para semiconductores de puente H unipolar

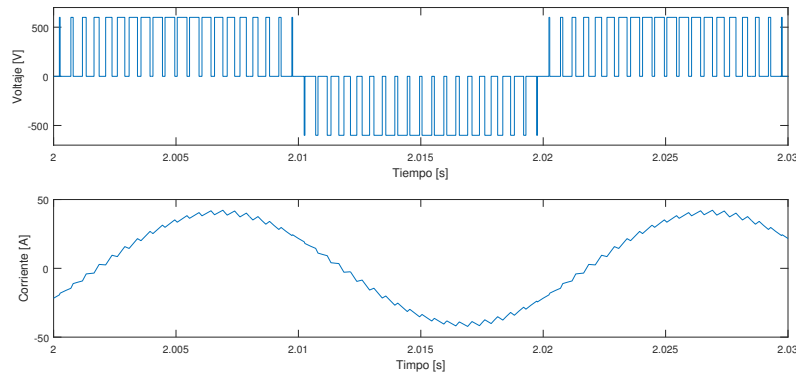


Figura 3.2: Voltaje y corriente a la salida de puente H

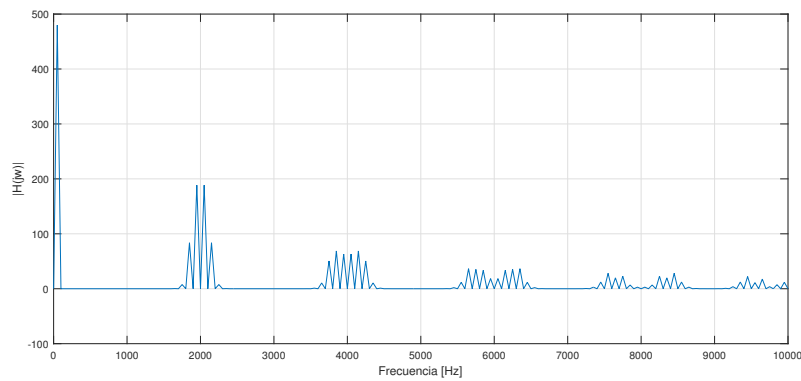


Figura 3.3: FFT de voltaje de la salida de puente H

Como se aprecia en las figuras 3.2 la tensión de salida posee 3 niveles de voltaje los cuales corresponden a los detallados en la tabla 3.1. Además, se logra ver una corriente bastante sinusoidal, sin embargo la inductancia que se está considerando es grande. Como se ve en la figura 3.3 la frecuencia en la cual aparecen las primeras armónicas es 2000[hz] siendo que la frecuencia de conmutación es de 1000[hz]. Finalmente como se aprecia en la figura 3.4 la corriente posee sus armónicos sumamente atenuados, logrando un THD de corriente inferior a 3%.

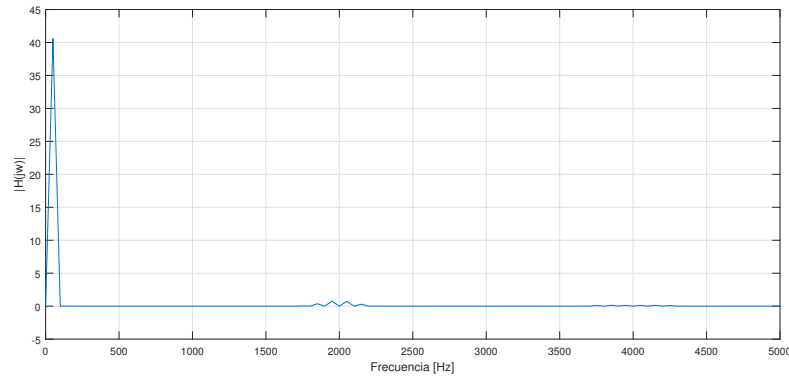


Figura 3.4: FFT de corriente de la salida de puente H

### 3.2. Simulación de convertidor modular multinivel

Para finalizar se presenta el modelado, control y simulación del convertidor multinivel modular.

Para cada celda como se discute en el capítulo 2, existen dos convertidores comúnmente utilizadas, las cuales corresponden a semi-puente y puente H. Una propuesta realizada para obtener un modelo del comportamiento del convertidor es trabajar cada una de las ramas como fuentes controladas de voltaje, como se aprecia en la figura 3.5. En base al esquema

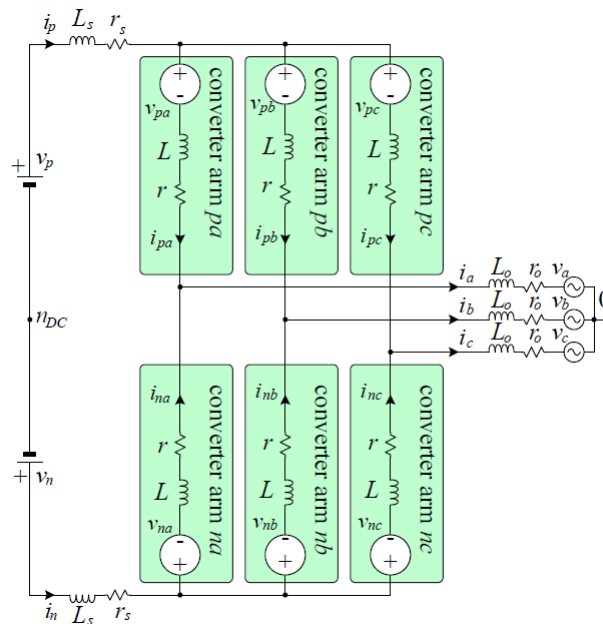


Figura 3.5: Esquema de modelo equivalente de convertidor MMC

expuesto anteriormente y planteando las ecuaciones de voltajes y corrientes, se obtiene un sistema de sexto orden. En vista de ello, muchos autores han intentado reducir el modelo a un sistema más simple para fines de control. Se realizó un trabajo para obtener un modelo, simplificando el comportamiento dinámico del convertidor <sup>1</sup>. Se basa en la descripción de 4 corrientes presentes en el convertidor, las cuales corresponden a corriente en dc-link, corriente AC, corriente de modo común y corriente circulante.

El resultado es un modelo desacoplado de corrientes que presentan una dinámica de primer orden, lo que es bastante favorable para realizar control lineal sobre el convertidor. El modelo de corrientes se expone a continuación.

$$(3L_s + L + 2L_o) \frac{d}{dt} i_m + (3r_s + r + 2r_o) i_m = -m_m V_c \quad (3.1)$$

$$(3L_s + L) \frac{d}{dt} i_s + (3r_s + r) i_s = -m_s V_c \quad (3.2)$$

$$(L + 2L_o) \frac{d}{dt} i_o + (r + 2r_o) i_o = -m_o V_c \quad (3.3)$$

$$L \frac{d}{dt} i_z + r i_z = -m_z V_c \quad (3.4)$$

Con ello se controla cada una de las dinámicas de forma desacoplada con un controlador PI. Además se propone una reconstrucción de la señal de referencia a partir de la suma de cada uno de los índices de modulación entregado por cada control. Con el esquema mostrado en

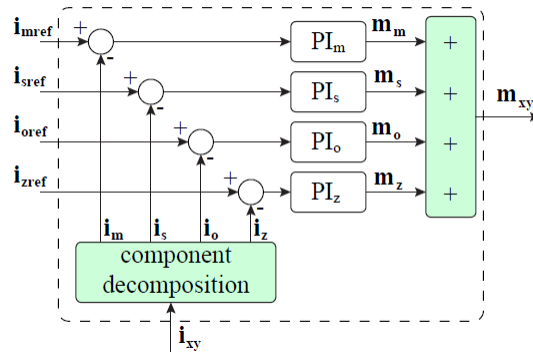


Figura 3.6: Esquema de control de corrientes

la figura 3.6 es posible manipular las referencias de manera directa, sin embargo el paper propone un control de balance de condensadores, para el cual hace uso de la referencia  $i_s$ . El control de balance se basa en el balance de energía del convertidor en un punto de equilibrio, si se está por sobre de dicho punto de equilibrio la corriente por el dc-link disminuirá, de lo contrario aumentará. El esquema se muestra a continuación.

<sup>1</sup>Decoupled current model and control of modular multilevel convertes, Marcelo A. Pérez, Ricardo Lizana, David Arancibia, José R. Espinoza, José Rodriguez

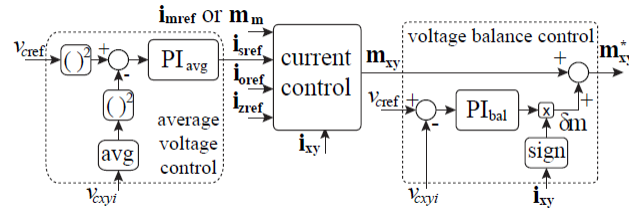


Figura 3.7: Esquema de control final

Como se aprecia en la figura 3.7 el control de balance es realizado sobre cada una de las ramas, el cual entrega una referencia de corriente  $i_s$  mediante un controlador PI en función de la diferencia de tensión promedio de cada rama. Para el control de balance por celda una propuesta llevada a cabo por el paper consiste en agregar un offset si dicha celda se encuentra por sobre la tensión deseada y quitando dicho offset en caso de que se encuentre por debajo de la referencia. De esta forma el valor del condensador de cada celda oscilará alrededor de un valor de referencia dado. Implementando lo anterior en simulación vía Matlab para un convertidor multinivel modular de 4 celdas por rama y los siguientes parámetros.

Parámetro	Valor
Voltaje en cada celda	400[V]
Voltaje en dc-link	2250[V]
Frecuencia de conmutación	2000[Hz]
Inductancia inter-rama	10[mH]
Inductancia línea dc	30[mH]
Inductancia línea ac	20[mH]
Resistencia pérdidas de celda	10[kΩ]
Resistencia línea dc	1[Ω]
Resistencia línea ac	0.7[Ω]
Resistencia inter-rama	0.3[Ω]
Celdas por rama	4 celdas
Voltaje red AC	500[V]
Condensador dc-link celda	1[mF]

Tabla 3.3: Parámetros de simulación para puente H

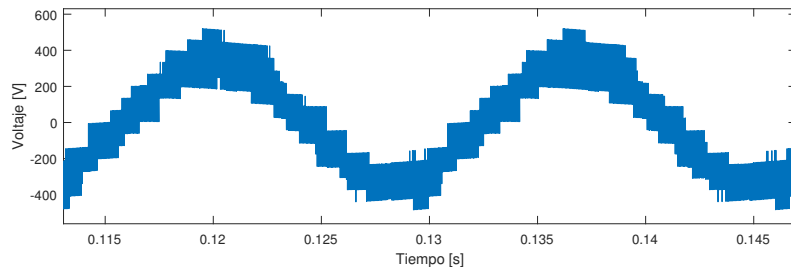


Figura 3.8: Zoom de voltaje generado por el convertidor

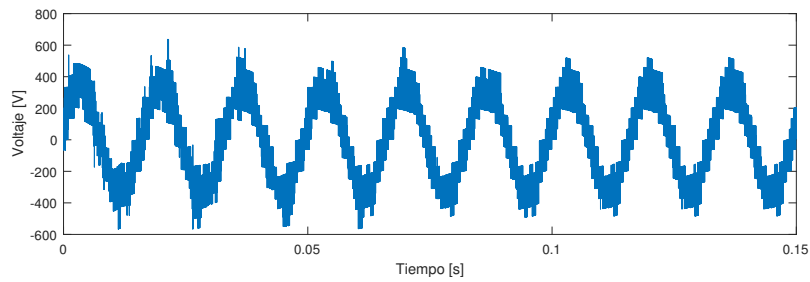


Figura 3.9: Voltaje generado por el convertidor

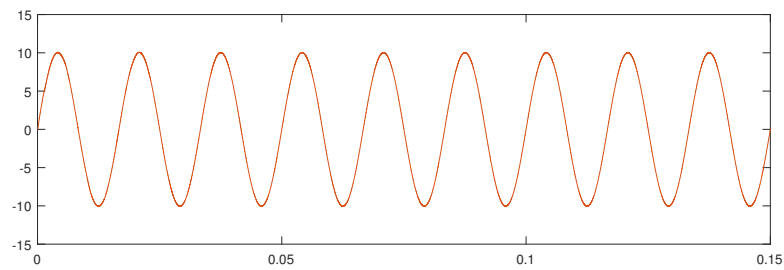


Figura 3.10: Corriente a la salida del convertidor

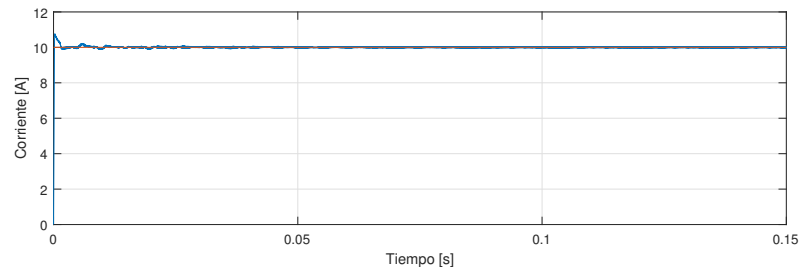
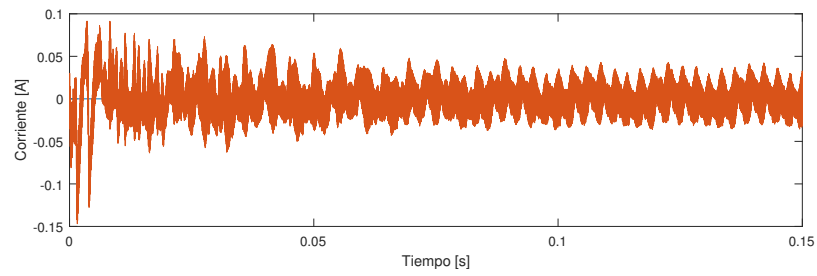
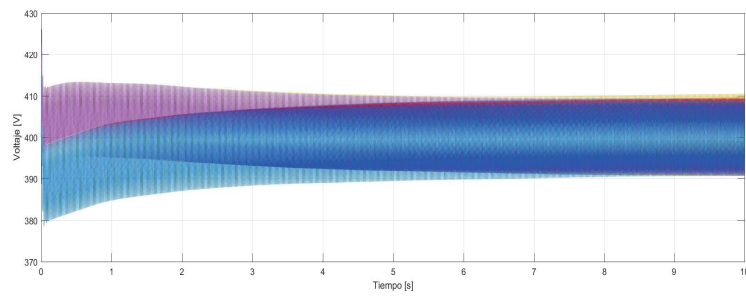
Figura 3.11: Corriente a la salida del convertidor en dominio  $d$ Figura 3.12: Corriente a la salida del convertidor en dominio  $q$ 

Figura 3.13: Evolución del control de balance en las celdas de fase A

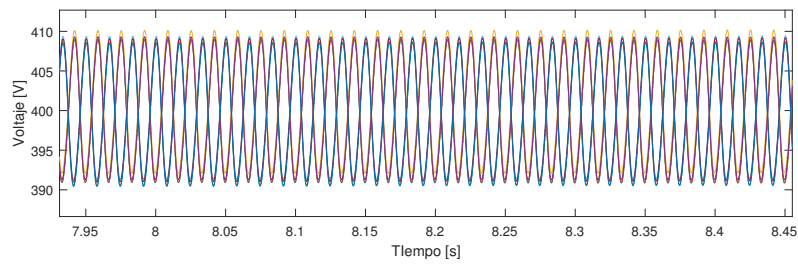


Figura 3.14: Voltaje en cada celda de la fase A

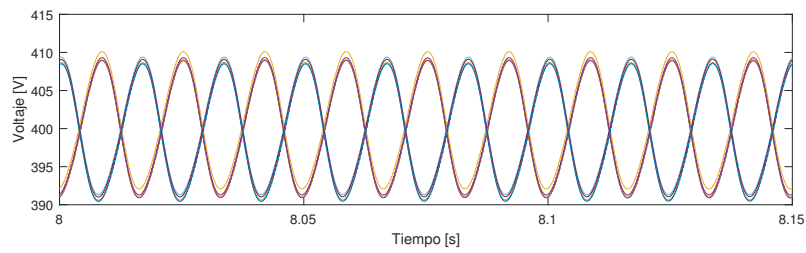


Figura 3.15: Zoom a voltaje en cada celda de la fase A

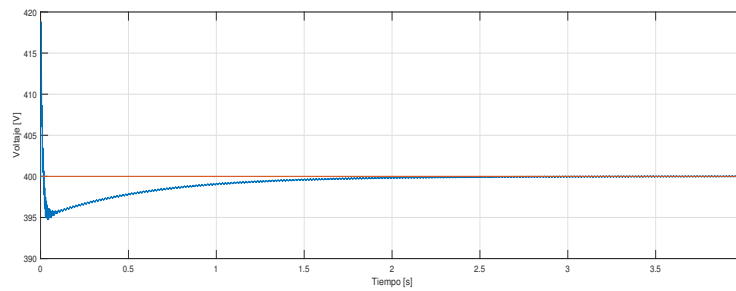


Figura 3.16: Zoom a promedio de voltaje de celdas fase A



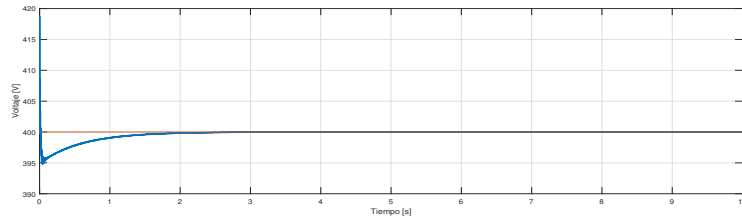


Figura 3.17: Promedio de voltaje de celdas fase A

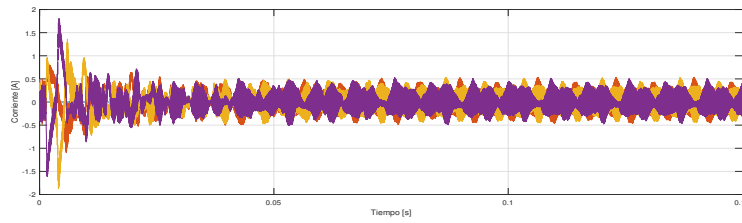


Figura 3.18: Corriente circulante

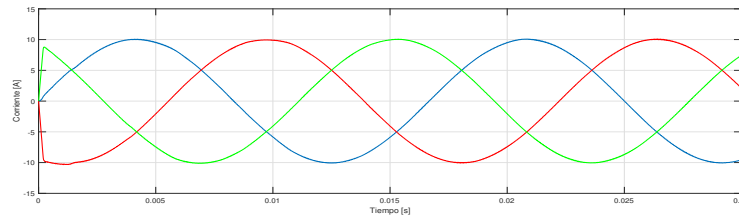


Figura 3.19: Corrientes trifásicas a la salida de convertidor

Como se aprecia en la figura 3.8 y 3.9 la tensión es de carácter muy sinusoidal, ya que el convertidor es capaz de generar 33 niveles de tensión en la carga. Como se ve en la figura 3.10 la corriente sigue la referencia dada por el control y es del todo sinusoidal, ya que filtrando la tensión con la carga inductiva se logra filtrar el contenido armónico.

Las figuras 3.11 y 3.12 muestran las corrientes trifásicas en el dominio continuo, dado que se está inyectando a la red se establece la referencia de la corriente  $q$  en cero, y la corriente  $d$  en un valor definido, en este caso  $10[A]$ .

Uno de los resultados más importantes de la simulación se presentan en la figura 3.13, 3.14 y 3.15 los que muestran el control de balance de las 8 celdas de la fase A. Se aprecia en la figura 3.13 que el balance converge a  $400[V]$  y oscila con un pequeño ripple menor al 10% del valor total. Se ve un control lento, lo cual está dado por los parámetros escogidos para el controlador, sin embargo el control funciona. En las figuras 3.14 y 3.15 se hace un zoom para ver el detalle de la oscilación del voltaje en cada celda.

En la figura 3.16 y 3.17 se muestra el promedio de los condensadores de las celdas de la fase A, como se aprecia el control de balance funciona por rama y por celda.

En la figura 3.18 se ilustra las corrientes circulantes cuyas referencias en el lazo de control se establece como cero, sin embargo no es posible llevar a cero dicha corriente pero el control lo minimiza, disminuyendo así las pérdidas.

Finalmente en la figura 3.19 se muestran las corrientes trifásicas en el dominio abc, de las cuales es posible afirmar que poseen nulo contenido armónico, siendo una de las ventajas destacables del convertidor.

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CELDA PARA MMC

En este capítulo se desarrolla el trabajo realizado para llevar a cabo el diseño de la celda de potencia para el convertidor MMC. Se comienza con un esquema conceptual del diseño, posteriormente se identifica los componentes necesarios para la PCB y se procede al diseño propiamente tal en el software Altium Designer.

### 4.1. Diseño conceptual

Para el diseño conceptual se considera un esquema modular simple para un entendimiento global de la relación entre los módulos de la celda.

La tarjeta de comunicación opera como una interfaz entre la etapa de potencia y la plataforma de control. Dicha tarjeta recibe información de posibles estados de falla proveniente de la tarjeta de disparo y además recibe una medición de voltaje entregada directamente desde el módulo de potencia. Además es encargada de enviar hacia la tarjeta de disparo información proveniente de la plataforma de control, como lo son señales

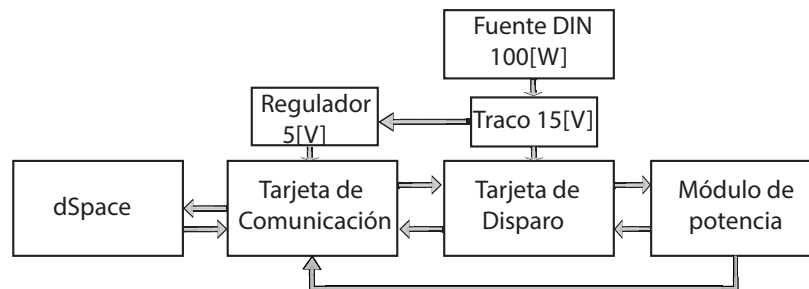


Figura 4.1: Esquema conceptual de celda para MMC

habilitadoras del sistema y pulsos de disparo.

La tarjeta de disparo es encargada de recibir los pulsos provenientes de la tarjeta de comunicación y disparar los IGBT.

Finalmente el módulo de potencia debe realizar la conversión de energía mediante un inversor puente H, sin embargo se utilizará un módulo trifásico por lo que se diseñará todo con una redundancia de una fase. Además debe tener un circuito de medición de voltaje en los condensadores.

#### 4.1.1. Compatibilidad con tarjeta de comunicación

Para la conexión entre la celda de potencia y la tarjeta de comunicación se utilizó un pin header de 17 pines y 2 columnas, cuya distancia entre cada uno de ellos es de 100 milésimas de pulgada. Se requiere que la distribución de pines sea compatible con la tarjeta de comunicación <sup>1</sup>.

Considerando que los pines requeridos del microcontrolador PIC18F26K22 son un convertor análogo digital, entradas y salidas, se identifica una posible distribución para la tarjeta de comunicación.

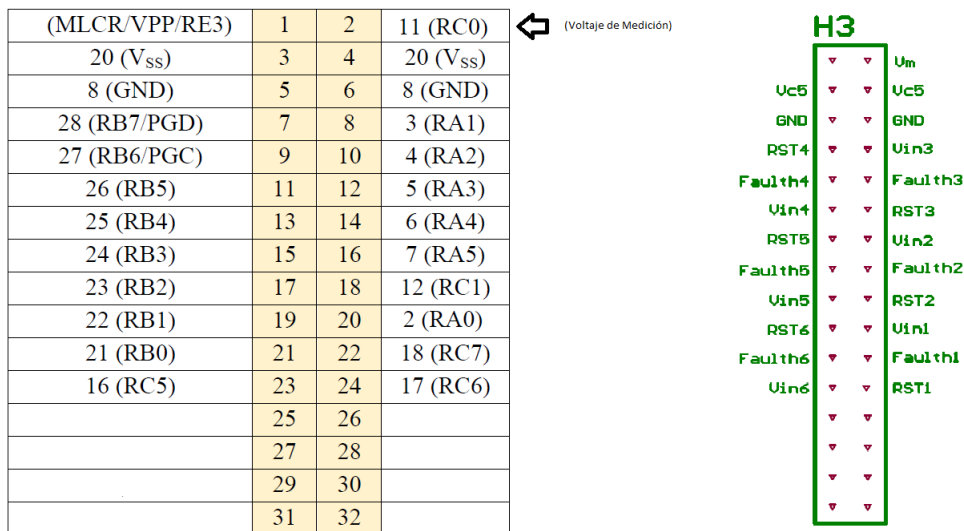


Figura 4.2: Pines de tarjeta de comunicación y ranura de comunicación MMC

Con ello, las señales a las cuales corresponde cada uno de los pines señalados en la figura 4.2 son las siguientes. La identificación de pines de la figura 4.2 correspondientes a las señales provenientes de la tarjeta de comunicación se describe en la tabla a continuación.

<sup>1</sup>Memoria Nicolás Ramírez

Símbolo	Pin	Descripción
$V_m$	2	Medición de voltaje
$V_{c5}$	3 y 4	Alimentación de 5[V]
$GND$	5 y 6	Tierra
$RST_4$	7	Reset IGBT 4
$V_{in3}$	8	Pulso de disparo IGBT 3
$Fault_4$	9	Falla IGBT 4
$Fault_3$	10	Falla IGBT 3
$V_{in4}$	11	Pulso de disparo IGBT 4
$RST_3$	12	Reset IGBT 3
$RST_5$	13	Reset IGBT 5
$V_{in2}$	14	Pulso de disparo IGBT 2
$Fault_5$	15	Falla IGBT 5
$Fault_2$	16	Falla IGBT 2
$V_{in5}$	17	Pulso de disparo IGBT 5
$RST_2$	18	Reset IGBT 2
$RST_6$	19	Reset IGBT 6
$V_{in1}$	20	Pulso de disparo IGBT 1
$Fault_6$	21	Falla IGBT 6
$Fault_1$	22	Falla IGBT 1
$V_{in6}$	23	Pulso de disparo IGBT 6
$RST_1$	24	Reset IGBT 1

Tabla 4.1: Tabla descriptiva de señales del circuito de disparo

Finalmente una restricción a considerar son los pines que son utilizados para la programación del microcontrolador que posee la tarjeta de comunicación.

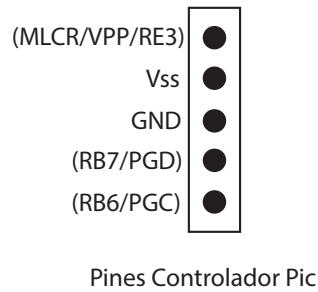


Figura 4.3: Pines de programador PIC

En la figura 4.3 se presenta la disposición de pines del programador utilizado, por lo que se propone dejar esa distribución de 6 pines fija en la celda de potencia, de esa forma se obtiene un conector genérico para tanto programación como uso. Además, es importante destacar que el pin MLCR/VPP/RE3 es utilizado como un programmer enable, por lo que se dejará abierto en la celda, para ser de uso exclusivo del programador.

### 4.1.2. Compatibilidad con la tarjeta de disparo

Para la conexión entre la celda de potencia y la tarjeta de disparo se utilizó un pin header de 5 pines y 2 columnas para cada semiconductor. La disposición de pines para la tarjeta de disparo es definida <sup>2</sup>.

Como se puede apreciar en la figura 4.4 la tarjeta de disparo requiere conexión a emisor,

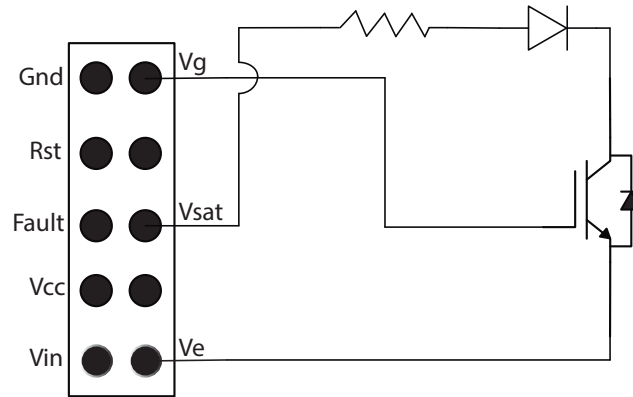


Figura 4.4: Pines de tarjeta de disparo y conexión requerida hacia IGBT

colector y base del IGBT para su funcionamiento. La conexión al colector se hace mediante una resistencia de  $100[\Omega]$  y un diodo, lo anterior es utilizado para detectar alguna falla en el dispositivo. La conexión tanto a emisor como a la base del IGBT es de manera directa, sin embargo por criterios de diseño como se verá más adelante, la distancia a estos puntos debe ser la más pequeña posible para disminuir los efectos de inductancia parásita, ya que además considerando la capacitancia parásita en el semiconductor los pulsos de disparos puede experimentar resonancias.

Símbolo	Pin	Descripción
$V_{in}$	9	Pulso de disparo
$Rst$	3	Reset de estado
$Fault$	5	Señal de falla
$Gnd$	1	Tierra del circuito
$V_{cc}$	7	Voltaje de polarización (15 Volts)
$V_g$	2	Base de IGBT
$V_e$	10	Emisor de IGBT
$V_{sat}$	6	Colector de IGBT

Tabla 4.2: Tabla descriptiva de señales del circuito de disparo

<sup>2</sup>Memoria Camilo Urqueta

Por la segunda columna del pin header de la tarjeta de disparo encuentran los pines provenientes de la tarjeta de comunicación y de alimentación.

### 4.1.3. Circuito de medición

El circuito de medición de voltaje en los condensadores utilizó un divisor de tensión entre los puntos del DC-Link. El voltaje medido pasa por un amplificador operacional de instrumentación y luego pasa a la tarjeta de comunicación. Dicho voltaje debe estar en un rango de  $0 - 5[V]$  el cual representará un voltaje desde  $0 - 600[V]$ . Para determinar el valor

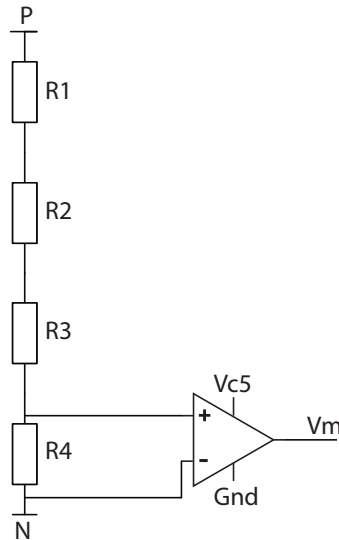


Figura 4.5: Esquema de circuito de medición

de las resistencias se procede obteniendo la ecuación de voltajes por la malla.

$$P - (V_{R1} + V_{R2} + V_{R3} + V_{R4}) = 0 \quad (4.1)$$

Con ello si se define por simplicidad  $R_1 = R_2 = R_3 = 200[k\Omega]$  se despeja obteniendo  $R_4 = 5[k\Omega]$ . Considerando esos valores, la corriente por la malla de medición para  $P = 600[V]$  será de:

$$I = \frac{600}{605000} = 0,99[mA]$$

Por lo que la potencia disipada por  $R_1 - R_3$  es de  $0.2[W]$ , y para  $R_4$  es  $0.005[W]$ .

El amplificador empleado para el buffer empleado es un amplificador de instrumentación AD623 cuyo ancho de banda es de  $800[khz]$ , el cual posee dos pines de configuración,  $+R_G$  y  $-R_G$  utilizados para dar ganancia a la señal de entrada según la siguiente expresión:

$$G = 1 + \frac{100k}{R_G} \quad (4.2)$$

Dejando el circuito abierto entre los pines respectivos, se obtiene una ganancia unitaria.



#### 4.1.4. Módulo de potencia

Para la etapa de potencia se requiere un puente H para cada celda, sin embargo se hizo una compra anticipada de un módulo trifásico basado en IGBT el cual se utilizará en el diseño. Lo anterior causará que la tarjeta de potencia tenga una redundancia ya que dos de sus tres fases estará operativa, sin embargo la fase restante será utilizada en caso de falla. El módulo que se implementará es un INFINEON FS35R12KT3, consiste en un módulo puente trifásico basado en IGBT discreto, cuya tensión nominal de operación es de 1200[V] y una corriente nominal de 35[A]. El módulo será descrito en la siguiente sección.

#### 4.1.5. Alimentación de circuitos de disparo y comunicación

Un punto importante para terminar con el diseño conceptual de la tarjeta es qué tipo de alimentación se requiere para cada etapa.

1. Para la etapa de comunicación, el controlador PIC y toda la lógica de la tarjeta requiere  $V_c = 5[V]$ .
2. Para la etapa de disparo, la tarjeta requiere un alimentación  $V_{cc} = 15[V]$ . Bajo dichos requerimientos se propone utilizar un convertidor DC/DC comercial que tome una tensión continua entre 9-18[V] entregada por una fuente, y que a la salida entregue la 15[V] continuos para alimentar la tarjeta de disparo.
3. Para alimentar la tarjeta de comunicación, se propone utilizar un regulador lineal de baja potencia para reducir los costos, que tome 15[V] entregados por el convertidor DC/DC y a la salida entregue 5[V] continuos.

Con ello se desarrolla el siguiente esquema de la tarjeta.

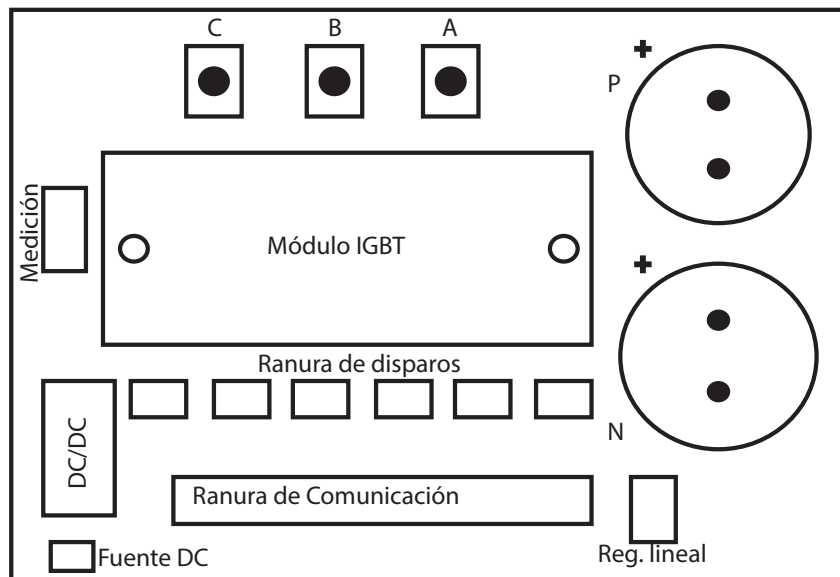


Figura 4.6: Diagrama de celda de MMC

## 4.2. Diseño en Altium Designer

En esta sección se desarrolla el trabajo realizado para llevar a cabo el diseño de la celda de potencia.

### 4.2.1. Diseño esquemático

Se procede realizando el diseño y ruteo de las componentes asociadas. La distribución de pines del módulo IGBT utilizado se adjuntan a continuación.

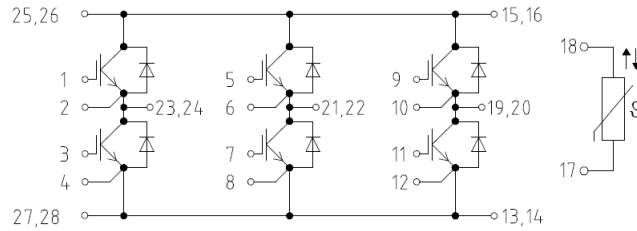


Figura 4.7: Circuito equivalente de módulo INFINEON FS35R12KT3

Antes de comenzar con el ruteo y diseño en Altium Designer se debe elaborar cada librería de esquemático y footprint de las componentes que se utilizarán que no incluya el software por defecto. De todas formas se recomienda elaborar todas las componentes a utilizar para dejar márgenes de tamaño, de esa forma será más fácil soldar cada componente. Realizando el ruteo entre la tarjeta de comunicación y disparo, y ruteo de potencia como señala la figura 4.4 se obtiene lo siguiente.

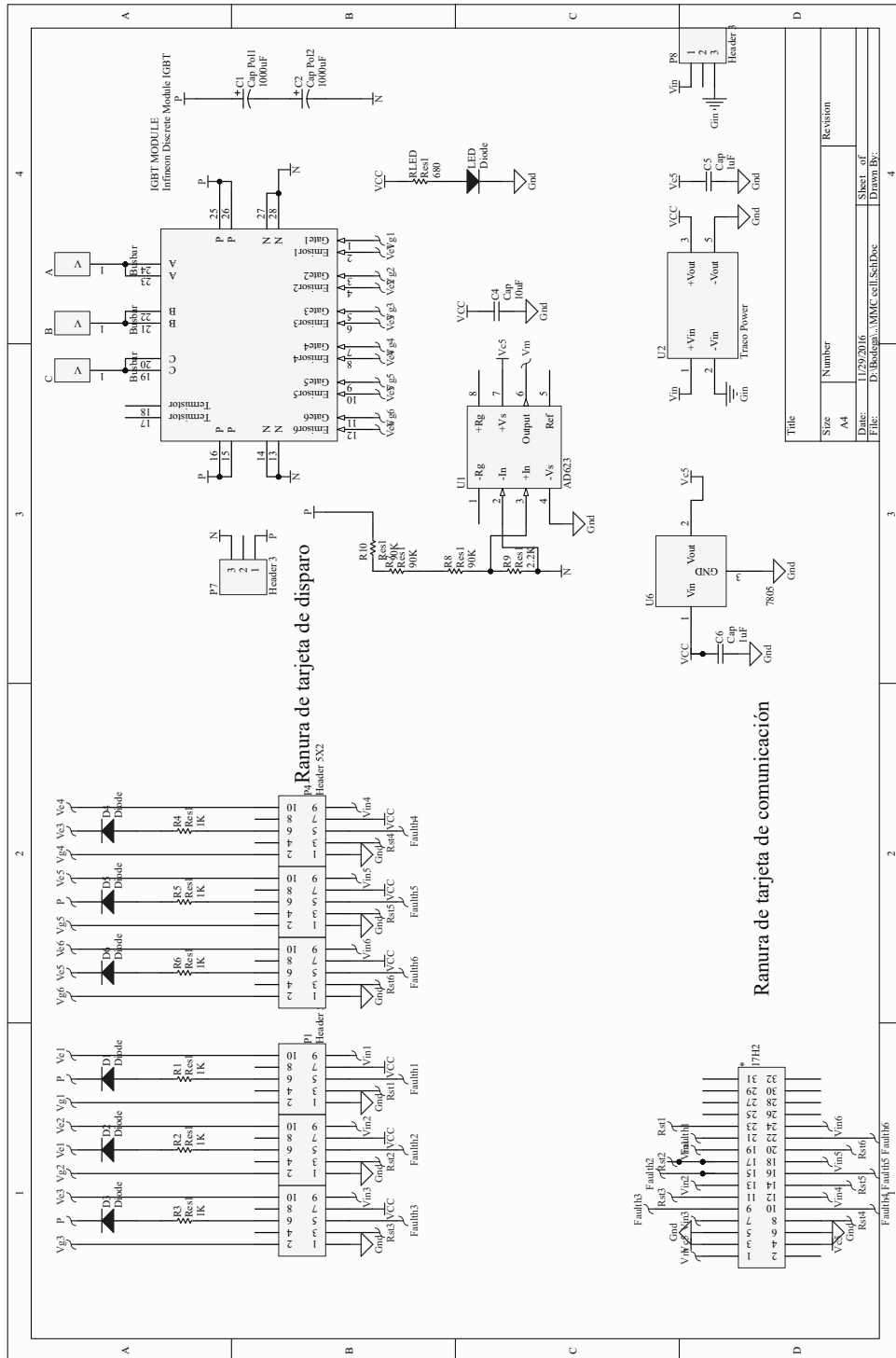


Figura 4.8: Esquemático de Altium Designer

### 4.2.2. Diseño PCB

Una vez terminado el diseño esquemático y verificando que las conexiones entre las componentes estén en correcto orden, se procede importando la información del esquemático a la interfaz de diseño PCB de Altium Designer.

Es importante destacar que el diseño de la PCB está directamente relacionada con la distribución y forma del módulo IGBT, puesto que es su componente más grande, y por criterios de diseño no debe estar alejada de la tarjeta de disparo. El footprint de dicho módulo se adjunta a continuación.

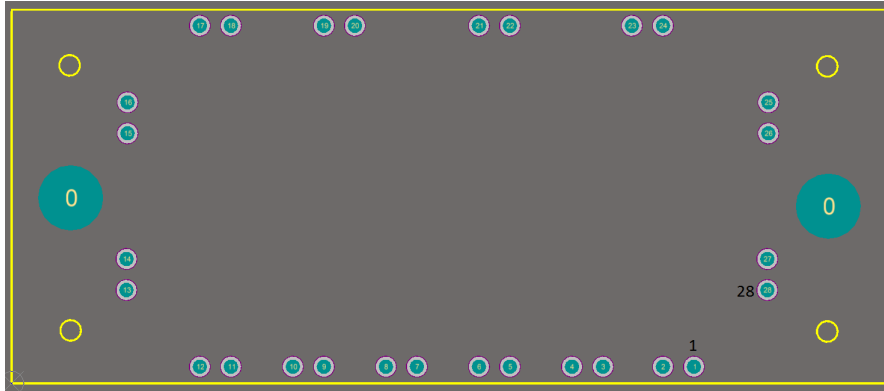


Figura 4.9: Footprint de módulo trifásico INFINEON FS35R12KT3

Como se puede ver en la figura 4.7 y 4.9 la distribución de pines del módulo es tremendamente conveniente para el diseño que se lleva a cabo, puesto que tiene los emisores y bases de cada IGBT en la parte inferior, por lo que se determina que la tarjeta de disparo irá situada en ese lado. Además, se tiene acceso al dc-link por ambos costados, permitiendo que el condensador esté bien situado. Finalmente se tiene que la etapa AC del inversor puente trifásico está al otro extremo de los pulsos de disparo.

El diseño posee ciertas restricciones importantes que se denotan a continuación.

- a El tamaño de la PCB no debe exceder los 15 centímetros de ancho para un uso apropiado del espacio disponible en el rack.
- b La PCB debe tener conexión directa al DC-LINK para pruebas de funcionamiento.
- c La etapa de potencia no debe estar situada cerca de etapa de comunicación.
- d Para una mayor flexibilidad el footprint del condensador debe ser compatible con condensadores de perfil alto y perfil bajo.

A continuación se ilustra el resultado obtenido de las capas superior e inferior de la celda y una tabla de componentes utilizados.

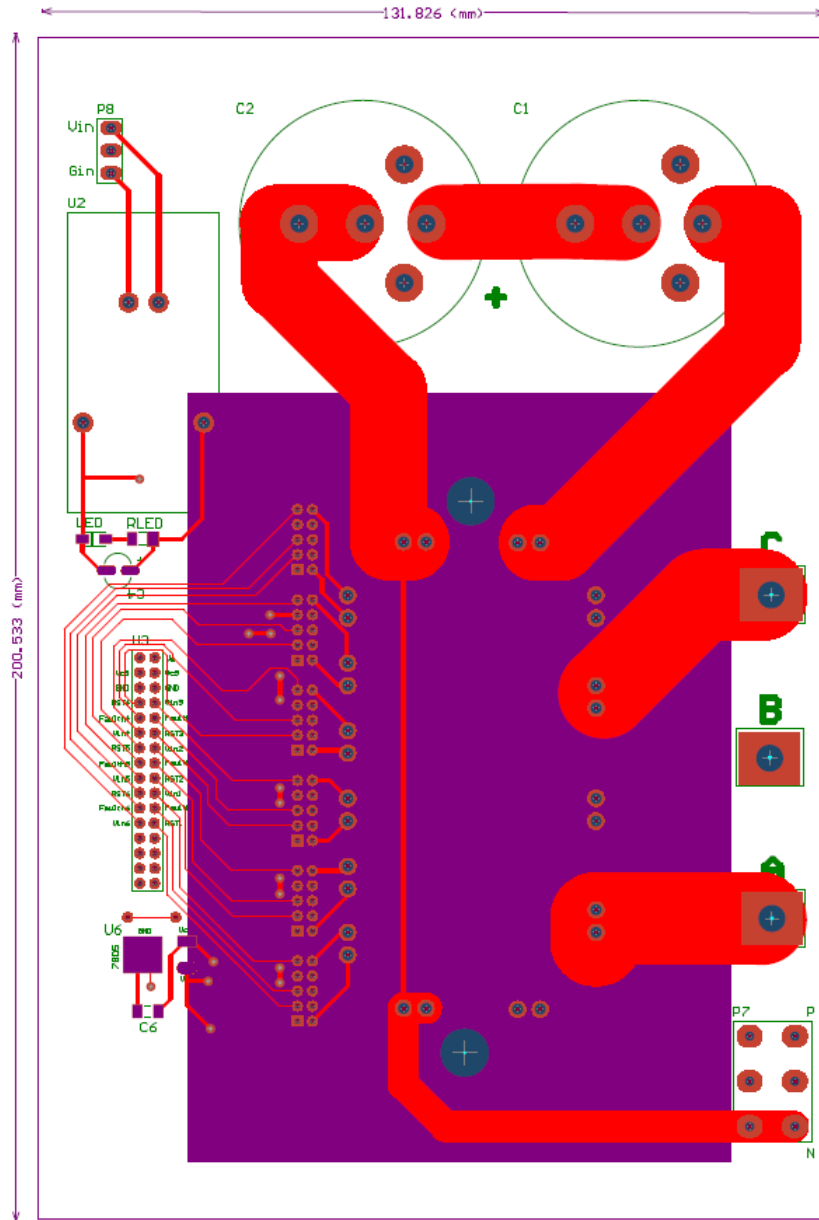


Figura 4.10: Capas superiores de celda MMC diseñada

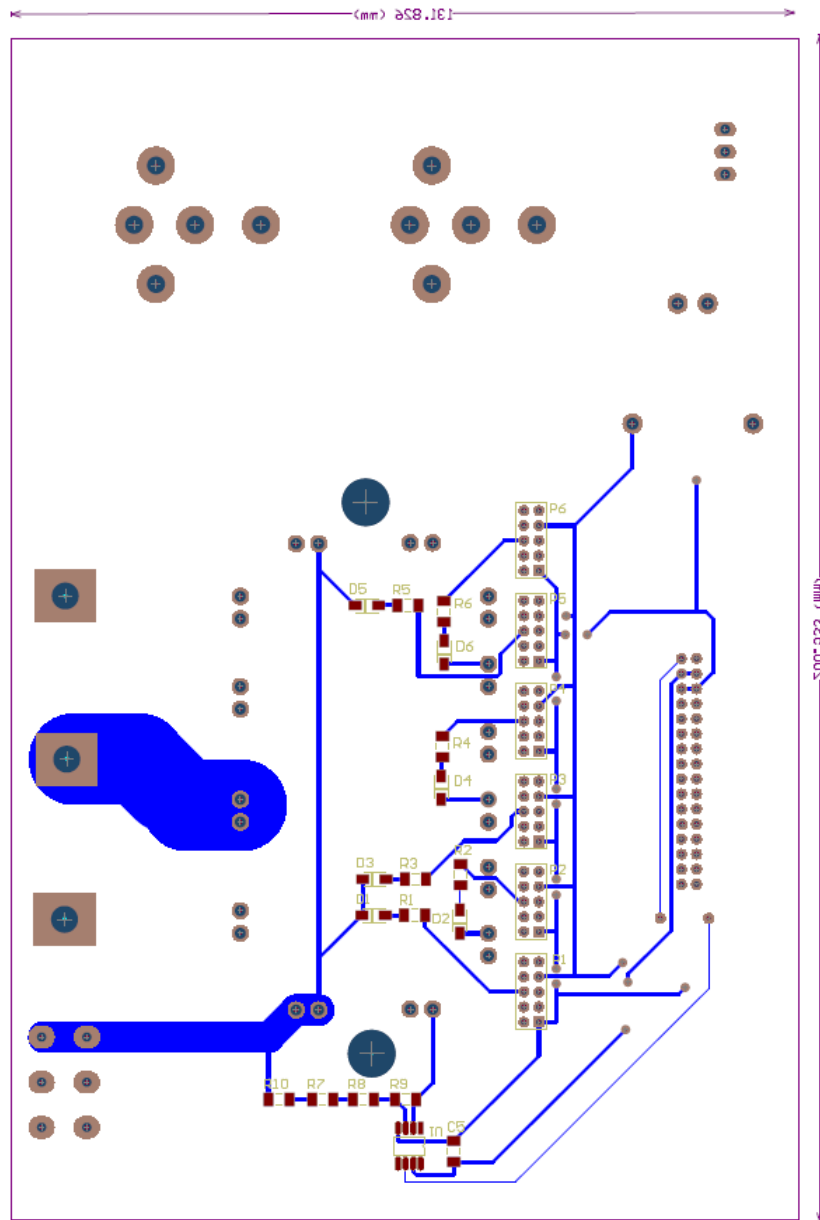


Figura 4.11: Capas inferiores de celda MMC diseñada

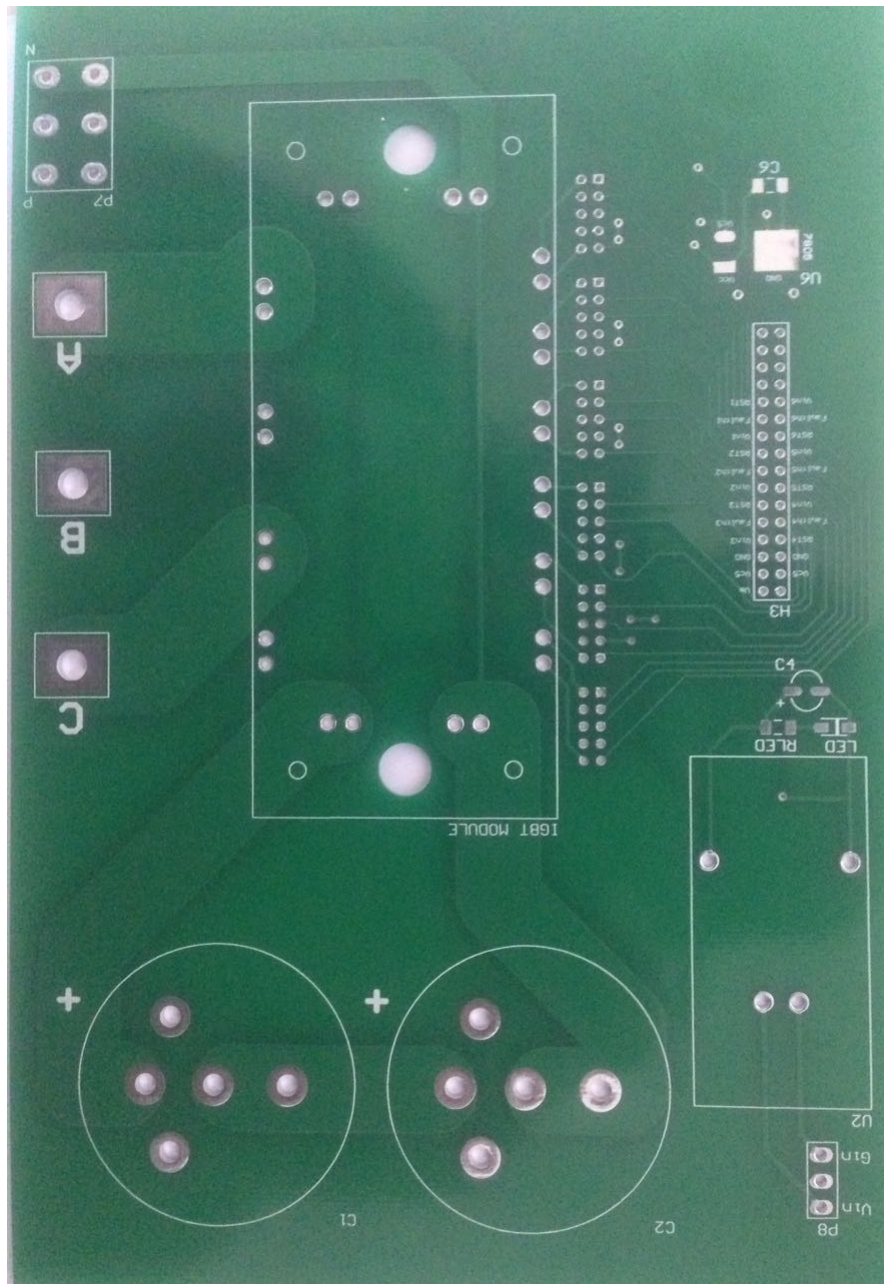


Figura 4.12: Vista superior de celda para MMC

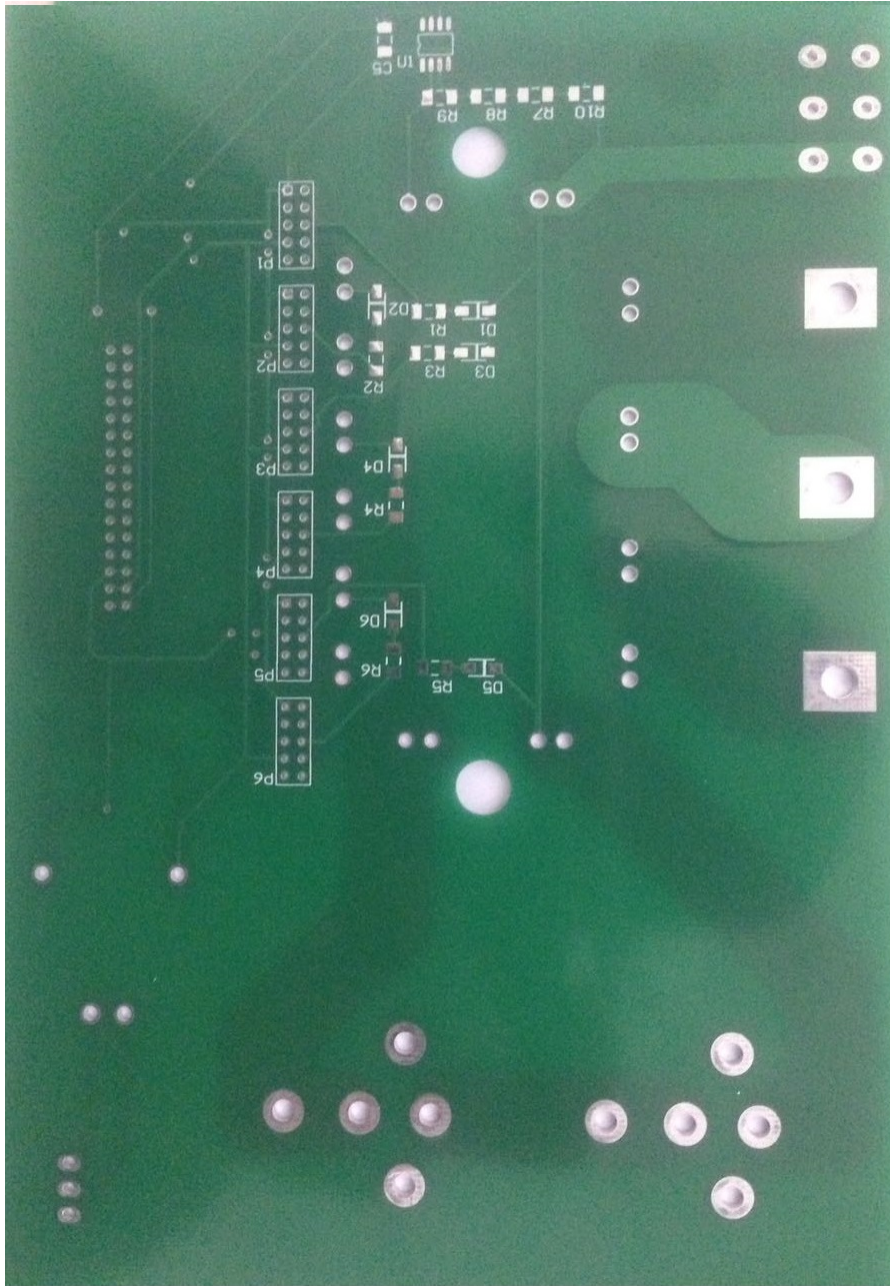


Figura 4.13: Vista inferior de celda para MMC



Descripción	Modelo	Cantidad	Encapsulado	Características
Módulo Inversor Trifásico	FS35R12KT3	1		1200[V] 35[A]
DC-DC	TEN 10 1213	1		Alimenta circuitos de control, 9-18[V] a 15[V] de 10[W]
Regulador lineal	MC7805	1		Alimenta circuitos de comunicación, 15[V] a 5[V] 5[W]
Amplificador de señal	AD623	1	SO8	medición de tensión en Condensadores
Condensador Electrolytico	-	2		1000[uF] 400[V]
Condensador Electrolytico	-	1	SMD	Condensador de filtro para DC-DC TEL 10 1213, 10[uF]
Condensador cerámico	-	2	1206	filtro, 0.1[uF]
Conector 3 polos 300mil	-	1	-	Conector de potencia para acceso a DC-Link
Conector 3 polos 150mil	-	1	-	Alimentación DC externa
16x2 Pin header	-	1	SIP16	Ranura de comunicación
5x2 Pin header	-	6	SIP5	Ranura de disparo
LED	-	1	1206	Testigo
RLED	-	1	1206	Resistencia LED 680Ω
$R_{medicion}$	-	3	1206	Resistencia de medición, 200kΩ 1/4[W]
$R_{medicion2}$	-	1	1206	Resistencia de medición, 5kΩ 1/4[W]
$R_{colector}$	-	6	1206	Resistencia de disparo, 100Ω
Diodo	-	6	1206	Fast Recovery

Tabla 4.3: Tabla Componentes para celda MMC

# ESQUEMA ELÉCTRICO DE MMC

En este capítulo se esquematiza las conexiones eléctricas para el montaje del convertidor, abordando el esquema eléctrico del convertidor y código de colores utilizado.

### 5.1. Diagrama unilineal de conexión a red del convertidor

Para la conexión se utilizan una serie de elementos internos y externos. Dentro de los elementos internos se encuentran las protecciones y una inductancia trifásica que actúa como filtro para la corriente, y para los elementos externos se pueden identificar un transformador delta-estrella conectado a red y un variac o transformador variable el cual consiste en un transformador cuyo número de vueltas del primario o secundario se modifica de forma manual. La conexión al transformador delta-estrella es utilizada para obtener conexión a neutro y otorgar aislación al sistema.

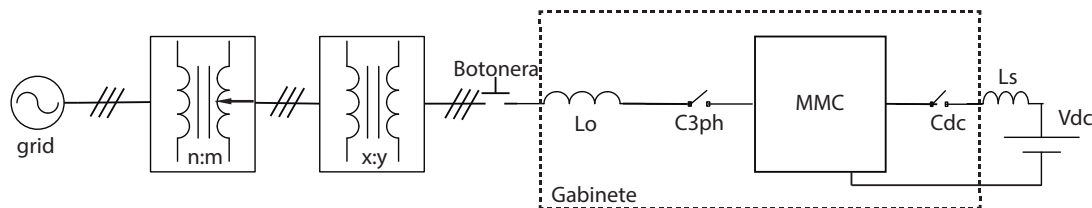


Figura 5.1: Diagrama unilineal de conexión a red

Como se puede ver en la figura 5.1 el transformador delta-estrella posee un número de vueltas en el primario y secundario  $n,m$  respectivamente, el cual dependerá del nivel de tensión que se requiera en la etapa AC del convertidor. Seguido a dicho transformador se

encuentra conectado un variac, cuyo número de de vueltas  $y$  se modifica manualmente y su valor varía entre  $0 \leq y \leq x$ . La salida del variac es conectada al enchufe trifásico disponible en el convertidor como se muestra en la figura 5.2. El variac es utilizado para operar con un voltaje de red menor al nominal en caso que se desee trabajar en dicha circunstancia.



Figura 5.2: Propuesta de conexión a red del convertidor

La conexión se realiza internamente a una bobina trifásica que es conectada a un contactor trifásico como se ve en la figura 5.3.

## 5.2. Esquema eléctrico de MMC

Antes de especificar el esquema eléctrico del MMC se expone el código de colores utilizado para toda conexión de potencia del convertidor.

1. Verde: Fase A
2. Blanco : Fase B
3. Azul : Fase C
4. Rojo : DC positivo
5. Negro : DC negativo

El A continuación se propone trabajar un esquema del MMC en el cual se etiqueta cada borne como se aprecia en la figura 5.3. El gabinete es dividido como muestra la figura 5.4.

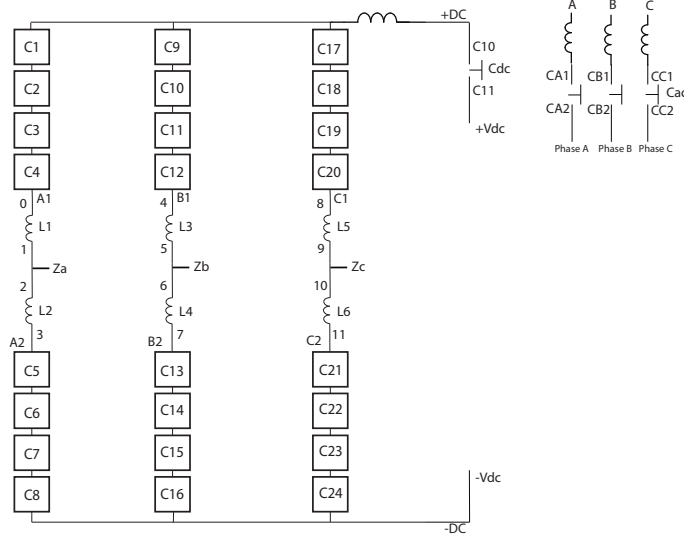


Figura 5.3: Esquema de MMC implementado

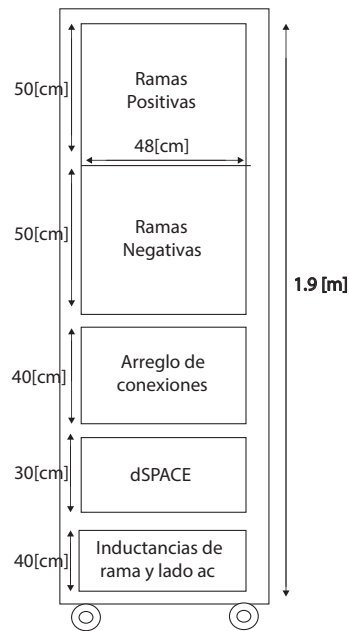


Figura 5.4: Esquema de gabinete

Haciendo uso del esquema anterior se diferenciará las conexiones internas del convertidor

y las conexiones de contactores, por lo tanto estas conexiones estarán físicamente más distanciadas de lo normal. Además las conexiones de contactores AC y DC se distanciarán entre sí para evitar algún cortocircuito.

Por lo tanto, la conexión establecida es la siguiente.

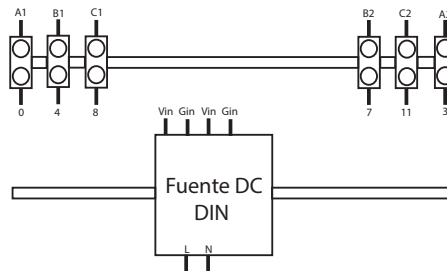


Figura 5.5: Diagrama de conexiones en bornas traseras

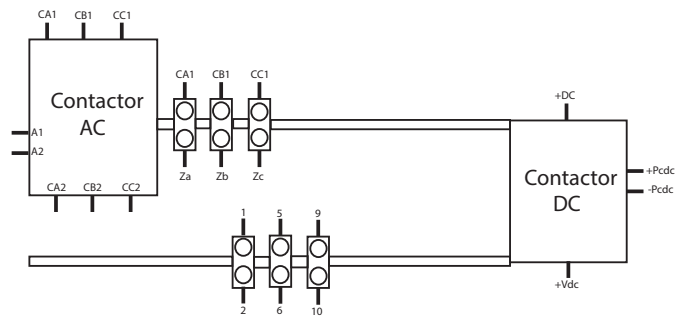


Figura 5.6: Diagrama de conexiones en bornas delanteras

Note que existe un espacio sobrante en los rieles tanto de la parte delantera como trasera, el cual será utilizado por relés de accionamiento para los contactores y una fuente auxiliar DC en caso que se requiera. El resultado de los esquemas anteriores es el siguiente.



Figura 5.7: Arreglo de conexiones figura 5.6

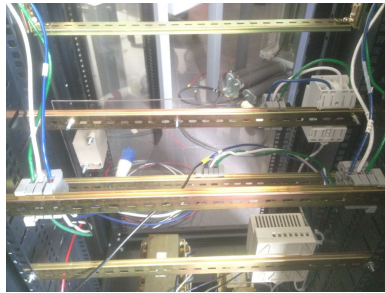


Figura 5.8: Arreglo de conexiones figura 5.5

Para el cableado de fibra óptica se debe considerar que cada celda tendrá 2 de ellas, por lo que no es posible canalizar todo en una sola canaleta. Por ello se propone canalizar la fibra para cada rama por separado. Luego cada fibra es conectada directamente en la tarjeta de fibra óptica la cual estará situada sobre la Dspace. Un esquema conceptual se presenta en la figura 5.9.



Figura 5.9: Esquema conceptual de conexión de comunicación

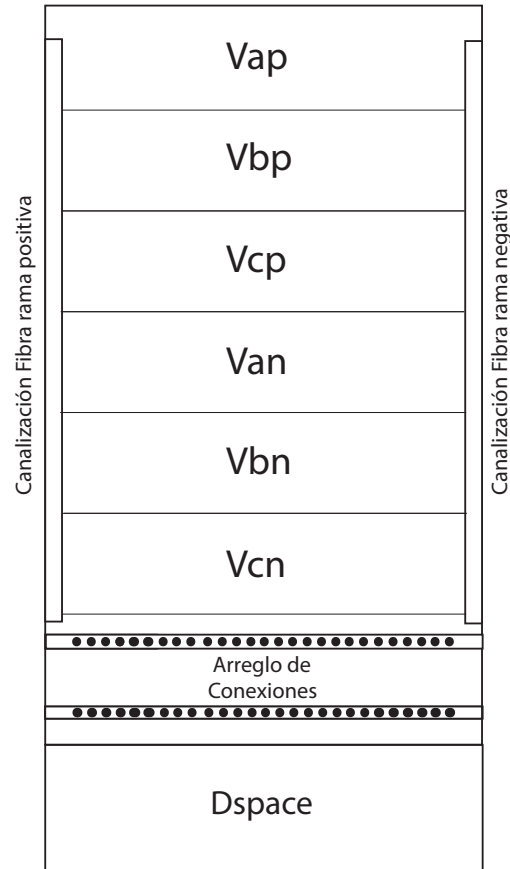


Figura 5.10: Diagrama de canalización de fibra óptica

Finalmente para la conexión de las celdas al DC-LINK se hace uso de barras de potencia, las cuales son montadas en el rack con un soporte aislante. Cada barra es situada en la parte trasera del soporte de las tarjetas, la barra positiva al costado izquierdo y la barra negativa al costado derecho.

# ESQUEMA MECÁNICO DE MONTAJE PARA MMC

En este capítulo se expone las dimensiones y distribución física de los elementos que forman parte del montaje del convertidor.

### 6.1. Montaje en rack de 19 pulgadas

El montaje del convertidor es realizado en un rack de 49 centímetros de ancho y 2 metros de alto, si bien es una gran cantidad de espacio, se debe montar una gran cantidad de elementos del convertidor. Dichos elementos corresponden a:

1. 24 celdas de potencia
2. 1 dSPACE
3. 6 inductancias de rama
4. 3 inductancia lado ac
5. 1 inductancia lado dc
6. 2 barras DC
7. Cableado sobre riel DIN
8. 1 contactor AC para protección para la conexión a red y un contactor DC para la conexión hacia la fuente externa
9. Tarjeta de fibra óptica
10. Fuente DIN de 100[W]

A continuación se presenta un esquema del montaje propuesto.



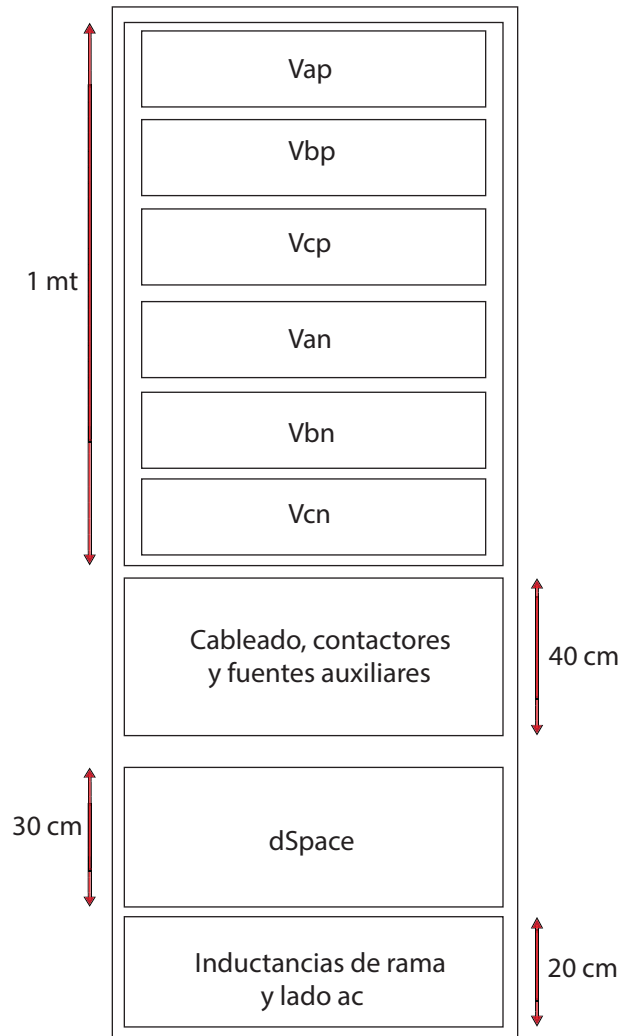


Figura 6.1: Esquema de montaje MMC

Como se aprecia en la figura 6.1 el montaje obedece a una forma ordenada de la disposición eléctrica del convertidor.

En la parte superior del rack se dispone las tres ramas positivas del convertidor, seguida de las 3 negativas. Lo anterior es posible ya que la tarjeta tiene una altura máxima de 7 centímetros utilizando condensadores de perfil alto y la disposición física del rack es de 49 centímetros.

Considerando el esquema ilustrado en la figura 6.1 se logra un montaje cuyas partes son claramente identificables, lo cual presenta una ventaja por sobre montajes descritos en el capítulo 2.

Bajo las ramas negativas se designa un espacio de 40 centímetros para montar rieles DIN, conexión de fibra, cableado y contactores.

Seguido se designa un espacio de 30 centímetros para la plataforma de control Dspace 1103

la cual fue medida previamente en laboratorio.

Finalmente se deja un espacio para inductancias utilizadas para la conexión entre las ramas del convertidor y la red AC.

## 6.2. Elementos utilizados en montaje

Dado que el convertidor es montado en un rack, se propone concentrar la etapa de cableado, contactores, tarjeta de fibra óptica y fuente DC DIN, para hacer un mejor uso del espacio disponible y así poder manipular toda conexión de forma ordenada.

Para el montaje de componentes que no son DIN, se utilizará un acrílico transparente, el cual irá montado sobre otro riel DIN. Dichas componentes corresponden a:

1. Contactor DC
2. Tarjeta de fibra óptica

Ya que la corriente que soportan los módulos trifásicos utilizados en la celda es de 35[A], los cables utilizados deben ser dimensionados a dicha corriente. Existe una categoría americana de cables la cual identifica el tamaño del conductor y su estimada capacidad de conducción. A continuación se adjuntan algunas de las medidas.

AWG	Diámetro[mm]	Corriente admisible[A]
14	1.628	15
12	2.053	25
10	2.588	30
8	3.264	40
6	4.115	55

Tabla 6.1: Tabla de código americano para cables

En vista de los datos entregados por la tabla anterior, la mejor opción para llevar a cabo el cableado corresponde al conductor AWG 10.

Los bornes de conexión utilizados corresponden a bornes DIN como se muestra en la figura 6.2.

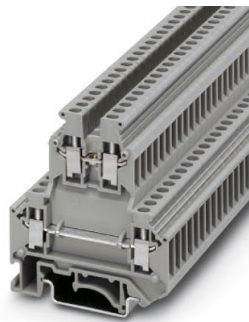


Figura 6.2: Bornera DIN

Para el montaje de las tarjetas se armó a base rieles DIN y fijaciones una estructura que

permita sostener las tarjetas y sus respectivas guías. El siguiente esquema muestra las dimensiones de los soportes confeccionados. Utilizando un total de 16 metros de riel DIN el resultado del soporte para las tarjetas es el siguiente.



Figura 6.3: Soporte construido para rack

Como se ve en la figura 6.3 el resultado de la manufacturación del soporte resulta satisfactoria, disminuyendo considerablemente el costo del montaje. A continuación se muestra el montaje de una celda de potencia en el soporte construído.

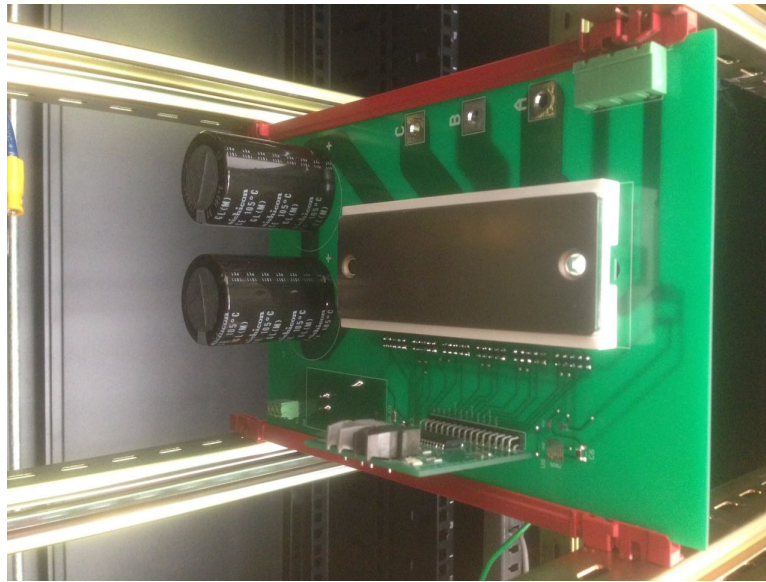


Figura 6.4: Vista lateral izquierda de montaje de celda en soporte construido sin disipador

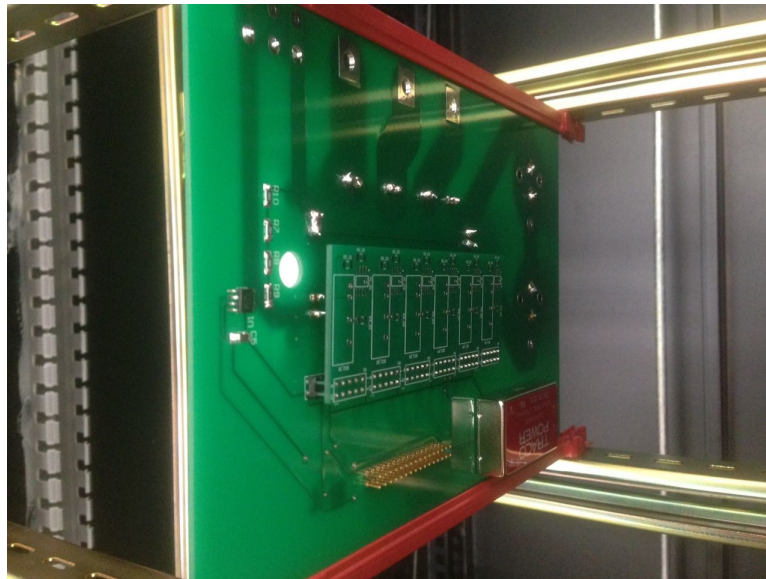


Figura 6.5: Vista lateral derecha de montaje de celda en soporte construido sin disipador

Se corrobora que la distancia dimensionada para el montaje de la celda con guías de PCB fue correcto, como se ve en la figura 5.4 y 5.5 la celda entra perfectamente en el espacio designado.

Finalmente la canalización es llevada a cabo con canaletas ranuradas de  $25 \times 25\text{cm}^2$ , la cual es pegada con silicona en las tapas del rack. Ambos cableados son por separado como se muestra en la figura 6.6.

Para finalizar se adjunta una tabla de elementos necesarios para llevar a cabo el montaje



Figura 6.6: Canalización para fibra y potencia

mecánico.

Descripción	Cantidad	Características
Riel DIN	18[m]	Montaje de soporte para tarjetas y borneras
Bornera DIN	22	Conexión eléctrica de convertidor
Guía de tarjeta 16[cm]	50	Guías para sostener las celdas
Canaleta ranurada de $25 \times 25 \text{cm}^2$	4[m]	Canalización para potencia y fibra óptica
Cable AWG 10	50[m]	Cableado convertidor, 5 colores
Enchufe trifásico hembra 32[A] volante 5 polos	1	Conexión trifásica
Enchufe trifásico macho 32[A] volante 5 polos	1	Conexión trifásica
Enchufe monofásico hembra 32[A] volante 3 polos	1	Conexión DC-LINK
Enchufe monofásico macho 32[A] volante 3 polos	1	Conexión DC-LINK

Tabla 6.2: Tabla Componentes

Descripción	Tamaño
Soporte para celdas de potencia	14[cm] × 48[cm]
Espacio entre soportes de celda de potencia	3[cm]
Espacio designado para ramas del convertidor	1[m] × 48[cm]
Espacio para cableado, fuentes DC auxiliares, contactor AC y DC	40[cm] × 48[cm]
dSpace	30[cm] × 48[cm]
Inductancias lado ac y de ramas	20[cm] × 48[cm]

Tabla 6.3: Descripciones de tamaños

# RESULTADOS, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 7.1. Resultados

Se diseña e implementa una celda de potencia para un convertidor MMC de forma modular, el cual opera en conjunto con un módulo de disparo y un módulo de comunicación por fibra óptica.

Se estudia los módulos con los que operará la celda de potencia, identificando funcionalidad, compatibilidad, criterios de espacio y coherencia en las señales.

Se dimensiona los niveles de potencia que manejará el convertidor en función de los módulos trifásicos disponibles.

Se diseñan los circuitos de la tarjeta, se hacen los planos esquemáticos y luego se desarrolla los planos impresos en el software Altium Designer. Se envía a manufacturar las tarjetas para el convertidor MMC finalizando con ello la primera etapa del proyecto.

Se evalúa tipos de montaje para el uso que se requiere en laboratorio.

Se arma el rack en el laboratorio, evaluando alternativas para la construcción del montaje. Se realiza mediciones sobre el rack adquirido, y se define la distribución del espacio disponible, luego se cotiza elementos fundamentales como lo son subracks, guías de PCB, rieles DIN, borneras, barras, canaletas, cables y enchufes, descartando ciertas opciones por temas de costos.

Se compra los elementos requeridos para el montaje del convertidor, visitando proveedores locales.

Se realiza el montaje, construyendo los soportes para las tarjetas del convertidor, luego se etiquetaron los cables para la conexión eléctrica y se define un código de colores para que usuarios entiendan la estructura del sistema y puedan manipularlo con facilidad.

Se realiza simulaciones para complementar el análisis del convertidor a diseñar, considerando componentes reales como el número de celdas, componentes pasivas y niveles de potencia.

Se cumple el objetivo principal de la memoria el cual era diseñar una celda modular para un MMC, considerando restricciones fundamentales e incluyendo elaborar un montaje del convertidor.

## 7.2. Conclusiones

El diseño modular del convertidor posee múltiples ventajas, dentro de ellas está la posibilidad de realizar mejoras del sistema cambiando cada módulo de forma independiente, detección y depuración de errores de forma práctica y sencilla y reutilización de módulos en otros proyectos. Un correcto montaje y uso de espacio disponible lograron un muy buen resultado, se obtiene un montaje distribuido y adecuado para una cómoda manipulación y trabajo sobre el convertidor.

A pesar de lo costoso de elementos como sub-racks, fue posible lograr resultados muy similares reduciendo drásticamente los costos.

## 7.3. Trabajos Futuros

Dentro de los trabajos futuros queda la implementación de la tarjeta de comunicación. Una vez llevado a cabo todo el hardware requerido por el sistema se deben llevar a cabo las pruebas experimentales del convertidor completo y depuración de errores.

Se debe realizar pruebas experimentales sobre la celda de potencia, verificando el funcionamiento a potencia nominal.

Incluir el uso de fusibles.

Se puede comprar protecciones para operar el convertidor a mayor potencia, ya que en estos momentos se utilizaron protecciones que alcanzan potencias por debajo de lo diseñado.



