

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:  
**Dr. José R. Espinoza C.**

Informe de Memoria de Título  
para optar al título de:  
**Ingeniero Civil Electrónico**

**Simulación en Tiempo Real de Topologías de  
Convertidores Estáticos para Paneles Solares Fotovoltaicos  
en el Equipo OPAL-RT<sup>®</sup>**

Concepción, Abril de 2018

Francisca Andrea Larenas Cabrera

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:  
Dr. José R. Espinoza C.

# Simulación en Tiempo Real de Topologías de Convertidores Estáticos para Paneles Solares Fotovoltaicos en el Equipo OPAL-RT®

Francisca Andrea Larenas Cabrera

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Abril 2018

## Resumen

En el marco de la ingeniería, la simulación de procesos juega un rol clave dentro de la formulación y ejecución de proyectos. Gracias a ésta es posible estudiar la lógica de control del sistema, conocer el comportamiento ante entradas y/o perturbaciones en el medio que puedan afectar y/o variar la respuesta del sistema. En las últimas décadas se han desarrollado diversos software de simulación de circuitos eléctricos y electrónicos tales como *PSIM*<sup>®</sup>, *Mathcad*<sup>®</sup>, *Matlab*<sup>®</sup>, *Tina*<sup>®</sup> entre otros, los cuales cuentan con una interfaz gráfica amable al usuario, una gran cantidad de recursos de biblioteca para la simulación de circuitos y una respuesta de simulación próxima, pero no real, al comportamiento en planta del sistema simulado. Sin embargo, esta última característica es la que hace que aumente el tiempo en el procesamiento de datos para la obtención en las respuestas del sistema y dependiendo de la complejidad del sistema a simular. Actualmente, el laboratorio LaSER del departamento de ingeniería eléctrica de la universidad de concepción cuenta con la infraestructura para llevar a cabo simulaciones en tiempo real de circuitos eléctricos y electrónicos mediante *RT – LAB*<sup>®</sup> e implementado en el equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup>. El software mediante el cual se realiza esta simulación es *Simulink*<sup>®</sup> el cual trabaja enlazado con *RT – LAB*<sup>®</sup>, finalmente los modelos son cargados al equipo mediante este último software. A pesar de la gran librería que presenta *Simulink*<sup>®</sup> esta carece de modelos orientados a simulaciones con topologías de convertidores estáticos de potencia y modelos de paneles solares fotovoltaicos. El presente trabajo tiene como objetivo ampliar la cantidad de librerías presentes en *Simulink*<sup>®</sup>, software mediante el cual se simulan los modelos a través de diagramas en bloques y posteriormente se enlaza con *RT – LAB*<sup>®</sup>, software del equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup>. Específicamente, se centra en el desarrollo de librerías de carácter *OpenSource* para topologías de convertidores estáticos de potencia y de paneles solares fotovoltaicos con el objetivo de posteriormente ser utilizadas en simulaciones en tiempo real el equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup>. A su vez estos modelos serán simulados en los software *PSIM*<sup>®</sup> y *Mathcad*<sup>®</sup> con el fin de contrastarlas con las simulaciones obtenidas en tiempo real y comprobar que tan precisas son sus respuestas con respecto al comportamiento real de los sistema. Dentro de los resultados de este trabajo se logra el desarrollo de librerías a modo de dejar una base sólida para simulaciones futuras en el estudio y desarrollo de sistemas de potencia. A su vez, la obtención de las curvas características de cada topología de convertidores estáticos y/o sistema que se quiera estudiar validara la confiabilidad en las respuestas del equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup>, haciendo de este una preferencia ante la implementación de un set-up experimental con los gastos y condiciones que esto implica.



“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”  
Filipenses 4:13.

## Agradecimientos

Agradezco antes que todo a Dios por guiar e iluminar mi camino hoy y siempre.

A mis padres por darme las herramientas, fortalezas y valores necesarios para enfrentar la vida. A mi madre Sonia Cabrera por su amor y paciencia incondicional, por su apoyo a la distancia y encomiendas de amor, a mi padre Eric Larenas por inculcarme el amor al estudio y guiarme en este hermoso mundo de la ingeniería desde pequeña. Me faltará vida para agradecerles todo lo que hacen por mí día a día, los amo mucho.

Agradecerle a mi abuela Mafalda por su amor incondicional y preocupación, sin ella los primeros años de universidad hubiesen sido más complicados. Jamás olvidaré esas ricas lentejitas, cazuelas que salvaban mis almuerzos, las sopaipillas calentitas con queso y miel que iba a dejarme en los días de lluvia o por esos infaltables chocolatitos en las largas noches de estudio. Sin lugar a dudas, Ud. es parte importante de este logro. A mi tío Roger por sus consejos y cariño, por esas chelitas de vez en cuando para arreglar el panorama.

Le agradezco a mi hermanita Monserratt simplemente por soportarme, sobre todo este último año mientras desarrollaba la MdeT, y por ser mi motivación para día a día ser un buen referente para ti.

Los amo mucho familia.

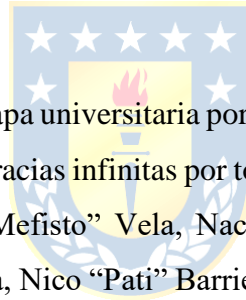
Un agradecimiento muy especial a mi abuelo Emilio Larenas por darme al mejor padre que pude tener quien me traspaso su perseverancia y amor a los estudios. Sin lugar a dudas sus cuadernos de la escuela naval fueron siempre una motivación para mí.

A los profesores del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Concepción les agradezco por la entrega de conocimientos y formación profesional, en especial a los profesores Miguel Figueroa, Lautaro Salazar, Mario Medina, Rogel Wallace, Eduardo Wiechmann, Juan Pablo Segovia y a la profesora Pamela Guevara. Le agradezco a mi profesor guía, José Espinoza, por su constante apoyo y guía en el desarrollo de este trabajo.

De igual forma agradezco al personal del departamento de ingeniería eléctrica, en especial a la Sra. Cecilia, Don Figue, Don Rubén y Don Alejandro por su buena disposición y siempre ayudarme cada vez que iba a la oficina o pedía un componente en pañol. Gracias también a Don Pato y Don Isaac Romero por siempre saludarnos con una sonrisa y por darnos animo a mí y mis compañeros cuando nos encontrábamos en la madrugada trabajando en el laboratorio de control.

Sumo en los agradecimientos a mi profesor del colegio, Ibar Cortes por creer en mi cuando nadie en ese colegio lo hacía e impulsarme a seguir adelante, por sus historias de vida que nos sacaban de la presión de la P.S.U y enseñarnos que la vida no era solo estudio y sacar un buen puntaje. Simplemente gracias.

Gracias a Inés Lillo, quien más que nuestra secretaria de carrera fue una amiga en estos largos años de carrera. Tus consejos siempre certeros y el cariño es algo que jamás se olvidará y espero seguir manteniendo el contacto.



Le agradezco a la vida y a esta etapa universitaria por darme la oportunidad de conocer grandes personas y llevarme lindas amistades. Gracias infinitas por todas las vivencias y anécdotas, que espero sean muchos más, a RERS, Pablito “Mefisto” Vela, Nacho Urbina, Dani “Locura”, Nico Moya, Andrés Navarro, Nachi “Turro” Quiroga, Nico “Pati” Barrientos, Pauli, Jorge Ávila, Pollo, Gigante e Ingrid. Gracias especialmente a Omar Quilodrán por siempre estar dispuesto a ayudarme cuando Mathcad no funcionaba en mi computador y asesorarme en comentarios para la MdeT. Son lo mejor y los quiero un montón. Especial agradecimiento a mi amiga Tepa Hoffman, que Alá nos siga amparando y cuidando en todas nuestras #FranYTepiCosas, cuantas anécdotas ea, ea. Mención especial a mi gatito Bes por su compañía y ronroneos los últimos meses de la MdeT que sin lugar a duda son los más estresantes.

Agradezco a Marcos Gonzales por su asesoría y ayuda en el uso del equipo OPAL – RT<sup>®</sup> y a mis compañeros del LCDA por la buena onda y siempre estar dispuestos a ayudar en dudas de simulación.

Finalmente, este trabajo fue posible gracias a la ayuda del Gobierno de Chile bajo los proyectos CONICYT/ FONDEQUIP/ EQM140148, CONICYT/ FONDECYT/ 1181839, CONICYT/ FONDECYT/ 1160969, CONICYT/ FONDAP / 15110019 y Newton Picarte Project EPSRC: EP/ N004043/ 1: New Configurations of Power Converters for Grid Interconnection Systems/ CONICYT DPI 20140007.



# Tabla de Contenidos

<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>XVI</b>
<b>ABREVIACIONES.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>20</b>
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	20
1.2. TRABAJOS PREVIOS .....	21
1.2.1 Simulaciones de Modelos de Paneles Solares Fotovoltaicos .....	21
1.2.2 Implementación y Uso del Equipo OPAL-RT®.....	22
1.2.3 Memorias de Título.....	23
1.2.4 Uso y Programación en el Equipo OPAL-RT®.....	24
1.2.5 Convertidores Estáticos de Potencia.....	24
1.2.6 Discusión .....	25
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	25
1.4. OBJETIVOS .....	26
1.4.1 Objetivo General .....	26
1.4.2 Objetivos Específicos.....	26
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	26
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA .....	27
<b>CAPÍTULO 2. EQUIPO OPAL-RT® Y SU ENTORNO EN EL SOFTWARE RT-LAB®.....</b>	<b>28</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	28
2.2. SIMULACIONES EN TIEMPO REAL.....	28
2.2.1 ¿Qué es una Simulación de Procesos? .....	28
2.2.2 Introducción a la Simulación en Tiempo Real y en Diversas Plataformas.....	29
2.3. SOFTWARE RT-LAB®.....	31
<b>CAPÍTULO 3. MODELOS MATEMÁTICOS DE LAS TOPOLOGÍAS EN ESTUDIO .....</b>	<b>36</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	36
3.2. MODELOS MATEMÁTICOS DE LAS TOPOLOGÍAS DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	37
3.2.1 Modelo Panel Solar Fotovoltaico Single Model Diode .....	37
3.2.2 Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico.....	41
3.3. MODELOS MATEMÁTICOS DE LAS TOPOLOGÍAS PARA CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA .....	46
3.3.1 Topologías Monofásicas de Convertidores Estáticos de Potencia .....	49
3.3.2 Topologías Trifásicas de Convertidores Estáticos de Potencia .....	54
3.3.3 Topologías Multiniveles de Convertidores Estáticos de Potencia.....	59
C. Convertidor multinivel del tipo NPC.....	62
D. Técnicas de modulación para convertidores multiniveles .....	64
D..1 Modulación SPWM.....	65
<b>CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LIBRERÍAS EN SIMULINK® PARA EL EQUIPO OPAL-RT®.....</b>	<b>68</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	68
4.2. COMO CREAR Y AGREGAR UNA BIBLIOTECA AL EXPLORADOR DE BIBLIOTECAS DE SIMULINK®.....	68
4.3. DESARROLLO DE LIBRERÍAS PARA TOPOLOGÍAS DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	69
4.3.1 Introducción.....	69
4.3.2 Librería para la Topologías Simplificada del Panel Solar Fotovoltaico .....	70
4.4. DESARROLLO DE LIBRERÍAS PARA TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA.....	71
4.4.1 Introducción.....	71
4.4.2 Librería Modulación SPWM.....	72
4.4.3 Librerías Topologías Convertidores Estáticos .....	78



<b>CAPÍTULO 5. SIMULACIONES UTILIZANDO LAS LIBRERÍAS DESARROLLADAS EN SIMULINK® PARA EL EQUIPO OPAL-RT® .....</b>	<b>86</b>
5.1. INTRODUCCIÓN .....	86
5.2. SIMULACIONES EN PSIM®, MATHCAD® Y SIMULINK® .....	86
5.2.1 <i>Modelo Simplificado del Panel Solar Fotovoltaico</i> .....	87
5.2.2 <i>Convertidores Estáticos de Potencia Monofásicos</i> .....	88
5.2.3 <i>Convertidores Estáticos de Potencia Trifásico</i> .....	105
5.2.4 <i>Convertidores Estáticos de Potencia Multiniveles</i> .....	117
<b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN EL EQUIPO OPAL-RT®.....</b>	<b>120</b>
6.1. INTRODUCCIÓN .....	120
6.2. MODELO SIMPLIFICADO DEL PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO .....	120
6.3. CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA MONOFÁSICOS .....	121
6.3.1 <i>IVM</i> .....	121
6.3.2 <i>RVM</i> .....	123
6.3.3 <i>ICM</i> .....	125
6.3.4 <i>RCM</i> .....	126
6.4. CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA TRIFÁSICOS .....	128
6.4.1 <i>IVT</i> .....	128
6.4.2 <i>RVT</i> .....	130
6.4.3 <i>ICT</i> .....	131
6.4.4 <i>RCT</i> .....	132
6.5. CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA MULTINIVELES .....	134
6.5.1 <i>Inversor Trifásico NPC de tres niveles</i> .....	134
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>137</b>
7.1. SUMARIO .....	137
7.2. CONCLUSIONES .....	138
7.3. TRABAJOS FUTUROS .....	138
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>139</b>
<b>ANEXO A. DATASHEET.....</b>	<b>140</b>
A.1. DATASHEET PANEL SOLAR FVG 60-156 .....	140
<b>ANEXO B. CÓDIGOS EN SOFTWARES SIMULADORES.....</b>	<b>142</b>
B.1. CÓDIGO MATHCAD® MODELOS PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS .....	142
B.2. CÓDIGO PARA AGREGAR UNA LIBRERÍA A SIMULINK® .....	144
B.3. AGREGAR LIBRERÍA AUTOMÁTICAMENTE A SIMULINK® .....	144
<b>ANEXO C. ECUACIONES TOPOLOGÍAS CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA.....</b>	<b>145</b>
C.1. <i>IVM</i> .....	145
C.2. <i>ICM</i> .....	145
C.3. <i>RCM</i> .....	146
C.4. <i>IVT</i> .....	147
C.5. <i>ICT</i> .....	147
<b>ANEXO D. SIMULACIONES EN PSIM®.....</b>	<b>149</b>
D.1. <i>IVM</i> .....	149
D.2. <i>RVM</i> .....	149
D.3. <i>ICM</i> .....	150
D.4. <i>RCM</i> .....	150
D.5. <i>IVT</i> .....	151
D.6. <i>RVT</i> .....	151
D.7. <i>ICT</i> .....	152
D.8. <i>RCT</i> .....	152
D.9. <i>NPC TRIFÁSICO TRES NIVELES</i> .....	153

<b>ANEXO E. PROGRAMACIÓN BLOQUES C DE PSIM® .....</b>	<b>154</b>
E.1. PROGRAMACIÓN BLOQUE C DE PSIM® PARA UN CONVERTIDOR MONOFÁSICO.....	154
E.2. PROGRAMACIÓN BLOQUE C DE PSIM® PARA UN CONVERTIDOR TRIFÁSICO. ....	154



## Lista de Tablas

Tabla 3.1 – Parámetros Modelo Panel Solar Fotovoltaico.....	39
Tabla 3.2 – Parámetros Modulación SPWM para Convertidor IVM.....	50
Tabla 3.3 – Parámetros Modulación SPWM para Convertidor RVM .....	51
Tabla 3.4 – Parámetros Modulación SPWM para Convertidor ICM.....	52
Tabla 3.5 – Parámetros Modulación SPWM para Convertidor IVT.....	55
Tabla 3.6 – Parámetros Modulación SPWM para Convertidor ICT .....	58
Tabla 3.7 – Características de las Topologías Multiniveles Básicas.....	62
Tabla 5.1 – Parámetros Componentes en el Circuito del IVM .....	88
Tabla 5.2 – Parámetros Componentes en el Circuito del RVM.....	93
Tabla 5.3 – Parámetros Componentes en el Circuito del ICM.....	97
Tabla 5.4 – Parámetros Componentes en el Circuito del RCM .....	101
Tabla 5.5 – Parámetros Componentes en el Circuito del IVT .....	105
Tabla 5.6 – Parámetros Componentes en el Circuito del RVT .....	109
Tabla 5.7 – Parámetros Componentes en el Circuito del ICT.....	111
Tabla 5.8 – Parámetros Componentes en el Circuito del RCT .....	114
Tabla 6.1 – Valores de ganancia simulación Modelo simplificado panel solar .....	121
Tabla 6.2 – Valores de ganancia simulación IVM .....	122
Tabla 6.3 – Valores de ganancia simulación RVM.....	124
Tabla 6.4 – Valores de ganancia simulación ICM .....	125
Tabla 6.5 – Valores de ganancia simulación RCM.....	126
Tabla 6.6 – Valores de ganancia simulación IVT .....	128
Tabla 6.7 – Valores de ganancia simulación RVT.....	130
Tabla 6.8 – Valores de ganancia simulación ICT .....	131
Tabla 6.9 – Valores de ganancia simulación RCT .....	133
Tabla 6.10 – Valores de ganancia simulación NPC .....	134

## Lista de Figuras

Fig. 2.1 – Gráfico Comparativo de la Evolución en el Desarrollo de Software de Simulación.....	29
Fig. 2.2 – Evolución en el Desarrollo de Software de Simulación a lo Largo de las Décadas .....	29
Fig. 2.3 – Pasos para Llevar a Cabo una Simulación .....	30
Fig. 2.4 – Diagrama de los Beneficios de Simular en Tiempo Real .....	31
Fig. 2.5 – Set-up para Llevar a Cabo una Simulación en el Equipo OPAL – RT®.....	31
Fig. 2.6 – Subsistemas en Simulink® .....	32
Fig. 2.7 – Comunicación entre Subsistemas GUI y Computacionales en Simulink® .....	33
Fig. 2.8 – Set-up Host PC y Real Time Target del equipo OPAL – RT®.....	33
Fig. 2.9 – Configuraciones Posibles en Simulink® para Simular en el Equipo OPAL – RT®.....	34
Fig. 2.10 – Bloque OpComm en la Librería RT – LAB® de la Librería Simulink®.....	35
Fig. 3.1 – Modelo Circuitual SMD Equivalente al de una Celda del Panel Solar Fotovoltaico .....	37
Fig. 3.2 – Potencia Modelo SMD a Temperatura Constante e Irradiancia Variable.....	40
Fig. 3.3 – Corriente v/s Voltaje Modelo SMD a Temperatura Constante e Irradiancia Variable.....	40
Fig. 3.4 – Potencia Modelo SMD a Temperatura Variable e Irradiancia Constante.....	41
Fig. 3.5 – Corriente v/s Voltaje Modelo SMD a Temperatura Variable e Irradiancia Constante.....	41
Fig. 3.6 – Potencia Modelo Simplificado a Temperatura Ambiente e Irradiancia $S = 1000W/m^2$ ..	44
Fig. 3.7 – Corriente v/s Voltaje Modelo Simplificado a Temperatura Ambiente e Irradiancia $S = 1000W/m^2$ .....	45
Fig. 3.8 – Potencias Modelos Simplificado y SMD del panel solar a Temperatura ambiente e Irradiancia $S = 1000W/m^2$ .....	45
Fig. 3.9 – Corrientes v/s Voltaje Modelos Simplificado y SMD del panel solar a Temperatura ambiente e Irradiancia $S = 1000W/m^2$ .....	46
Fig. 3.10 – Representación Circuitual Modelo IVM.....	49
Fig. 3.11 – Representación circuitual modelo RVM.....	52
Fig. 3.12 – Representación Circuitual Modelo ICM.....	53
Fig. 3.13 – Representación Circuitual Modelo RCM.....	54
Fig. 3.14 – Representación Circuitual Modelo IVT.....	56
Fig. 3.15 – Representación Circuitual Modelo RVT .....	57
Fig. 3.16 – Representación Circuitual Modelo ICT .....	57
Fig. 3.17 – Representación circuitual modelo RCT .....	59
Fig. 3.18 – Estructura de un inversor multinivel generalizado .....	60
Fig. 3.19 – Topología de los convertidores multiniveles .....	61
Fig. 3.20 – Estrategias de Conmutación para Topologías de Convertidores Estáticos multiniveles .	64
Fig. 3.21 – Estrategias de modulación SPWM.....	65
Fig. 3.22 – Tipo 1: Portadoras Alternadas en Contrafase para un Inversor de Cinco Niveles.....	66
Fig. 3.23 – Tipo 2: Portadora con Simetría Respecto al Eje Horizontal para Inversor de Cinco Niveles.....	66
Fig. 3.24 – Tipo 3: Todas las Portadoras en Fase para Inversor de Cinco Niveles.....	66
Fig. 3.25 – Topología de los Convertidores Multiniveles.....	67
Fig. 4.1 – Barra de inicio de Matlab®.....	68
Fig. 4.2 – Ventana de Simulink® en el Library Browser.....	68
Fig. 4.3 – Archivo en Blanco para Comenzar a Crear una Librería en Simulink® .....	69
Fig. 4.4 – Librería Simulink® Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico .....	70
Fig. 4.5 – Bloque de Librería en Simulink® para Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico .	70

Fig. 4.6 – Estructura Interna del Bloque de Librería del Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico.....	71
Fig. 4.7 – Diagrama organizacional librería Convertidores Estáticos en Simulink® .....	72
Fig. 4.8 – Librería Conmutación de Convertidores Estáticos .....	73
Fig. 4.9 – Estructura Interna Bloques Librería Conmutación Convertidor Fuente de Corriente Monofásico.....	74
Fig. 4.10 – Estructura Interna Bloques Librería Conmutación Convertidor Fuente de Voltaje Monofásico.....	74
Fig. 4.11 – Estructura Interna Bloques Librería Conmutación Convertidor Fuente de Voltaje Trifásico .....	74
Fig. 4.12 – Estructura Interna Bloques Librería Conmutación Convertidor Fuente de Corriente Trifásico .....	75
Fig. 4.13 – Librería Funciones de Conmutación.....	75
Fig. 4.14 – Estructura interna bloques librería Función de conmutación convertidor fuente de corriente monofásico .....	76
Fig. 4.15 – Estructura Interna Bloques Librería Función de Conmutación Convertidor Fuente de Voltaje Monofásico .....	76
Fig. 4.16 – Estructura Interna Bloques Librería Función de Conmutación Convertidor Fuente de Corriente Trifásico .....	76
Fig. 4.17 – Estructura Interna Bloques Librería Función de Conmutación Convertidor Fuente de Voltaje Trifásico.....	76
Fig. 4.18 – Bloques Librería Modulación SPWM .....	77
Fig. 4.19 – Estructura Interna Bloques Librería Modulación SPWM, Moduladora Sinusoidal .....	77
Fig. 4.20 – Estructura Interna Bloques Librería Modulación SPWM, Señal Triangular .....	77
Fig. 4.21 – Librería Topología Monofásica de Convertidores Estáticos .....	79
Fig. 4.22 - Bloques librería Convertidores Estáticos, Inversor Fuente de Corriente Monofásico .....	79
Fig. 4.23 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Rectificador de Corriente Monofásico .....	80
Fig. 4.24 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Inversor Fuente de Voltaje Monofásico .....	80
Fig. 4.25 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Rectificador Fuente de Voltaje Monofásico .....	81
Fig. 4.26 - Librería Topología Trifásica de Convertidores Estáticos.....	82
Fig. 4.27 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Inversor Fuente de Corriente Trifásico.....	82
Fig. 4.28 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Rectificador Fuente de Corriente Trifásico .....	83
Fig. 4.29 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Inversor Fuente de Voltaje Trifásico .....	83
Fig. 4.30 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Rectificador Fuente de Voltaje Trifásico .....	84
Fig. 4.31 – Librería Topología NPC Convertidor Multinivel .....	84
Fig. 4.32 - Bloques Librería Modulación SPWM Convertidores Estáticos Topología NPC Trifásico Tres Niveles.....	85
Fig. 4.33 - Bloques Librería Celda Básica Convertidores Estáticos Topología NPC .....	85
Fig. 5.1 – Curva de Corriente v/s Voltaje del Panel Solar FVG 60-156 Simulación RT – LAB® ...	87
Fig. 5.2 – Curva de Potencia del Panel Solar FVG 60-156 Simulación RT – LAB® .....	87
Fig. 5.3 – Modulación SPWM del IVM en PSIM®.....	89
Fig. 5.4 – Formas de onda en S.S en el IVM en PSIM® .....	90
Fig. 5.5 – FFT y THD en el IVM en PSIM® .....	91
Fig. 5.6 – Modulación SPWM del IVM en Simulink® .....	92
Fig. 5.7 – Formas de onda en S.S en el IVM en Simulink®.....	92
Fig. 5.8 – FFT y THD en el IVM en Simulink®.....	93
Fig. 5.9 – Modulación SPWM del RVM en PSIM® .....	94

Fig. 5.10 – Formas de onda en S.S en el RVM en PSIM® .....	94
Fig. 5.11 – FFT y THD en el RVM en PSIM® .....	95
Fig. 5.12 – Modulación SPWM del RVM en Simulink® .....	96
Fig. 5.13 – Formas de onda en S.S en el RVM en Simulink®, .....	96
Fig. 5.14 – FFT y THD voltaje $V_r(T)$ en el RVM en Simulink® .....	97
Fig. 5.15 – Modulación SPWM del ICM en PSIM® .....	98
Fig. 5.16 – Formas de onda en S.S en el ICM en PSIM® .....	98
Fig. 5.17 – FFT y THD en el ICM en PSIM® .....	99
Fig. 5.18 – Modulación SPWM en el ICM en Simulink® .....	100
Fig. 5.19 – Formas de onda en S.S en el ICM en Simulink® .....	100
Fig. 5.20 – FFT y THD Corriente $I_{ab}$ en el ICM en Simulink® .....	101
Fig. 5.21 – Modulación SPWM del RCM en PSIM® .....	102
Fig. 5.22 – Formas de onda en S.S en el RCM en PSIM® .....	102
Fig. 5.23 – FFT y THS en el RCM en PSIM® .....	103
Fig. 5.24 – Modulación SPWM del RCM en Simulink® .....	103
Fig. 5.25 – Formas de onda en S.S en el RCM en Simulink® .....	104
Fig. 5.26 – FFT y THD de la corriente $I_r(t)$ del RCM en <i>Simulink®</i> .....	104
Fig. 5.27 – Modulación SPWM en el IVT en PSIM® .....	106
Fig. 5.28 – Formas de onda en S.S el IVT en PSIM® .....	106
Fig. 5.29 – FFT y THD en el IVT en PSIM® .....	107
Fig. 5.30 – Modulación SPWM en el IVT en Simulink® .....	107
Fig. 5.31 – Formas de onda en S.S del IVT en Simulink® .....	108
Fig. 5.32 – FFT y THD en el IVT en Simulink® .....	108
Fig. 5.33 – Formas de onda en S.S en el RVT en PSIM® .....	109
Fig. 5.34 – FFT y THD en el RVT en PSIM® .....	109
Fig. 5.35 – Formas de onda en S.S en el RVT en Simulink® .....	110
Fig. 5.36 – FFT y THD Voltaje $V_{ran}$ en el RVT en Simulink® .....	110
Fig. 5.37 – Modulación SPWM del ICT en PSIM® .....	111
Fig. 5.38 – Formas de onda en S.S en el ICT en PSIM® .....	112
Fig. 5.39 – FFT y THD en el ICT en PSIM® .....	112
Fig. 5.40 – Modulación SPWM ICT en Simulink® .....	113
Fig. 5.41 – Formas de onda en S.S en el ICT en Simulink® .....	113
Fig. 5.42 – FFT Y THD en el ICT en Simulink® .....	114
Fig. 5.43 – Formas de onda en S.S en el RCT en PSIM® .....	115
Fig. 5.44 – FFT y THD Corriente $I_{ra}$ en el RCT en PSIM® .....	115
Fig. 5.45 – Formas de onda en S.S en el RCT en Simulink® .....	116
Fig. 5.46 – FFT y THD Corriente $I_{ra}$ en RCT en Simulink® .....	116
Fig. 5.47 – Sub-circuito celda básica convertidor NPC en PSIM® .....	117
Fig. 5.48 – Modulación SPWM y Formas de onda del Inversor NPC trifásico de tres niveles en PSIM® .....	118
Fig. 5.49 – FFT y THD Voltaje $V_{abt}$ del Inversor NPC trifásico tres niveles en PSIM® .....	119
Fig. 5.50 – Modulación SPWM y curvas características del Inversor NPC trifásico de tres niveles en Simulink® .....	119
Fig. 5.51 – Forma de onda $V_{ab}$ y su respuesta en frecuencia del Inversor NPC trifásico tres niveles en Simulink® .....	119
Fig. 6.1 – Simulación en Simulink® del Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico para el equipo OPAL – RT® .....	120



Fig. 6.2 – Curvas Modelo Simplificado Panel Solar FVG 60-156 OPAL – RT® .....	121
Fig. 6.3 – Simulación en Simulink® del IVM para el equipo OPAL – RT® .....	122
Fig. 6.4 – Modulación IVM en OPAL – RT® .....	123
Fig. 6.5 – Formas de onda del IVM en la OPAL – RT® .....	123
Fig. 6.6 – Simulación en <i>Simulink</i> ® del RVM para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM_RVM .....	124
Fig. 6.7 – Modulación RVM en OPAL – RT® .....	124
Fig. 6.8 – Formas de onda del RVM en la OPAL – RT® .....	125
Fig. 6.9 – Simulación en <i>Simulink</i> ® del ICM para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM_ICM .....	125
Fig. 6.10 – Modulación ICM en OPAL – RT® .....	126
Fig. 6.11 – Formas de onda del ICM en la OPAL – RT® .....	126
Fig. 6.12 – Simulación en <i>Simulink</i> ® del RCM para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM_RCM .....	127
Fig. 6.13 – Modulación RCM en OPAL – RT® .....	127
Fig. 6.14 – Formas de onda del RCM en la OPAL – RT® .....	127
Fig. 6.15 – Simulación en <i>Simulink</i> ® del IVT para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SC_GUI .....	128
Fig. 6.16 – Simulación en <i>Simulink</i> ® del IVT para el equipo OPAL – RT® .....	129
Fig. 6.17 – Modulación IVT en OPAL – RT® .....	129
Fig. 6.18 – Formas de onda del IVT en la OPAL – RT® .....	130
Fig. 6.19 – Simulación en <i>Simulink</i> ® del RVT para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM_RVT .....	130
Fig. 6.20 – Formas de onda del RVT en la OPAL – RT® .....	131
Fig. 6.21 – Simulación en Simulink® del ICT para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM_ICT .....	131
Fig. 6.22 – Modulación ICT en OPAL – RT® .....	132
Fig. 6.23 – Formas de onda del ICT en la OPAL – RT® .....	132
Fig. 6.24 – Simulación en <i>Simulink</i> ® del RCT para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM_RCT .....	133
Fig. 6.25 – Formas de onda del RCT en la OPAL – RT® .....	133
Fig. 6.26 – Simulación en <i>Simulink</i> ® del IVM para el equipo OPAL – RT® .....	135
Fig. 6.27 – Modulación SPWM del Inversor NPC trifásico tres niveles en la OPAL – RT® .....	135
Fig. 6.28 – Formas de onda del Inversor NPC trifásico tres niveles en la OPAL – RT® .....	135
Fig. 6.29 – Formas de onda del Inversor NPC trifásico tres niveles en la OPAL – RT® .....	136
Fig. B.1 – Modificación archivo <i>startup.m</i> .....	144
Fig. D.1 – Simulación en PSIM® del IVM .....	149
Fig. D.2 – Simulación en PSIM® del RVM .....	149
Fig. D.3 – Simulación en PSIM® del ICM .....	150
Fig. D.4 – Simulación en PSIM® del RCM .....	150
Fig. D.5 – Simulación en PSIM® del IVT .....	151
Fig. D.6 – Simulación en PSIM® del RVT .....	151
Fig. D.7 – Simulación en PSIM® del ICT .....	152
Fig. D.8 – Simulación en PSIM® del RCT .....	152
Fig. D.9 – Simulación en PSIM® del NPC trifásico tres niveles .....	153
Fig. E.1 – Programación del Bloque C en PSIM® para convertidor monofásico .....	154
Fig. E.2 – Programación del Bloque C en <i>PSIM</i> ® para convertidor trifásico .....	155

# Nomenclatura

## Matrices

$V_s^{abc}(t)$  : Matriz del voltaje trifásico  $V_s$

## Escalares

$m_a(t)$  : Moduladora fase a en función del tiempo  
 $tri(t)$  : Triangular en función del tiempo  
 $S_1(t)$  : Switch pierna 1 convertidor estático  
 $S_2(t)$  : Switch pierna 2 convertidor estático  
 $S_3(t)$  : Switch pierna 3 convertidor estático  
 $S_4(t)$  : Switch pierna 4 convertidor estático  
 $S_5(t)$  : Switch pierna 5 convertidor estático  
 $S_6(t)$  : Switch pierna 6 convertidor estático  
 $S_{ab}(t)$  : Función de conmutación convertidor estático  
 $S_{bc}(t)$  : Función de conmutación convertidor estático  
 $S_{ca}(t)$  : Función de conmutación convertidor estático  
 $V_{an}(t)$  : Voltaje fase a con respecto al neutro  
 $V_{bn}(t)$  : Voltaje fase b con respecto al neutro  
 $V_{cn}(t)$  : Voltaje fase c con respecto al neutro  
 $V_{ab}(t)$  : Voltaje entre líneas a la salida de un inversor  
 $V_{dc}(t)$  : Voltaje continuo  
 $V_r(t)$  : Voltaje a la entrada de un rectificador  
 $I_{ab}(t)$  : Corriente a la salida de un inversor monofásico  
 $I_{dc}(t)$  : Corriente continua  
 $I_r(t)$  : Corriente a la entrada de un rectificador  
 $M$  : Magnitud de la moduladora  
 $\omega_s$  : Frecuencia angular  
 $f$  : Frecuencia de la red  
 $f_M$  : Frecuencia de la moduladora  
 $f_{n_{tr}}$  : Frecuencia de la triangular  
 $i_{pv_{simp}}(t)$  : Corriente de salida Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico  
 $V_{PV}(t)$  : Voltaje de salida Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico  
 $i_{Ph}(t)$  : Corriente Panel Solar Fotovoltaico  
 $i_{R_{sh}}(t)$  : Corriente resistencia Shunt Modelo SMD Panel Solar Fotovoltaico  
 $i_D(t)$  : Corriente en el Diodo Modelo SMD Panel Solar Fotovoltaico  
 $i_o(t)$  : Corriente saturación inversa del diodo Modelo SMD Panel Solar Fotovoltaico  
 $R_s(t)$  : Resistencias por pérdidas internas Modelo SMD Panel Solar Fotovoltaico  
 $R_{sh}(t)$  : Resistencias por pérdidas corrientes de fuga Modelo SMD Panel Solar Fotovoltaico  
 $V_D(t)$  : Voltaje del diodo Modelo SMD Panel Solar Fotovoltaico  
 $A$  : Factor de idealidad en [14]  
 $q$  : Carga del electrón  
 $T$  : Temperatura en grados Kelvin  
 $k$  : Constante de Boltzmann



$S$	: Irradiancia
$n$	: Factor de idealidad en [3]
$V_{Tc}(t)$	: Constante de agrupación Modelo simplificado Panel Solar Fotovoltaico
$i_{sc}(t)$	: Corriente corto circuito Modelo simplificado Panel Solar Fotovoltaico
$V_{oc}(t)$	: Voltaje circuito abierto Modelo simplificado Panel Solar Fotovoltaico
$N_{sc}(t)$	: Arreglo número de celdas en serie de un panel Solar



# Abreviaciones

## Mayúsculas

SRT	: Sistema de tiempo real
PC	: Personal Computer
FPGA	: Field Programmable Gate Array
HIL	: Hardware In the Loop
RPC	: Rapid Prototyping Control
I+D	: Investigación y Diseño
SMD	: Single Model Diode
MPC	: Modelo de Control Predictivo
PHIL	: Power Hardware in the Loop
LCL	: Arreglo Inductor-Condensador-Inductor
L.A	: Lazo Abierto
L.C	: Lazo Cerrado
NPC	: Neutral Point Clamped
COTS	: Commercial off-the shelf
CPU	: Central Processing Unit
GUI	: Graphical User Interface
TCP	: Transmission Control Protocol
IP	: Internet Protocol
LCK	: Ley de Corriente de Kirchhoff
LVK	: Ley de Voltaje de Kirchhoff
FC	: Flying Capacitor
CHB	: Cascaded H-Bridge
IVM	: Inversor de voltaje monofásico
RVM	: Rectificador de voltaje monofásico
ICM	: Inversor de corriente monofásico
RCM	: Rectificador de corriente monofásico
IVT	: Inversor de voltaje trifásico
RVT	: Rectificador de voltaje trifásico
ICT	: Inversor de corriente trifásico
RCT	: Rectificador de corriente trifásico
THD	: Total Harmonic Distortion
FFT	: Fast Fourier Transform
PV	: Photovoltaics
SPWM	: Sinusoidal Pulse Width Modulation
LCDA	: Laboratorio de control digital aplicado
GUI	: Graphical User Interface
RLC	: Carga Resistiva, inductiva y capacitiva
S.S	: Steady State
LaSER	: Laboratorio de sistemas y energías renovables
MPPT	: Maximun Power Point Tracking



## Minúsculas

a.c : alternating current.  
d.c : direct current.

.



# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1. Introducción General

El tema abordado en esta memoria de título se centra en el desarrollo de librerías *Open Source* de propósito general para topología de convertidores estáticos en plantas de generación eléctrica basadas en paneles solares fotovoltaicos. Dichas librerías servirán de base para generar una biblioteca en Simulink® la cual contara con bloques básicos destinados para simulaciones en tiempo real de sistemas más complejos las que se llevarán a cabo en el equipo OPAL – RT®.

Un sistema de control en tiempo real debe tener un estricto cumplimiento de tiempos o plazos de respuestas- el tiempo de respuesta del sistema se define como aquel periodo de tiempo que transcurre entre la entrada de un dato y la obtención de una salida. Por otra parte, las tareas son la unidad de cómputo a ser planificadas y ejecutadas, el tiempo de respuesta está definido por su aplicación. Un SRT maneja variables de procesos externos, es decir, entradas y salidas; a la vez el sistema debe resolver distintos problemas haciendo uso del paralelismo (conurrencia) y también responder de manera predecible a estímulos externos impredecibles. Una de las condiciones para hablar de tiempo real es limitar este parámetro a un valor máximo permitido evitando un retardo en la respuesta del sistema, o incluso imponer que el tiempo de respuesta sea constante en todo momento.

OPAL – RT® technologies es un líder a nivel mundial en el desarrollo de simuladores en tiempo real basados en PC/FPGA, equipos de pruebas HIL y sistemas de RPC para diseñar, probar y optimiza el control y la protección de sistemas utilizado en redes eléctricas, electrónica de potencia y diversas industrias, así como en centros de I+D y universidades. En el área de la electrónica ha desarrollado una amplia investigación durante casi 20 años ofreciendo la más rápida y precisa simulación en tiempo real.

El desarrollo de librerías para la OPAL – RT® nace a partir de la necesidad de modelos bases para topologías de convertidores estáticos de potencia y de paneles solares fotovoltaicos para futuras simulaciones de sistemas más complejos. Se abordarán desde topologías monofásicas hasta multiniveles.

## 1.2. Trabajos Previos

Los SRT son tradicionalmente diseñados en base al desarrollo de modelos para las plantas, haciendo uso de la teoría de control, que será controlada bajo criterios de diseños de control y sus respectivas pruebas en una simulación. Por otra parte, la teoría de sistemas en tiempo real desarrolla un algoritmo de control para implementar, y configurar el sistema en tiempo real, por medio de la asignación de prioridades, restricciones, periodos, entre otros.

La revisión bibliográfica está centrada en SRT, principalmente trabajos realizados en el entorno de OPAL – RT<sup>®</sup>; se complementa con la revisión y estudio de los manuales del equipo para llevar a cabo las futuras simulaciones.

Una revisión importante es la documentación acerca de los modelos a trabajar y su posterior elaboración de librerías. Esta búsqueda se centrará principalmente en documentación sobre convertidores estáticos, desde topologías monofásicas hasta multiniveles, y modelos para paneles solares fotovoltaicos. Se buscará apoyo en las tesis realizadas con anterioridad sobre los temas de simulaciones con el equipo OPAL – RT<sup>®</sup> y trabajos con modelos de paneles solares fotovoltaicos.

### 1.2.1 Simulaciones de Modelos de Paneles Solares Fotovoltaicos

- ♣ E. Rodrigues, R. Melício, V. Mendes, J. Catalao. “Simulation of a Solar Cell considering Single-Diode Equivalent Circuit Model”, *RE&PQJ*, vol. 1, no. 9, May 2011.

El desarrollo de este trabajo se centra en la tecnología de los paneles solares fotovoltaicos con celdas mono-diodos. Se lleva a cabo una serie de simulaciones con el fin de evaluar la dependencia de la variación de irradiación, el factor de idealidad del diodo y la influencia de las resistencias en el modelo. Se realiza una comparación entre el modelo ideal de una celda solar diodo simple y un modelo de celda solar con resistencias en serie (SMD). Finalmente se presenta una serie de conclusiones a partir de los gráficos obtenidos mediante simulación. La revisión bibliográfica de este paper servirá de guía para los parámetros de variación de temperatura e irradiancia en las simulaciones presentes en este trabajo, así como también el estudio de la teoría del modelo SMD.

- ♣ J. Aller, J. Viola, F. Quizhpi, J. Restrepo, A. Ginart and A Salazar. “Explicit model of PV cells considering variations in temperature and solar irradiance”, *2016 IEEE ANDESCON, Arequipa, 2016, pp.1-4.*

En este trabajo se presenta un modelo directo y otro aproximado de una celda fotovoltaica considerando las variaciones en la temperatura ambiente y la irradiación. El método se basa en el modelo SMD, los parámetros entregados por el *datasheet* del panel solar fotovoltaico en conjunto con el uso de series de Taylor de primer y segundo orden. El modelo propuesto permite el ajuste de algoritmos MPPT para simplificar en tiempo real los algoritmos del control del inversor. Por otra parte, también abarca una manera de encontrar los errores producidos por irradiación no uniforme incidente en los paneles solares fotovoltaicos.

- ♣ M. Rashid, "Power Electronics Handbook", Chapter 15, pp. 357. Edición por publicar.

Material propuesto por F. Villarroel. El trabajo consiste en la obtención de un modelo simplificado de un panel solar a partir del modelo del circuito SMD. Hace referencia a las simplificaciones del circuito de forma de obtener un modelo que solo dependa de una variable y sea de fácil manipulación para obtener resultados.

### 1.2.2 Implementación y Uso del Equipo OPAL – RT<sup>®</sup>

- ♣ S. K. Singh, B. P. Padhy, S. Chakrabarti, S. N. Singh, A. Kolwalkar and S. M. Kelapure, "Development of dynamic test cases in OPAL-RT real-time power system simulator," *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, Guwahati, 2014, pp. 1-6.

Se describe el desarrollo de los modelos dinámicos de una serie de pruebas de sistemas de potencia. Las simulaciones se llevaron a cabo en el entorno de la OPAL – RT<sup>®</sup> en tiempo real por medio del simulador eMEGASIM utilizando herramientas de la programación en paralelo para resolver las ecuaciones diferenciales de los sistemas propuestos en tiempo real.

Se describe el proceso y se analizan los desafíos de construcción de los casos de prueba dinámica. En este artículo se discute brevemente los principales problemas en el desarrollo de la dinámica de los modelos y también se discute los diversos componentes utilizados para la construcción de los modelos, se presenta una descripción sobre el simulador OPAL – RT<sup>®</sup>.

### 1.2.3 Memorias de Título

- ♣ P. Vela, “Operación Sub-óptima de Generación Eléctrica en Base a Paneles Solares”, Memoria de título, Ing. Civil Electrónico, Depto. De Ing. Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, Marzo 2017.

En esta tesis se investigó la posibilidad de usar la energía almacenada en los elementos activos de un convertidor estático que transfiere potencia desde los paneles solares a la red con fines auxiliares. En el desarrollo de este trabajo se obtuvieron las fórmulas que modelan el comportamiento de un panel solar, en función de la radiación solar y temperatura ambiente, un inversor fuente de voltaje y un filtro LCL de salida. Los modelos se verificaron mediante simulaciones en el software Psim<sup>®</sup> en L.A y L.C, resaltando la dinámica de la respuesta y la estabilidad del sistema. También se hicieron pruebas experimentales. Finalmente, los resultados de esta memoria muestran que es posible aportar energía.

- ♣ G. Castro, “Simulación de Convertidores Estáticos de Potencia en Tiempo Real con el Equipo OPAL-RT”, Memoria de título, Ing. Civil Eléctrico, Depto. De Ing. Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, Noviembre 2016.

En este trabajo se implementa el uso del equipo OPAL – RT<sup>®</sup> y su respectivo simulador para circuitos eléctricos en tiempo real. Este trabajo buscó ampliar el conocimiento disponible sobre las potencialidades del equipo y como acceder a estas. Se muestra la simulación de un inversor fuente de corriente y la respuesta en lazo abierto ante un cambio escalón en la referencia, se analizan los resultados obtenidos con la OPAL – RT<sup>®</sup> concluyendo que su respuesta es más cercana a la realidad.

- ♣ Israel A. Inzunza, “Análisis y desempeño de celdas solares en topología”, Memoria de título, Ing. Civil Electrónico, Depto. De Ing. Eléctrica, Universidad de Concepción, Chile, Diciembre 2015.

En esta tesis se trabajó y explico los pasos y el desarrollo a seguir para obtener el modelo matemático de una celda solar. Cabe destacar que el desarrollo del modelo de la celda solar utilizada en esta memoria será base para simular en la OPAL – RT<sup>®</sup>.

### 1.2.4 Uso y Programación en el Equipo OPAL – RT<sup>®</sup>

- ♣ *eHS User Guide*, 2016 OPAL – RT<sup>®</sup> Technologies Inc.

Manual del usuario de la OPAL – RT<sup>®</sup>. Fundamental para saber el funcionamiento del equipo OPAL – RT<sup>®</sup> y aprender sobre la construcción de los modelos para llevar a cabo las simulaciones en el equipo.

- ♣ *RT-LAB Getting Started – Introduction*, OPAL – RT<sup>®</sup> Technologies.

Documento introductorio donde se explica la evolución de los simuladores, que es una simulación en tiempo real y por qué usarlas.

- ♣ *RT-LAB Getting Started – Software*, OPAL – RT<sup>®</sup> Technologies.

Documento introductorio del software RT – LAB<sup>®</sup>. Se explica la arquitectura del sistema, instalación del software, uso de interfaz RT – LAB<sup>®</sup>, la construcción, ejecución y carga de modelos en la OPAL – RT<sup>®</sup>.

- ♣ *OP101: Getting Started. Module 2B: Modeling Concepts in Simulink*, RT – LAB<sup>®</sup> Solution for Real-Time Applications.

En este documento se habla sobre los conceptos para llevar a cabo una modelación en Simulink<sup>®</sup> en RT – LAB<sup>®</sup>. Se tratan los conceptos de subsistemas y la importancia del bloque de comunicación *OpComm*. Se comenta sobre la ejecución de tareas en paralelo y la ejecución fuera de línea.

### 1.2.5 Convertidores Estáticos de Potencia

- ♣ O. A. Sábada, L. M. Palomo, P. S. Gúrpide, E.G. Villabona, "Equipos de Ensayos de Convertidores Multiniveles de 3 Niveles", 2005 *ResearhGate*.

En este documento se habla sobre un convertidor polivalente el cual puede configurarse a cualquiera de las topologías fundamentales multiniveles de tres niveles, es decir, puentes en H, NPC y FC.



- ♣ J. Guzman, "Modelado y control de un inversor monofásico de tres niveles tipo NPC", *s.f*, University of Southampton, Dina Shona Laila, Suleiman Sharkh.

En este artículo se habla sobre las ventajas y desventajas de esta topología. Se centra principalmente en el estudio y modelo de un convertidor NPC.

### 1.2.6 Discusión

La revisión bibliográfica llevada a cabo ha sido la base para comenzar el estudio de los modelos a implementar en el equipo OPAL – RT<sup>®</sup> junto con el aprendizaje en el uso del software RT – LAB<sup>®</sup> para llevar a cabo sus respectivas simulaciones en tiempo real.

Es poca la profundización que se da sobre el tema de las simulaciones en tiempo real en el equipo OPAL – RT<sup>®</sup> en el uso de librerías o los inconvenientes y/o limitaciones con los modelos presentes en la librería del software RT – LAB<sup>®</sup>. Lo anterior puede dificultar el camino para llevar a cabo una simulación en el equipo, sin embargo, la revisión bibliográfica de [6] es de gran ayuda ya que se centra en la simulación de una topología de convertidores estáticos en el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>.

Por otra parte, las revisiones de las tesis sobre han dado pie a una base más sólida para el desarrollo de una librería para topologías con paneles solares fotovoltaicos y de convertidores estáticos de potencia abriendo camino a la simulación en tiempo real y el estudio del comportamiento de los modelos propuestos en esos trabajos.

El desarrollo de librerías de propósitos generales para el equipo OPAL – RT<sup>®</sup> dará paso a una base más sólida para el desarrollo de simulaciones futuras, disminuyendo las horas invertidas en simular las topología desde cero para finalmente llevar a cabo una simulación en tiempo real que facilitará la obtención de resultados ahorrándose la necesidad de implementar grandes set-ups, reduciendo sus costos y el riesgo de accidentes para obtener los mismos resultados que en la OPAL – RT<sup>®</sup>.

## 1.3. Hipótesis de Trabajo

Es posible el desarrollo de un set de librerías de propósito general de modelos de paneles solares y de convertidores estáticos en Simulink<sup>®</sup> lo que permite llevar a cabo simulaciones en tiempo real en el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>, contando así con una base para futuras simulaciones que requieran el uso de estas topologías optimizando los tiempos de simulación para el usuario.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Desarrollar librerías del tipo *Open Source* en Simulink® a partir de los modelos matemáticos de topologías de convertidores estáticos de potencia y paneles solares fotovoltaicos para facilitar la simulación en tiempo real de estas topologías en el equipo OPAL – RT®. Estas librerías están enfocadas principalmente en topologías de convertidores estáticos monofásica, trifásicas y multiniveles específicamente la celda básica del convertidor NPC, junto con librerías de paneles solares fotovoltaicos específicamente se simuló la librería para el modelo simplificado del panel solar propuesto por [3].

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Análisis y contrastación de la operación de los modelos matemáticos para topologías de paneles solares fotovoltaicos desde topologías del modelo SMD hasta modelo simplificado para su posterior desarrollo como librería en Simulink®.

Análisis de la operación de los modelos matemáticos para topologías de convertidores estáticos de potencia, inversores y rectificadores, desde topologías monofásicas hasta multinivel NPC para su posterior desarrollo como librería en Simulink®.

Contrastar las simulaciones obtenidas mediante el equipo OPAL – RT® con las obtenidas mediante los softwares *PSIM*® y *Mathcad*® y/o set-up experimentales.

## 1.5. Alcances y Limitaciones

Como alcances se tiene el desarrollo de veintiuno librerías en Simulink® para realizar simulaciones en tiempo real en el entorno del equipo OPAL – RT® de topologías de convertidores estáticos en plantas de generación eléctrica basada en paneles solares fotovoltaicos.

Se abarcará desde la librería del modelo simplificado del panel solar fotovoltaico hasta las topologías monofásicas, trifásicas y celda básica que conforma la topología multinivel NPC de inversores y rectificadores. Además, se desarrollarán sus respectivas librerías de conmutación para los switches, funciones de conmutación y modulación SPWM.

A modo de contrastar las operaciones de las simulaciones en tiempo real obtenidas en el equipo mediante simulación en el *software* Simulink<sup>®</sup> y RT – LAB<sup>®</sup>, se realizarán las simulaciones y obtención de curvas en los *softwares* Mathcad<sup>®</sup> y PSIM<sup>®</sup>.

Por otra parte, como limitaciones en este trabajo se considerarán para efectos de simulación switches ideales y modelo del panel solar simplificados.

## 1.6. Temario y Metodología

Luego de haber realizado una revisión bibliográfica acorde al tema a desarrollar en este trabajo se definió la siguiente metodología y temario para el informe.

Como primera instancia se buscó introducir al tema de las simulaciones en tiempo real y al entorno de simulación en el equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup>, capítulo 2.

En el capítulo 3 se lleva a cabo todo el análisis, comparación y desarrollo de los modelos matemáticos sobre los cuales se desarrollan sus respectivas librerías, estos van desde las topologías monofásicas hasta multiniveles de convertidores estáticos de potencia y el modelo SMD y el simplificado del panel solar.

Seguido a este capítulo se presenta el desarrollo de las librerías en *Simulink*<sup>®</sup> para las simulaciones en tiempo real en el equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup>.

En el capítulo 5 se realizan las simulaciones de las topologías en los *software* *PSIM*<sup>®</sup> y *Mathcad*<sup>®</sup> a modo de contrastar las curvas obtenidas con las simulaciones en tiempo real en el equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup>. Las curvas a comparar van desde la modulación SPWM, conmutación en los switches hasta las curvas características de cada topología y en el caso del modelo del panel solar se simula el modelo simplificado del panel solar y se contrastan las curvas de voltaje y corriente de salida.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones en *Simulink*<sup>®</sup> de los modelos las que posteriormente se enlazan al *software* *RT – LAB*<sup>®</sup> y cargadas en el equipo. En estas simulaciones se utilizan las librerías desarrolladas y agregadas a la librería existente de *Simulink*<sup>®</sup>. Las conclusiones y trabajos futuros se muestran en el capítulo 7.

## Capítulo 2. Equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup> y su Entorno en el Software *RT – LAB*<sup>®</sup>

---

### 2.1. Introducción

En este capítulo se busca dar una introducción al uso del equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup> junto con los pasos y la metodología a seguir para lograr una simulación en tiempo real en su software *RT – LAB*<sup>®</sup>, plataforma mediante la cual se enlaza con las simulaciones realizadas en Simulink<sup>®</sup>.

### 2.2. Simulaciones en Tiempo Real

#### 2.2.1 ¿Qué es una Simulación de Procesos?

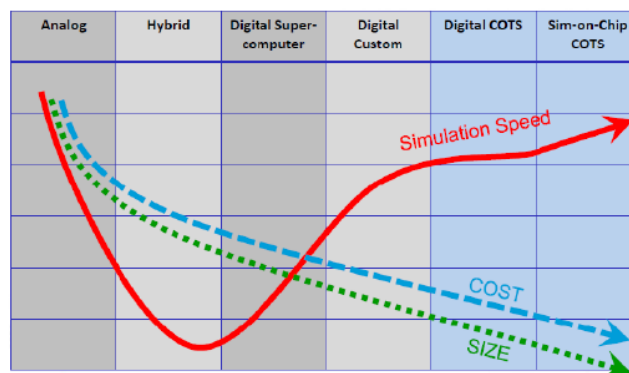
Se entiende por simulación a la representación de sistemas, procesos o fenómenos que conlleva el desarrollo computacional, mediante un software apropiado, de los modelos matemáticos que describen al sistema en estudio con el fin de realizar una evaluación mediante la cual se pueda mejorar, optimizar y/o predecir el comportamiento del sistema ante algún entrada o perturbación en el medio en post de aumentar la productividad o respuesta del proceso.

El proceso de simular un sistema requiere de variadas corrientes de conocimiento partiendo por el análisis de los métodos numéricos para la solución de las ecuaciones algebraicas y/o diferenciales que rigen el sistema, la modelación que involucra al proceso, estimaciones, etc. Por lo cual se puede decir que la utilidad de la simulación de un proceso se centra en el análisis, diseño y optimización del mismo.

Las simulaciones cobran vital importancia en el ámbito de la ingeniería ya que son una gran herramienta para poner a prueba hipótesis dentro del desarrollo de proyectos. Shannon define la simulación como

“...el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias... para el funcionamiento del sistema”, [1].

En las últimas décadas el desarrollo de software de simulación para procesos eléctricos ha ido en aumento como se puede observar en la Fig. 2.1, donde su evolución, rapidez de simulación y confiabilidad versus el costo de adquisición juegan un papel vital antes elección de estos softwares. Todo comenzó con los simuladores de sistemas análogos, pasando por los sistemas híbridos, hasta hoy en día que se está dando paso al desarrollo de sistemas digitales en conjunto con simulaciones en COTS como se aprecia en la Fig. 2.2, este último tipo de simulaciones es lo que ofrece OPAL – RT®.



**Fig. 2.1 – Gráfico Comparativo de la Evolución en el Desarrollo de Software de Simulación**



**Fig. 2.2 – Evolución en el Desarrollo de Software de Simulación a lo Largo de las Décadas**

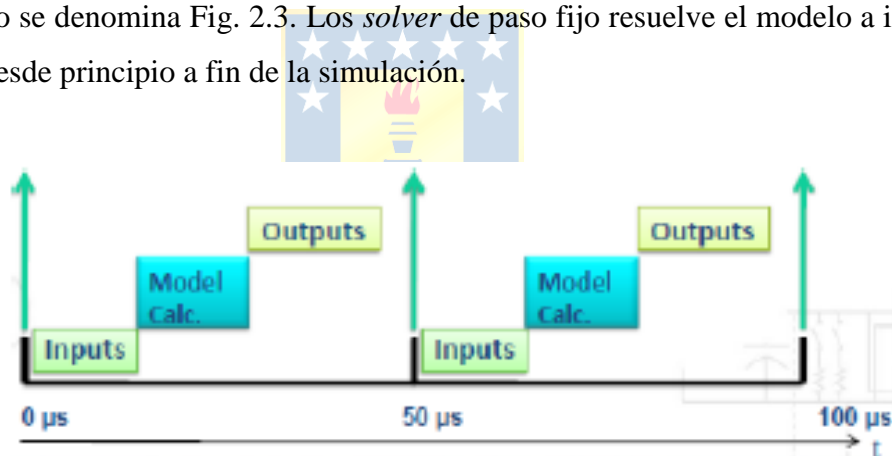
## 2.2.2 Introducción a la Simulación en Tiempo Real y en Diversas Plataformas

Dentro de la ingeniería se conocen diversos softwares de simulación para procesos eléctricos y electrónicos tales como Psim®, NI Multisim®, Tina®, PSpice®, Proteus®, entre otros. Sin embargo, estos softwares no trabajan bajo el concepto de tiempo real, por lo cual sus resultados son considerados solo una aproximación al comportamiento real del proceso o sistema.

La misión del equipo de OPAL – RT<sup>®</sup> Technologies es ayudar a sus clientes a reducir el tiempo de diseño, implementación y prueba de sistemas mecatrónicos complejos, suministrando experiencia y herramientas de software abiertas y aprovechando las tecnologías COTS de última generación. Todo esto bajo su lema “*from imagination to REAL-TIME*”.

Hoy en día las simulaciones en tiempo real son totalmente digitales, mientras que el poder de procesamiento va en aumento según la Ley de Moore, es decir, cada 18 meses se duplica la densidad de transistores por unidad de superficie. Para OPAL – RT<sup>®</sup> el concepto de tiempo real está dirigido a sistemas embebidos, es decir, dispositivos electrónicos diseñados para interactuar con el mundo real proporcionando un manejo del control, interacción y una comodidad para el usuario.

En un sistema de tiempo real, el sistema embebido posee un tiempo determinado tanto para leer las señales de entrada como para realizar los cálculos necesarios en las señales de salida. El tiempo entre cada intervalo se denomina Fig. 2.3. Los *solver* de paso fijo resuelve el modelo a intervalos de tiempo regulares desde principio a fin de la simulación.



**Fig. 2.3 – Pasos para Llevar a Cabo una Simulación**

Pero, ¿por qué usar simulaciones en tiempo real?, esto se resume en la Fig. 2.4 donde se puede observar las ventajas de simular en tiempo real.



Fig. 2.4 – Diagrama de los Beneficios de Simular en Tiempo Real

### 2.3. Software RT – LAB<sup>®</sup>

El entorno de simulación del equipo OPAL – RT<sup>®</sup> es el software RT – LAB<sup>®</sup>. El set-up para realizar las simulaciones se muestra en la Fig. 2.5, se puede apreciar que existe una componente destinada a la interfaz gráfica y otra a la parte computacional, es en esta última donde se encuentran las tarjetas embebidas y se ejecuta la simulación.

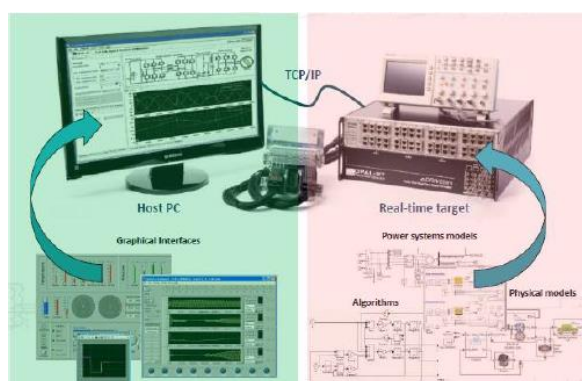
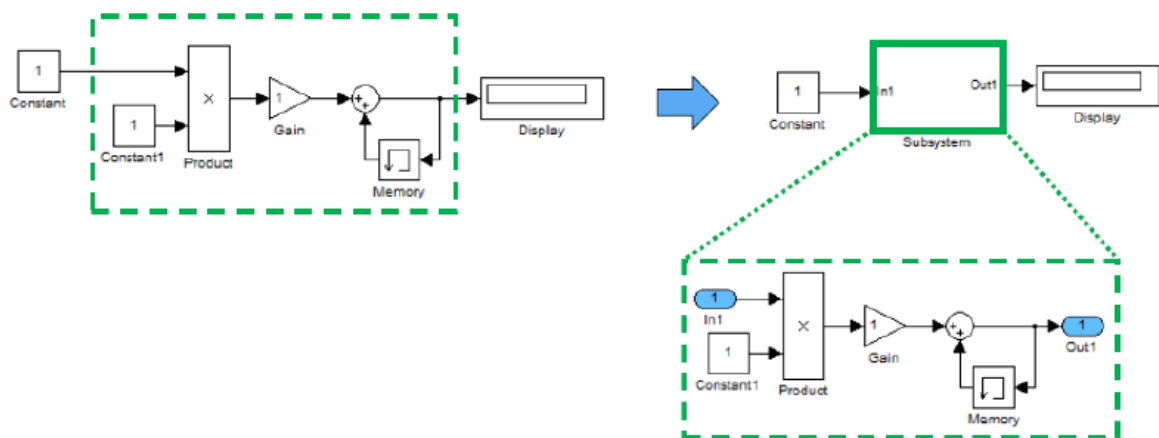


Fig. 2.5 – Set-up para Llevar a Cabo una Simulación en el Equipo OPAL – RT<sup>®</sup>

Para llevar a cabo una simulación en tiempo real en el equipo OPAL – RT<sup>®</sup> se debe contar con el software Matlab<sup>®</sup>/ Simulink<sup>®</sup>, de preferencia la versión 2014b-32 bits ya que es la más compatible con el equipo, y con el software RT – LAB<sup>®</sup> el cual se puede descargar de forma gratuita en la página web de OPAL – RT<sup>®</sup>.

La simulación de los sistemas se realiza mediante diagramas de bloque en Simulink<sup>®</sup>. Una vez desarrollado los modelos en bloques estos se enlazan a RT – LAB<sup>®</sup> para ser cargados en las tarjetas del equipo OPAL – RT<sup>®</sup>.

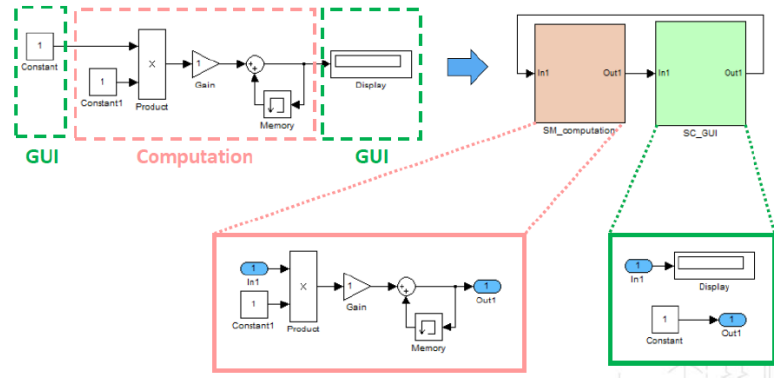
RT – LAB<sup>®</sup> trabaja en base a subsistemas en Simulink<sup>®</sup>, en donde se agrupan los bloques dentro de uno solo a modo de simplificar el modelo, estas establecen una jerarquía dentro del modelo y mantienen una funcionalidad entre los subsistemas, ver Fig. 2.6.



**Fig. 2.6 – Subsistemas en Simulink<sup>®</sup>**

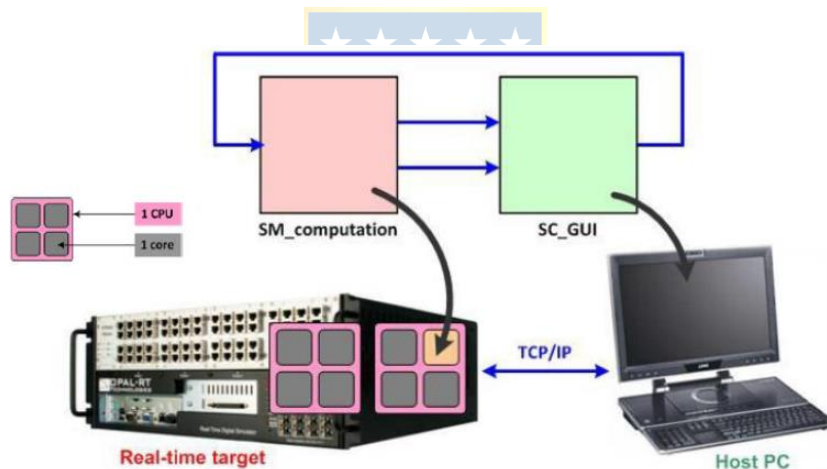
En RT – LAB<sup>®</sup> los subsistemas tienen dos objetivos, el primero es distinguir el subsistema computacional del subsistema que contiene a la GUI, el segundo es asignar subsistemas de computación a diferentes núcleos de la CPU. Se puede concluir que RT – LAB<sup>®</sup> solo trabaja con subsistemas de Simulink<sup>®</sup>, Fig. 2.7.





**Fig. 2.7 – Comunicación entre Subsistemas GUI y Computacionales en Simulink®**

Un subsistema de computación se ejecutará en tiempo real en un núcleo de CPU de la tarjeta de tiempo real. Por otra parte, el subsistema GUI se mostrará en el Host PC. La forma en que se intercambian los datos entre el subsistema de computación y el subsistema GUI es de forma asincrónica a través del enlace TCP/IP, Fig. 2.8.



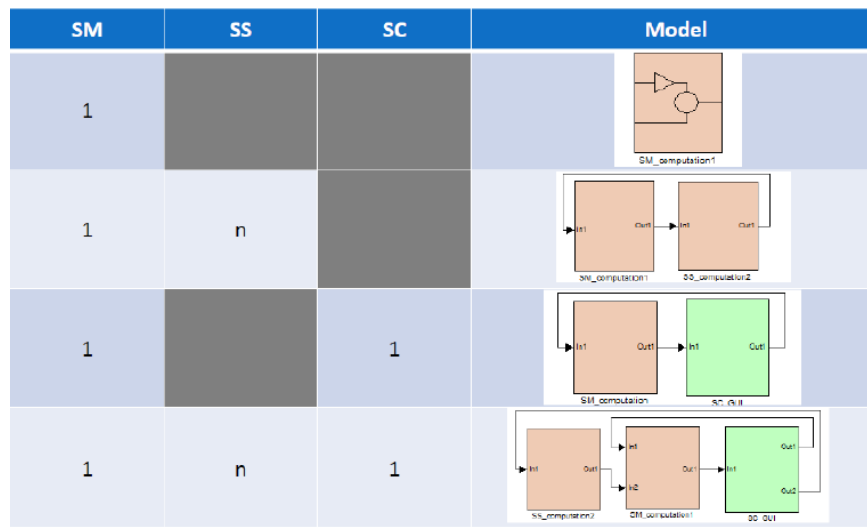
**Fig. 2.8 – Set-up Host PC y Real Time Target del equipo OPAL – RT®**

Los nombres de los subsistemas están dados por las siguientes jerarquías:

- Subsistema GUI: SC\_ anyname
  - Permite la interacción con los subsistemas de computación.
  - Se ejecuta de forma asincrónica en el HostPC desde los subsistemas
  - Este subsistema no está vinculado a ninguna tarjeta de algún núcleo de la CPU
  - Los subsistemas de la GUI contienen bloques que comunican la interfaz de usuario, es decir, los gráficos, pantallas, switches, constantes, etc.

- Subsistema de Computación: En estos subsistemas entran todos los elementos computacionales del modelo, operaciones matemáticas, bloques E/S, generadores de señales, modelos físicos, etc.
  - SM\_anyname si solo es un subsistema. En este caso pasa a ser el subsistema computacional principal.
    - Los SM\_anyname utilizan solo un núcleo de la CPU
  - SS\_anyname, corresponden a los subsistemas computacionales adicionales
    - Cada subsistema SS adicional utiliza un núcleo de la CPU

En la Fig. 2.9 se puede observar las posibles configuraciones de los bloques (subsistemas) para simular un sistema.

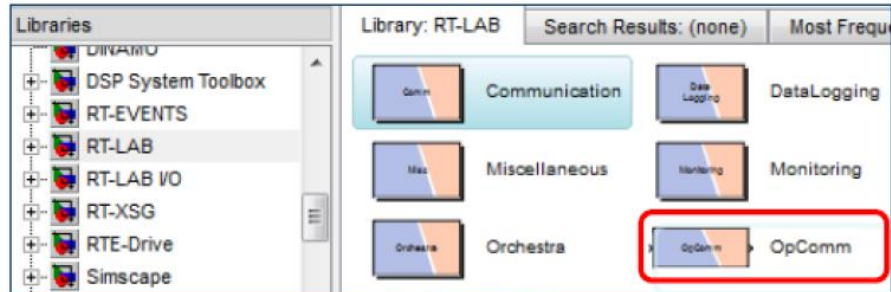


**Fig. 2.9 – Configuraciones Posibles en *Simulink*<sup>®</sup> para Simular en el Equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup>**

De lo anterior se puede concluir que,

- Los subsistemas SC\_anyname se utilizan como interfaz gráfica. Por otra parte, los subsistemas SM\_anyname y SS\_anyname se utilizan para agrupar los bloques de cálculos.
- Los subsistemas de cálculo se ejecutan en un núcleo de la CPU
- La comunicación entre los subsistemas de computación es sincrónica mientras que la comunicación entre los subsistemas de computación y el subsistema GUI es asincrónica
- Cada señal entre subsistemas (escalar o vectorial) debe ser de tipo *double*.

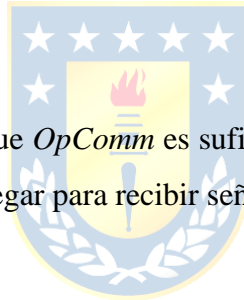
Para lograr la comunicación entre dos subsistemas o entre los subsistemas de computación y los subsistemas GUI se debe hacer uso del bloque *OpComm*. Este bloque se encuentra en la librería RT – LAB<sup>®</sup> de Simulink<sup>®</sup>, Fig. 2.10.



**Fig. 2.10 – Bloque *OpComm* en la Librería RT – LAB<sup>®</sup> de la Librería Simulink<sup>®</sup>**

Para un subsistema tipo SM\_ o SS\_ el bloque *OpComm* recibe señales sincronizadas en tiempo real de otros subsistemas en tiempo real, mientras que este bloque recibe señales asincrónicas provenientes del subsistema GUI.

Para un subsistema SC\_ un bloque *OpComm* es suficiente para este caso. El máximo número de bloques *OpComm* que se pueden agregar para recibir señales desde otros subsistemas son 25.



## Capítulo 3. Modelos Matemáticos de las Topologías en Estudio

---

### 3.1. Introducción

Hoy en día una de las aplicaciones más importantes de los convertidores de potencia son las distintas interfaces de energías renovables. Dentro de las fuentes más importantes energías renovables se encuentran la energía solar, que produce una generación de corriente continua, y la energía eólica asociada a la generación de corriente alterna.

Se comenzará con el estudio de dos modelos para la topología de paneles solares fotovoltaicos, el primero estará dado por el obtenido en [7] a partir del modelo circuital del SMD para una celda del panel solar. Sin embargo, este modelo es un poco complejo de simular, es por esto que se propone un segundo modelo obtenido a partir del SMD el cual se denomina modelo simplificado del panel solar fotovoltaico. Se contrastaran las curvas del modelo de SMD y del modelo simplificado del panel solar fotovoltaico obtenidas mediante simulación en Mathcad® para analizar su aproximación de resultados. Una vez comprobado que el modelo simplificado representa una aproximación cercana al comportamiento descrito por el modelo SMD se procederá a simularlo en tiempo real mediante el software RT – LAB® obteniendo sus curvas características.

La electrónica de potencia es el área encargada del estudio y desarrollo de dispositivos, circuitos, sistemas y procedimientos para el procesamiento, control y conversión de la energía eléctrica gracias al avance y desarrollo de la electrónica de estado sólido. Se enfoca principalmente en la conversión y control de la energía eléctrica en base al uso de dispositivos semiconductores para diferentes aplicaciones entre ellas el suministro de energía regulada de d.c y a.c.

Hoy en día se define un convertidor estático de potencia como un circuito electrónico constituido por un conjunto de elementos estáticos formando una red que constituye un equipo de conexión y transmisión entre un generador y un receptor. Existen varias configuraciones de convertidores estáticos de potencia, en este capítulo se abordarán desde las topologías monofásica, pasando por las trifásicas, hasta las topologías multiniveles.

## 3.2. Modelos Matemáticos de las Topologías de Paneles Solares Fotovoltaicos

### 3.2.1 Modelo Panel Solar Fotovoltaico Single Model Diode

De [7] se obtuvo un modelo para el desarrollo y análisis del comportamiento de las celdas solares dado a partir del modelo SMD de una celda solar. El SMD se deriva de los principios físicos de la operación de la celda. En el modelo se muestra la conversión de la irradiación a corriente representada por la fuente de corriente  $i_{ph}$ , las resistencias simulan las pérdidas en la celda,  $R_s$  representa las pérdidas internas por el interconexionado o cableado propio del panel mientras que  $R_{sh}$  representa las pérdidas por las corrientes de fuga del panel. Por último, el diodo simula el comportamiento de la juntura p-n del material semiconductor frente a la irradiación solar, ver Fig. 3.1

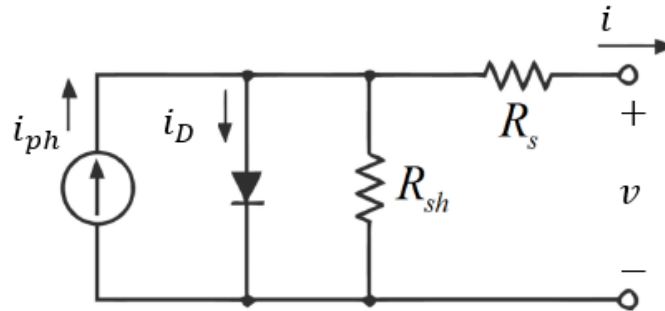


Fig. 3.1 – Modelo Circuital SMD Equivalente al de una Celda del Panel Solar Fotovoltaico

En [7], aplicando teoría de circuitos y mediante un desarrollo matemático se llega a la ecuación (3.1) la cual se utilizara para el desarrollo y análisis de las celdas solares.

$$i_{ph} = i_{sc0} \cdot \frac{S}{S_0} + C_t \cdot (T - T_{ref}) - i_{s0} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{AKT}} - 1\right) - \frac{v + i \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.1)$$

La ecuación anterior se obtiene luego de una serie de arreglos matemáticos que se originan a partir de aplicar LCK al circuito de la Fig. 3.1, donde la corriente entregada por la celda es igual a la corriente de la fuente de corriente menos la corriente del diodo y la corriente que pasa por la resistencia  $R_{sh}$  [14], ecuación (3.2).

$$i = i_{ph} - i_D - i_{R_{sh}} \quad (3.2)$$

Donde  $i$  es la corriente de salida del panel,  $i_{ph}$  es la corriente generada por la celda,  $i_D$  la corriente del diodo e  $i_{R_{sh}}$  la corriente de la resistencia shunt debido a las pérdidas por las corrientes de fuga. La corriente del diodo  $i_D$  está dada por la ecuación de Shockley para un diodo ideal ecuación (3.3).

$$i_D = i_0 \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V_D}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Donde  $q = 1.602176 \cdot 10^{-19}$  [C] correspondiente a la carga del electrón,  $i_0$  es la corriente de saturación inversa del diodo,  $v_D$  voltaje del diodo,  $A$  factor de idealidad cuyo valor varía entre 1 y 2,  $T$  es la temperatura en grados Kelvin y  $k$  es la constante de Boltzmann, Tabla 3.1.

Luego de un trabajo matemático, [14] llega a las siguientes ecuaciones para las corrientes  $i_{ph}$ ,  $i_D$  e  $i_{R_{sh}}$  ecuación (3.4), (3.5) y (3.6).

$$i_{ph} = i_{sc0} \cdot \frac{S}{S_0} + C_t \cdot (T - T_{ref}) \quad (3.4)$$

$$i_D = i_{s0} \cdot \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V_D}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

$$i_{R_{sh}} = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{v + i \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.6)$$

Finalmente, realizando una serie de reemplazos se llega al modelo del SMD dado por la ecuación (3.1).

El modelo propuesto por [7] es un primer acercamiento para estudiar el comportamiento de los paneles solares. Si bien el modelo se obtuvo a partir del análisis por LVK del SMD este se aproxima a la realidad para estudiar el comportamiento de los paneles solares mediante simulaciones en Mathcad®.

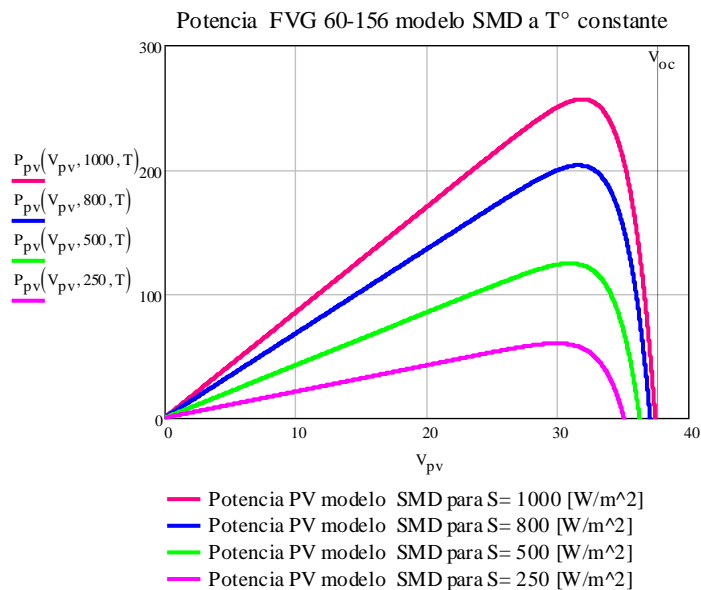
En la Tabla 3.1 se muestra los parámetros utilizados para la simulación del panel solar y los parámetros del *datasheet* del panel solar fotovoltaico disponible en el laboratorio, , ver Anexo A.1.

**Tabla 3.1 – Parámetros Modelo Panel Solar Fotovoltaico.**

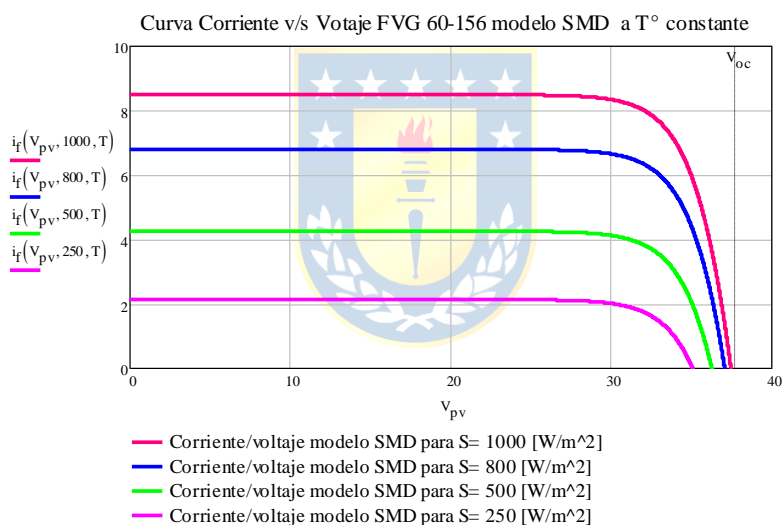
Variable	Instrumentación
$i_{sc0}$ (Corriente de corto circuito)	8.48 [A]
$i_{s0}$ (Corriente de saturación)	$3.2e^{-9}$ [A]
$R_s$ (Resistencia en Serie)	0.001[ $\Omega$ ]
$R_{sh}$ (Resistencia Shunt)	1000 [ $\Omega$ ]
$S_0$ (Irradiación standard)	1000 [ $\frac{W}{m^2}$ ]
$T_{ref}$ (Temperatura de referencia)	25 [°C]
$C_t$ (Coeficiente de temperatura)	0.0015
$A$ (Factor de idealidad)	1.12
$k_s$ (Coeficiente irradiación/temperatura)	0
$k$ (Constante de Boltzmann)	$1.38e^{-23}$
$E_g$ (Energía gap Silicio)	1.12 [J]
$n_s$ (Número de celdas en serie)	60
$q$ (Carga del electrón)	$1.6e^{-19}$ [C]

Para efectos de simulación se consideró un arreglo de 60 celdas en conexión serie y se consideró como guía los valores de irradiancia y temperatura de [2].

En las Fig. 3.2 y Fig. 3.3 se puede observar las curvas de potencia y corriente para distintos valores de irradiación  $S$ . A medida que disminuye la irradiación incidente en el panel la potencia de salida también disminuye, esto manteniendo una temperatura constante de 25 [°C]



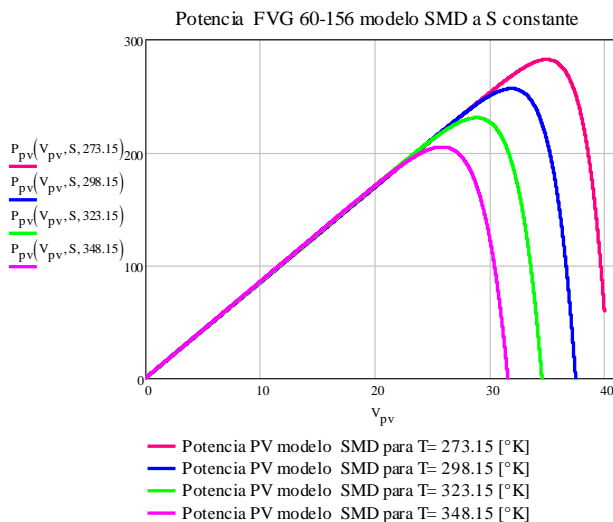
**Fig. 3.2 – Potencia Modelo SMD a Temperatura Constante e Irradiancia Variable**



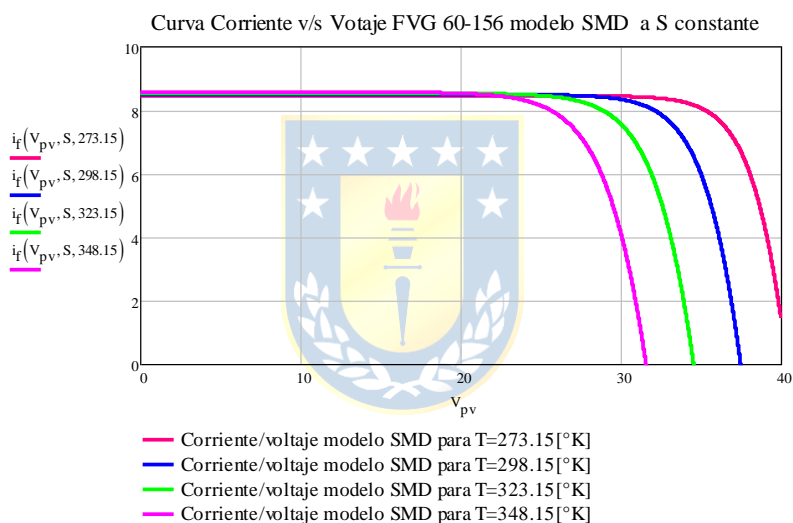
**Fig. 3.3 – Corriente v/s Voltaje Modelo SMD a Temperatura Constante e Irradiancia Variable**

Por otra parte, si varía la temperatura de operación del panel solar, manteniendo constante la irradiación, se obtienen las siguientes gráficas para la corriente y la potencia de salida, ver Fig. 3.4 y Fig. 3.5. Se puede observar que la potencia de salida disminuye a medida que la temperatura aumenta en el panel.





**Fig. 3.4 – Potencia Modelo SMD a Temperatura Variable e Irradiancia Constante**



**Fig. 3.5 – Corriente v/s Voltaje Modelo SMD a Temperatura Variable e Irradiancia Constante**

### 3.2.2 Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico

El modelo de panel solar simplificado se obtiene a partir del análisis y simplificaciones a partir el modelo propuesto por [3] de la representación circuital del SMD.

En el caso del modelo simplificado se agruparon las constantes del factor elevador de la exponencial presente en la ecuación (3.3) y se denominó  $V_{T_c}$ . Cabe destacar el uso de nomenclatura usada por [7] y [3], ya que en [7] el factor de idealidad se denomina  $A$  mientras que para [3] corresponde a  $n$ , luego la constante  $V_{T_c}$  está dada por:

$$V_{T_c} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \quad (3.7)$$

Reemplazando se obtiene,

$$i_d = i_o \left( e^{\frac{V_d}{V_{T_c}}} - 1 \right) \quad (3.8)$$

En el modelo se considera la corriente de fuga  $i_{R_{sh}}$  es mucho menor que las otras dos corrientes de la ecuación (3.2), por lo que este término se desprecia.

Luego, tomando la ecuación (3.2), considerando la ecuación (3.8) y despreciando  $i_{R_{sh}}$  resulta la ecuación (3.9).

$$i_{pv} = i_{ph} - i_o \left( e^{\frac{V_d}{V_{T_c}}} - 1 \right) \quad (3.9)$$

Escribiendo la LVK a la salida de la celda y despreciando el voltaje en  $R_s$ , luego el voltaje  $V_d = V_{pv}$ , reemplazando en ecuación (3.9) se obtiene la ecuación (3.10),

$$i_{pv} = i_{ph} - i_o \left( e^{\frac{V_{pv}}{V_{T_c}}} - 1 \right) \quad (3.10)$$

Para obtener los parámetros de la celda se realizan las pruebas en corto circuito y en circuito abierto. En la primera prueba se obtiene  $i_{ph} = i_{sc}$ , donde  $i_{sc}$  es la corriente de corto circuito, es decir, donde el voltaje máximo del panel es cero. Para la prueba de circuito abierto se obtiene  $i_o$  en función del voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$  resultando la ecuación (3.11).

$$i_o = \frac{i_{sc}}{\left( e^{\frac{V_{oc}}{V_{T_c}}} - 1 \right)} \quad (3.11)$$

Reemplazando en la ecuación (3.10) se obtiene la ecuación (3.12),

$$i_{pv} = i_{sc} \left( 1 - \frac{e^{\frac{V_{pv}}{V_{Tc}}}}{e^{\frac{V_{oc}}{V_{Tc}}} - 1} - \frac{1}{e^{\frac{V_{oc}}{V_{Tc}}} - 1} \right) \quad (3.12)$$

Para llegar al modelo simplificado del panel solar propuesto por [3] se considerara  $e^{\frac{V_{oc}}{V_{Tc}}} \gg 1$ . Por lo tanto, el modelo simplificado está dado por la ecuación (3.13), donde  $i_{sc}$  es la corriente de corto circuito y  $V_{oc}$  el voltaje en circuito abierto del panel.

$$i_{pv} = i_{sc} \left( 1 - e^{-\frac{V_{pv}-V_{oc}}{V_{Tc}}} \right) \quad (3.13)$$

Para efectos de simulación se consideró un arreglo en serie de 60 celdas por lo que la ecuación (3.14) se debe multiplicar por el factor  $N_{sc} = 60$ , donde  $N_{sc}$  corresponde al número de celdas conectadas en serie.



$$i_{pv} = i_{sc} \left( 1 - e^{-\frac{V_{pv}-V_{oc}}{V_{Tc} \cdot N_{sc}}} \right) \quad (3.14)$$

Finalmente, reemplazando la ecuación (3.7) en la ecuación (3.14) resulta la ecuación (3.15) la cual modela el comportamiento del panel solar fotovoltaico con el modelo simplificado.

$$i_{pv} = i_{sc} \left( 1 - e^{-\frac{V_{pv}-V_{oc}}{\frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot N_{sc}}} \right) \quad (3.15)$$

La limitación de este modelo es que a diferencia del modelo SMD, en el modelo simplificado está en función de solo un parámetro, es decir, varía la temperatura o varía la irradiancia incidente en el panel manteniendo el otro constante pero no ambos como en el caso del modelo propuesto por [7].

El trabajo a realizar es obtener el valor del factor de idealidad 'n' tal que se obtenga un comportamiento similar al del modelo propuesto por [7]. Para esto se obtuvo el comportamiento y las

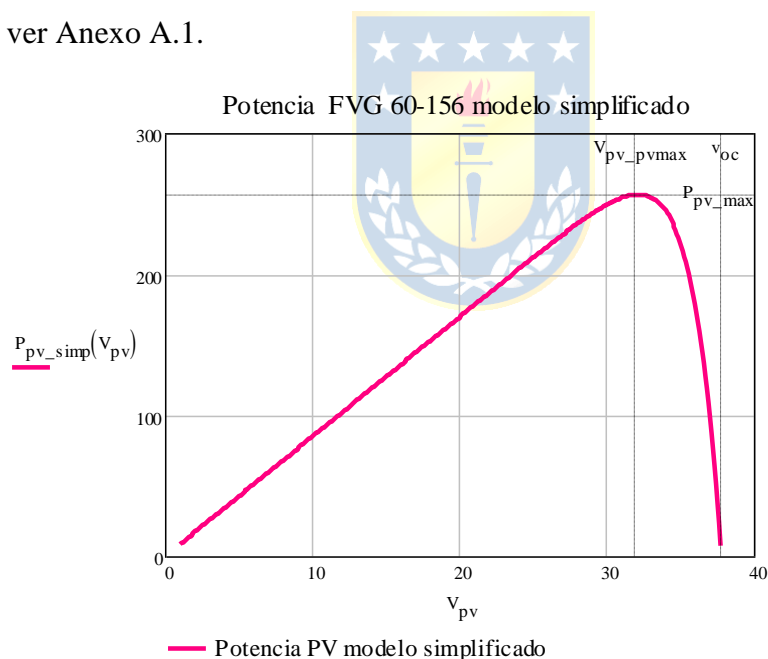
curvas del PV bajo el modelo del SMD descrito anteriormente y a partir de una simulación realizada en Mathcad® se obtuvieron los siguientes valores máximos:

$$P_{pv_{max}} = 256.359[W]$$

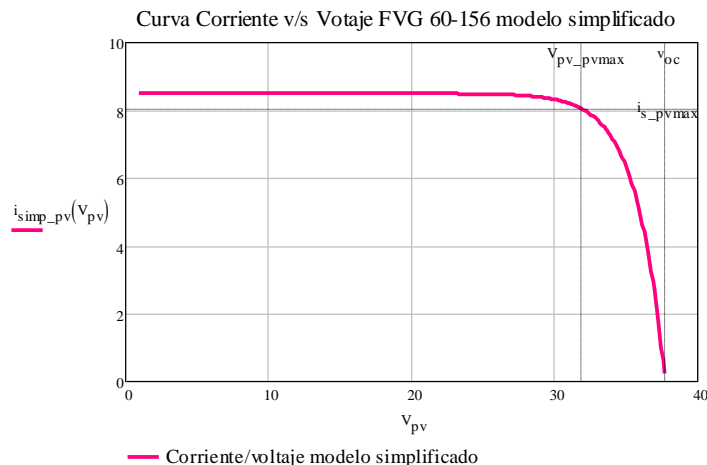
$$V_{pv_{max}} = 31.89[V]$$

$$i_{pv_{max}} = 8.039[A]$$

Para el modelo simplificado se considerará un arreglo de  $N_{sc} = 60$  celdas que conforman al panel fotovoltaico modelo FVG 60-156. Luego, reemplazando dichos valores en la ecuación (3.15) y mediante simulación en Mathcad® se obtiene que el factor de idealidad debe ser de  $n = 1.284$ , para que el modelo simplificado del panel solar fotovoltaico se comporte aproximadamente como el modelo del SMD. En la Fig. 3.6 y Fig. 3.7 se puede observar la obtención de las curvas de Potencia y de Corriente v/s Voltaje del panel solar fotovoltaico para el modelo simplificado a partir de los de FVG 60-156, ver Anexo A.1.



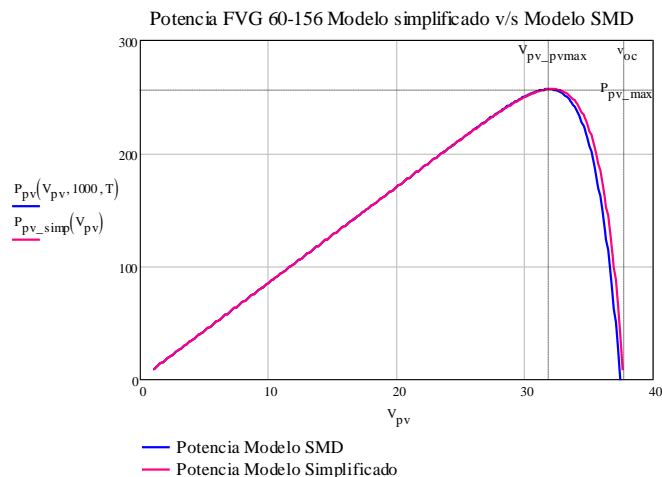
**Fig. 3.6 – Potencia Modelo Simplificado a Temperatura Ambiente e Irradiancia  $S = 1000 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$**



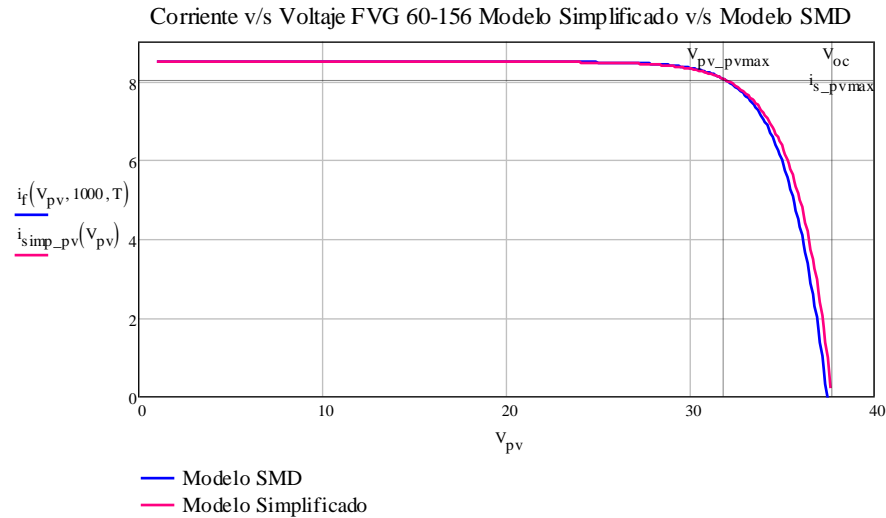
**Fig. 3.7 – Corriente v/s Voltaje Modelo Simplificado a Temperatura Ambiente e Irradiancia  $S = 1000 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$**

Una vez obtenido el comportamiento del modelo simplificado del panel solar fotovoltaico, se procedió a realizar la comparación de ambos modelos para verificar la hipótesis planteada y aceptar el modelo simplificado como un modelo apto para utilizar en simulaciones dada su simplicidad.

Comparando los gráficos de ambos modelos propuestos, Fig. 3.8 y Fig. 3.9, se puede observar que el modelo simplificado del Panel Solar Fotovoltaico tiene un comportamiento bastante aproximado al del SMD por lo que es un modelo aceptable para implementar en simulaciones y llevar a un desarrollo en la librería para la OPAL – RT<sup>®</sup>.



**Fig. 3.8 – Potencias Modelos Simplificado y SMD del panel solar a Temperatura ambiente e Irradiancia  $S = 1000 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$**



**Fig. 3.9 – Corrientes v/s Voltaje Modelos Simplificado y SMD del panel solar a Temperatura ambiente e Irradiancia  $S = 1000[W/m^2]$**

### 3.3. Modelos Matemáticos de las Topologías para Convertidores Estáticos de Potencia

En los comienzos de la electrónica de potencia la conversión de potencia se realizaba a través de convertidores electromecánicos y principalmente por máquinas eléctricas rotatorias. Hoy en día y con el desarrollo de la electrónica de estado sólido y los semiconductores se ha logrado denominarlos convertidores estáticos, donde el termino estático atribuye al uso de semiconductores en la parte conversora del convertidor obteniendo un mayor desempeño y generando de forma más eficiente la transmisión entre un generador y un receptor.

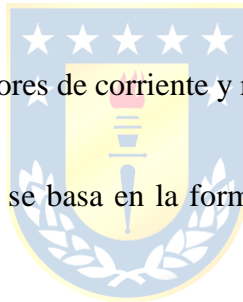
Los elementos que constituyen a un convertidor estático de potencia son fundamentalmente dos tipos:

- Interruptores estáticos: son componentes semiconductores de potencia que actúan como pulsadores, generando los estados de encendido y apagado, y su principal característica es la no linealidad la cual se resume desde el punto de vista de la teoría de circuitos como una fuente de voltaje nulo y corriente infinita en el modo conducción y como una fuente de voltaje infinito y corriente nula en el modo bloqueo.

- **Elementos reactivos:** en esta categoría caen los componentes que conforman al convertidor, es decir, los condensadores, inductores, resistencias y transformadores, responsables del almacenamiento o en el caso de los transformadores el aislamiento o desacople galvánico de la energía. También son los encargados de realizar el filtrado de las tensiones y corrientes. La presencia de estos componentes dentro de un convertidor es muy importante ya que son los responsables del peso, volumen, eficiencia, performance y costo de los equipos.

Las topologías de convertidores estáticos de potencia van desde la conversión de potencia monofásica hasta multinivel donde dentro de cada topología existen cuatro configuraciones:

1. a.c - d.c (fija o variable)
2. d.c - a.c (con tensión y frecuencia variable)
3. d.c (fija) para d.c (variable)
4. a.c (frecuencia fija) a a.c (frecuencia variable)



A su vez se clasifican en reguladores de corriente y reguladores de voltaje.

Por otra parte, otra clasificación se basa en la forma de energía a la entrada y salida de un convertidor clasificándolos como:

- **Rectificadores no controlados:** Transforma la corriente alterna de tensión constante en corriente continua de tensión constante. Está formado por diodos, constituye un montaje denominado irreversible pues operan en el primer cuadrante V/I.
- **Rectificadores controlados:** Transforma la corriente alterna de tensión constante en corriente continua de tensión variable. Formado por tiristores o transistores. El montaje puede ser reversible denominándose inversor no autónomo. Estos sistemas pueden operar en el primer y segundo cuadrante V/I.
- **Reguladores de a.c:** Transforma corriente alterna de tensión constante en corriente alterna de tensión variable manteniendo la frecuencia por el método de control de fase (control del ángulo de disparo de los tiristores). Pueden operar en dos cuadrantes V/I.
- **Convertidores de frecuencia o VDF:** Transforma una corriente o voltaje alterno de amplitud y frecuencia fija en una corriente o voltaje alterno de amplitud y frecuencia variables.

Llamados también convertidores indirectos irrestrictos en frecuencia pues se producen conversiones de energía de alterna a continua en la etapa rectificadora para luego ser convertida de continua a alterna con amplitud y frecuencia variable. La frecuencia de salida de corriente o voltaje alterno va desde cero a el doble o triple de la frecuencia de entrada dependiendo de la modulación en su etapa inversora. Requiere de filtros pasivos en todas sus etapas lo que deprime un poco la eficiencia global del convertidor. Es por ello que tomo mucha relevancia las técnicas de modulación de sus switch a fin de lograr una mínima distorsión armónica en su entrada y salida.

- **Cicloconvertidores:** Son considerados reguladores de corriente alterna o convertidores directos a.c/a.c de distinta frecuencia. Esta topología resulta ser más eficiente que los convertidores indirectos pues no requiere de filtros pasivos que limpien tanto sus señales de entrada como de salida, sin embargo, su salida en frecuencia está restringida a rangos muy bajos (entre 5 y 7 Hertz) a fin de minimizar la distorsión armónica que altera el funcionamiento de la red y de la carga. Debido a que están constituidos por arreglos de semiconductores anti-paralelos con una referencia variable se comportan como fuentes de corrientes y en cuyo caso operan en los cuatro cuadrantes V/I. Para aplicaciones de accionamientos de altas potencia, los arreglos de semiconductores son en base a tiristores y la técnica de control se hace por el método de control de fase variando el ángulo de disparo.
- **Ondulador autónomo o inversor:** Transforman una corriente continua en corriente alterna donde la frecuencia puede ser fija o variable.
- **Convertidor d.c/d.c:** Transforma corriente continua de tensión constante en corriente continua de tensión variable.

A continuación, se llevará a cabo el estudio matemático de las siguientes topologías de convertidores estáticos:

- **Topologías monofásicas:** Inversor fuente de voltaje, rectificador fuente de voltaje, inversor fuente de corriente y rectificador fuente de corriente
- **Topologías trifásicas:** Inversor fuente de voltaje, rectificador fuente de voltaje, inversor fuente de corriente y rectificador fuente de corriente
- **Topología multinivel:** estructura básica convertidor NPC.



### 3.3.1 Topologías Monofásicas de Convertidores Estáticos de Potencia

#### A. Introducción

Las topologías monofásicas de convertidores estáticos de potencia se caracterizan por estar constituidas por cuatro transistores y/o switches, los cuales agrupados forman dos piernas.

La modulación utilizada para el control de los convertidores será la modulación SPWM donde el desfase de las moduladoras sinusoidales dependerá del número de fases y como señal portadora se utilizará una función triangular.

#### B. Inversor Fuente de Voltaje

Un inversor fuente de voltaje es un convertidor cuya función es transformar la variable independiente como lo es el voltaje de d.c a a.c., la topología se puede observar en la Fig. 3.10.

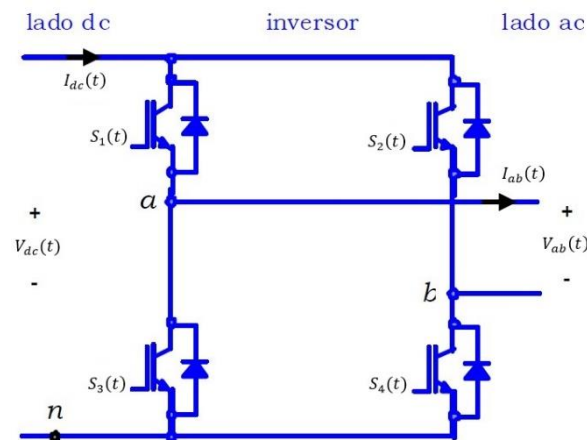


Fig. 3.10 – Representación Circuitual Modelo IVM

El control de los transistores estará dado por una modulación de tipo SPWM donde la moduladora será una señal de tipo sinusoidal y su referencia una señal de tipo triangular dadas por la ecuación (3.16) y (3.17), respectivamente.

$$m_a(t) = M \sin(\omega_s \cdot t + f_M + \varphi_M) \quad (3.16)$$

$$tri(t) = \frac{2}{\pi} \text{asin}(\sin(f_{n_{tr}} \cdot \omega_s \cdot t + f_M \cdot f_{n_{tr}} + \varphi_{tri})) \quad (3.17)$$

Donde  $M$  es la amplitud de la moduladora,  $\omega_s$  frecuencia angular igual a  $2\pi f$  donde  $f$  es la frecuencia de la red,  $f_M$  frecuencia de la moduladora y  $f_{ntr}$  frecuencia de la triangular. Los valores de estos parámetros se pueden ver en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 – Parámetros Modulación SPWM para Convertidor IVM**

Parámetro	Valor
$M$	0.9
$F$	50 [Hz]
$f_M$	0 [Hz]
$f_{ntr}$	10 [Hz]
$\varphi_{tri}$	$-\pi/2$
$\varphi_M$	$0^\circ$

La modulación en el inversor está regida por el siguiente comportamiento; los switches  $S_1$  y  $S_3$  funcionan en forma anti-paralela, es decir, cuando toma un valor lógico de 1 toma valor lógico 0. Lo mismo para la pierna 2 compuesta por  $S_2$  y  $S_4$ . Las ecuaciones que modelan la conmutación de este convertidor se encuentra en el Anexo C.1

Se define la función de conmutación  $S_{ab}(t)$  como en la ecuación (3.18), la cual se obtiene a partir del desarrollo matemático del voltaje  $V_{an}(t)$  y  $V_{bn}(t)$ , ver Anexo C.1

$$S_{ab}(t) = S_1(t) - S_2(t) \quad (3.18)$$

Finalmente, el voltaje  $V_{ab}(t)$  se puede expresar de la siguiente manera

$$V_{ab}(t) = S_{ab}(t) \cdot V_{dc}(t) \quad (3.19)$$

Por balance de potencia se define la corriente de entrada  $I_{dc}(t)$  como,

$$I_{dc}(t) = S_{ab}(t) \cdot I_{ab}(t) \quad (3.20)$$

### C. Rectificador Fuente de Voltaje

Un rectificador de voltaje es un convertidor cuya función es transformar la variable independiente como lo es el voltaje de a.c a d.c., la topología se puede observar en la Fig. 3.11.

Al igual que en el caso anterior, al ser una topología monofásica estará constituida por cuatro transistores, los cuales a su vez forman dos piernas. Al ser una topología fuente de voltaje tiene un filtro RL a la entrada del convertidor, lado a.c, para limpiar el voltaje de entrada y disminuir la presencia de armónicas y presencia de *ripple*, mientras que a la salida tiene un filtro con configuración del tipo RC a modo de limpiar la señal de salida y disminuir la presencia de armónicos. Los parámetros utilizados para la modulación SPWM se pueden ver en la Tabla 3.3.

Al igual que en el caso del IVM, el control de los tiristores estará dado por una modulación de tipo SPWM donde la moduladora será una señal de tipo sinusoidal y su referencia una señal del tipo triangular dadas por las ecuaciones (3.16) y (3.17), respectivamente. El comportamiento de los switches y la función de conmutación para esta topología vuelve a ser la misma que para el IVM, ver Anexo C.1.

**Tabla 3.3 – Parámetros Modulación SPWM para Convertidor RVM**

Parámetro	Valor
$M$	0.9
$F$	50 [Hz]
$f_M$	$-10\pi/180$ [Hz]
$f_{n_{tr}}$	10 [Hz]
$\varphi_{tri}$	$-\pi/2$
$\varphi_M$	$0^\circ$

Para esta topología se define el voltaje de salida  $V_r(t)$ , ecuación (3.21) . Por balance de potencia se define la corriente  $I_{dc}(t)$ , ver ecuación (3.22).

$$V_r(t) = S_{ab}(t) \cdot V_{dc}(t) \quad (3.21)$$

$$I_{dc}(t) = S_{ab}(t) \cdot I_r(t) \quad (3.22)$$

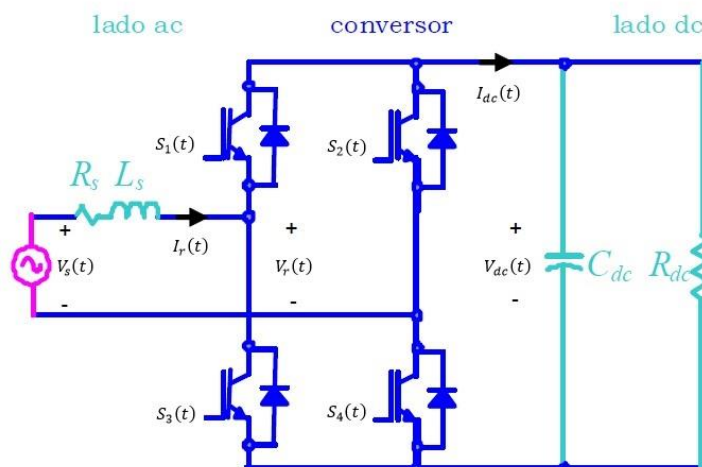


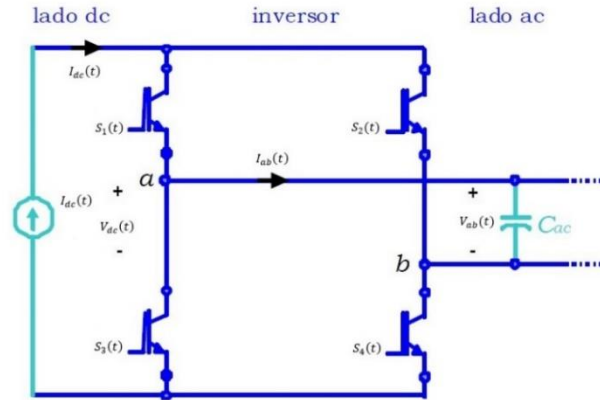
Fig. 3.11 – Representación circuital modelo RVM

#### D. Inversor Fuente de Corriente

Un inversor de corriente es un convertidor cuya función es transformar la variable independiente como lo es la corriente d.c a a.c, la topología se puede observar en la Fig. 3.12 constituido por cuatro transistores, equivalente a dos piernas. En la salida del inversor se puede observar la presencia de un capacitor a modo de filtro para alisar y/o disminuir la componente de *ripple* de la señal de salida a.c. Los parámetros utilizados para la modulación SPWM se pueden ver en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 – Parámetros Modulación SPWM para Convertidor ICM

Parámetro	Valor
$M$	0.9
$f$	50 [Hz]
$f_M$	0 [Hz]
$f_{ntr}$	10 [Hz]
$\varphi_{tri}$	$-\pi/2$
$\varphi_M$	$0^\circ$



**Fig. 3.12 – Representación Circuital Modelo ICM**

A diferencia de los casos anteriores, la modulación del ICM se diferencia de la anterior ya que los switches deben conmutar de tal forma que se logre una correcta obtención de la corriente de salida  $I_{ab}(t)$ . Se logra una correcta modulación SPWM a partir del uso de ecuaciones auxiliares las cuales al combinarlas generan los correctos pulsos de disparos para la modulación del inversor. Las ecuaciones auxiliares se basan en la comparación entre la moduladora y la triangular, ver Anexo C.2.

La función de conmutación sigue siendo la misma dada por la ecuaciones (3.18). Por otra parte, las ecuaciones (3.23) y (3.24) son las que rigen a esta topología.

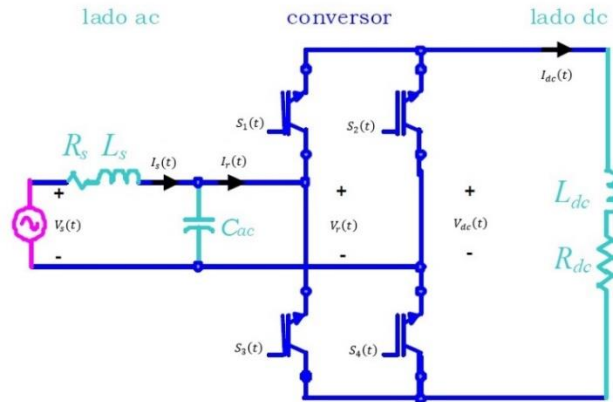
$$V_{dc}(t) = S_{ab}(t) \cdot V_{ab}(t) \quad (3.23)$$

$$I_{ab}(t) = S_{ab}(t) \cdot I_{dc}(t) \quad (3.24)$$

### **E. Rectificador Fuente de Corriente**

Un rectificador de corriente es un convertidor cuya función es transformar la variable independiente como lo es la corriente a.c a d.c, la topología se puede observar en la Fig. 3.13.

Al igual que en el caso del ICM, para lograr una correcta modulación SPWM se deben definir cuatro ecuaciones auxiliares las cuales al combinarlas generaran los pulsos de disparos correctos para la modulación del rectificador. Los parámetros utilizados para la modulación SPWM son los mismo utilizados para el IVM, ver Tabla 3.3. Al igual que en la topología anterior, la modulación SPWM se logra a través del uso de ecuaciones auxiliares, ver Anexo C.3



**Fig. 3.13 – Representación Circuital Modelo RCM**

La función de conmutación sigue siendo la misma dada por la ecuaciones (3.18) mientras que las ecuaciones (3.25) y (3.26) son las que rigen a esta topología.

$$I_r(t) = S_{ab}(t) \cdot I_{dc}(t) \quad (3.25)$$

$$V_{dc}(t) = S_{ab}(t) \cdot V_r(t) \quad (3.26)$$

### 3.3.2 Topologías Trifásicas de Convertidores Estáticos de Potencia

#### A. Introducción

Las topologías trifásicas a estudiar serán modelos de convertidores de puente completo los cuales consta de seis switches, los que a su vez agrupado de a pares forman las tres piernas del convertidor. Esta topología también denominada puente de Graetz tiene muchas ventajas con respecto a los arreglos monofásicos considerando que puede manejar altas potencias con mínimas distorsiones armónicas, eliminación de los desbalances a.c y d.c en los núcleos magnéticos de los transformadores de aislamiento.

#### B. Inversor Fuente de Voltaje

El objetivo de un inversor trifásico es la conversión de la energía eléctrica de corriente alterna a partir de una fuente de corriente continua, con magnitud y frecuencia controlada. Como se mencionó anteriormente, están constituidos por dispositivos electrónicos semiconductores de potencia los cuales trabajan como switches conmutando con una correcta secuencia entre sus zonas de corte y saturación

para la obtención de las curvas de voltaje de salida simétricas y balanceadas. Un Inversor trifásico generalmente se utiliza para los circuitos que requieren de una elevada potencia de salida.

Se comenzará estudiando la modulación SPWM para el inversor de voltaje trifásico. Similar al caso monofásico, se requiere de una triangular  $tri(t)$  y de tres moduladoras  $m_a(t, M)$ ,  $m_b(t, M)$  y  $m_c(t, M)$  para realizar la comparación para cada fase, ver ecuaciones (3.27), (3.28), (3.29) y (3.30) respectivamente. Los parámetros utilizados para la modulación SPWM se pueden ver en la Tabla 3.5

$$tri(t) = \frac{2}{\pi} \text{asin}(\sin(f_{n_{tr}} \cdot \omega_s \cdot t + f_M \cdot f_{n_{tr}} - \pi)) \quad (3.27)$$

$$m_a(t, M) = M \sin\left(\omega_s \cdot t + f_M - 0 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \quad (3.28)$$

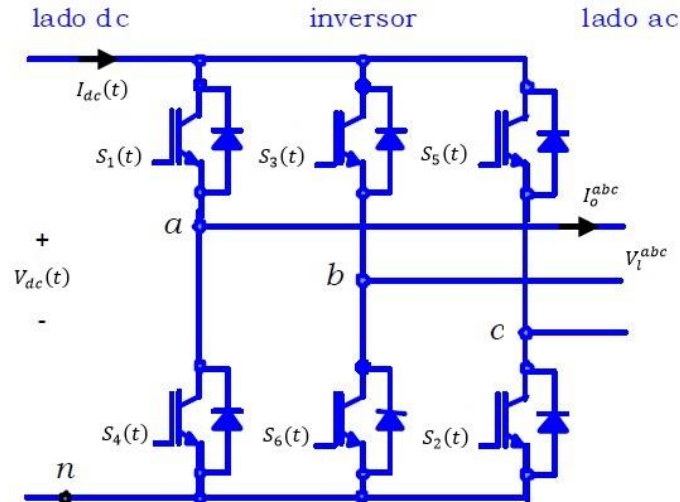
$$m_b(t, M) = M \sin\left(\omega_s \cdot t + f_M - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.29)$$

$$m_c(t, M) = M \sin\left(\omega_s \cdot t + f_M - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.30)$$

**Tabla 3.5 – Parámetros Modulación SPWM para Convertidor IVT**

Parámetro	Valor
$M$	0.9
$f$	50 [Hz]
$f_M$	0 [Hz]
$f_{n_{tr}}$	15 [Hz]
$\varphi_{Ma}$	0°
$\varphi_{Mb}$	120°
$\varphi_{Mc}$	-120°
$\varphi_{tri}$	$-\pi$

En la Fig. 3.14 se puede observar la topología para el IVT donde se observa la presencia de los 6 semiconductores que conforman a las tres piernas del inversor.



**Fig. 3.14 – Representación Circuital Modelo IVT**

Al igual que en los casos monofasicos, para lograr la conmutación entre los switches de esta topología se definen seis ecuaciones a partir de la comparación que se realiza en la modulación SPWM dando como resultados los estados lógicos de cada *switch*, ver Anexo C.4.

A partir de la conmutación de los switches se definen las funciones de conmutación para esta topología estarán dadas por las ecuaciones (3.31), (3.32) y (3.33).

$$S_{ab}(t) = S_1(t) - S_3(t) \quad (3.31)$$

$$S_{bc}(t) = S_3(t) - S_5(t) \quad (3.32)$$

$$S_{ca}(t) = S_5(t) - S_1(t) \quad (3.33)$$

### C. Rectificador Fuente de Voltaje

Para esta topología se tiene un voltaje de entrada alterno trifásico dado por la ecuación (3.34) el cual está escrito en forma vectorial. La topología de este convertidor se puede observar en la Fig. 3.16 donde se puede observar la presencia de un filtro en el lado a.c y en el lado d.c esto para limpiar las señales de entrada y salida del convertidor.

Por otra parte, la modulación SPWM corresponde a la definida en las ecuaciones (3.27), (3.28), (3.29) y (3.30); se mantiene la misma conmutación y las funciones de conmutación definidas para la topología IVT. Los parámetros utilizados para la modulación SPWM son los mismos de la topología IVT, ver Tabla 3.5.



$$v_s^{abc}(t) = \begin{pmatrix} \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \sin(\omega_s \cdot t) \\ \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \sin\left(\omega_s \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \sin\left(\omega_s \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

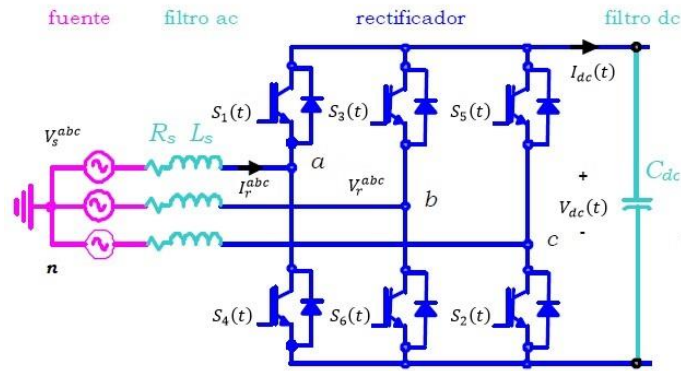


Fig. 3.15 – Representación Circuitual Modelo RVT

#### D. Inversor Fuente de Corriente

En la Fig. 3.16 se puede observar la representación circuitual de esta topología, se puede observar que en el lado a.c se presenta un arreglo de tres condensadores, uno para cada fase, para filtrar la señal de voltaje de salida y que esta sea lo más sinusoidal posible.

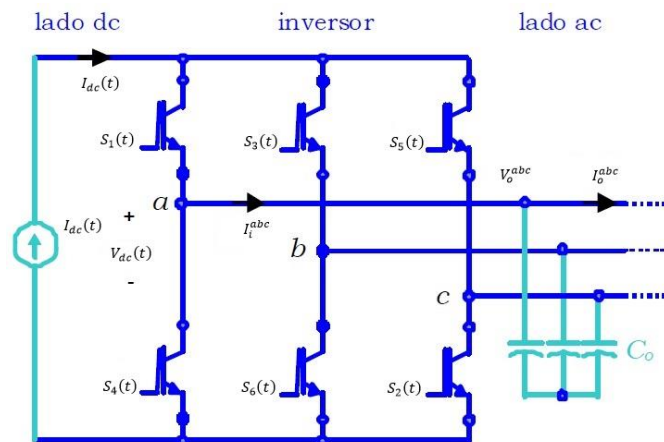


Fig. 3.16 – Representación Circuitual Modelo ICT

Como se estudió en la topología monofásica para el caso de las convertidores fuentes de corriente, se requiere del uso de ecuaciones auxiliares para lograr la correcta conmutación de los

switches, sin embargo, las topologías trifásicas no quedan exentas del uso de estas ecuaciones auxiliares, ver Anexo C.5, ya que si se usa la modulación estudiada para los casos de convertidores fuentes de voltaje se produce un desfase entre al moduladora y la señal de conmutación. Los parámetros utilizados para la modulación SPWM se pueden ver en la Tabla 3.6.

A partir de la conmutación de los switches se obtienen las funciones de conmutación para esta topología están dadas por las ecuaciones (3.35), (3.36) y (3.37).

$$S_a(t) = S_1(t) - S_4(t) \quad (3.35)$$

$$S_b(t) = S_3(t) - S_6(t) \quad (3.36)$$

$$S_c(t) = S_5(t) - S_2(t) \quad (3.37)$$

**Tabla 3.6 – Parámetros Modulación SPWM para Convertidor ICT**

Parámetro	Valor
$M$	0.9
$F$	50 [Hz]
$f_M$	0 [Hz]
$f_{ntr}$	15 [Hz]
$\varphi_{Ma}$	0°
$\varphi_{Mb}$	120°
$\varphi_{Mc}$	-120°
$\varphi_{tri}$	$-\pi/2$

### E. Rectificador de Corriente

La última topología trifásica en estudio corresponde al RCT. En la Fig. 3.17 se puede observar la representación circuital de esta topología y la presencia de filtros en el lado a.c y d.c los cuales cumplen la función de limpiar la señal de entrada y de salida respectivamente. Se puede observar la presencia de un filtro RLC el cual dará la característica de una ecuación de segundo orden debido a la presencia de dos componentes pasivos.

La modulación que rige el funcionamiento del RCT sigue siendo la misma estudiada para el caso del ICT. Mientras que las funciones de conmutación también se conservan, ecuaciones (3.35), (3.36) y (3.37). Los parámetros utilizados para la modulación SPWM se pueden ver en la Tabla 3.6.

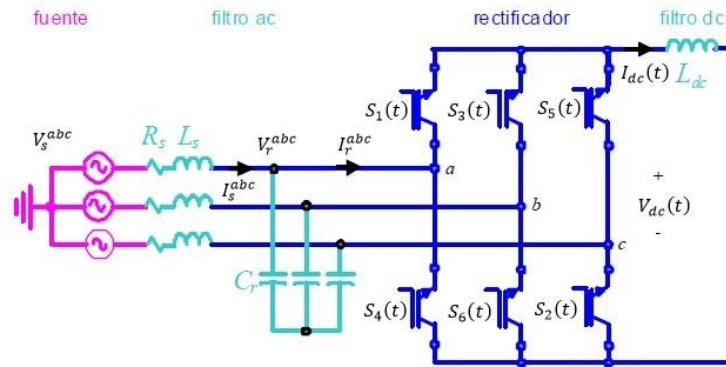


Fig. 3.17 – Representación circuital modelo RCT

### 3.3.3 Topologías Multiniveles de Convertidores Estáticos de Potencia

#### A. Introducción

Como se vio anteriormente, existen distintas topologías para la conversión de la energía ya sea de d.c a a.c o de a.c a d.c. En este apartado se estudiará el concepto de convertidores estáticos multiniveles, sus ventajas y desventajas de la conversión multinivel y el análisis y estudio de la topología con diodo anclado al neutro comúnmente llamada topología NPC además de sus técnicas de control para conmutación. Dentro de esta topología se dará énfasis al estudio de los inversores multiniveles NPC debido a su gran uso en la industria

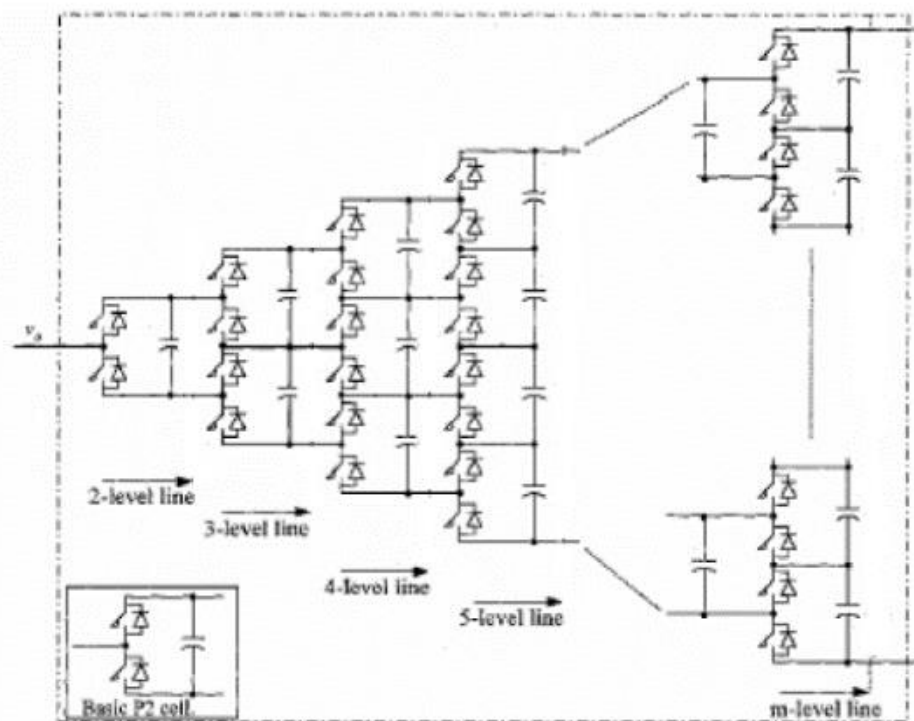
#### B. ¿Qué se entiende por convertidor estático multinivel?

La técnica de conversión multinivel se considera un área joven en el campo de la conversión de energía, presentando unas expectativas que hacen pensar en un gran potencial para una más amplia aplicación en el futuro.

Los convertidores multiniveles incluyen un arreglo de semiconductores de potencia y capacitores como fuentes de voltaje, la señal de salida se caracteriza por tener una forma de onda escalonada debido a la conmutación de los interruptores a distintos tiempos, a su vez el tamaño de la forma de onda a la salida crecerá debido a la suma de los voltajes de los capacitores y los niveles que

posee esta forma de onda escalonada dependerá del número de interruptores de potencia. Los valores de tensión generados tienen una componente menor de THD.

En la Fig. 3.18 se puede observar la estructura de un inversor multinivel generalizado donde cada componente (diodo, semiconductor, condensador) soporta una tensión  $\frac{V_{dc}}{(n-1)}$ , donde  $n$  es el número de niveles del convertidor. A partir de esta topología se pueden derivar diversas topologías como lo son la NPC, el FC con distintos números de niveles o el clásico inversor de dos niveles.



**Fig. 3.18 – Estructura de un inversor multinivel generalizado**

Los convertidores estáticos multiniveles tienen dos grandes ventajas, la primera es que permiten alcanzar una mayor tensión para el semiconductor sin recurrir en la serialización de semiconductores, a su vez se produce un aumento en la potencia del convertidor sin haber paralelizado semiconductores lo que disminuye las pérdidas por conducción y conmutación en el convertidor. La segunda ventaja de esta topología es la disminución en el THD del circuito ya que al aumentar los niveles es posible obtener un mejor control de la corriente en el convertidor. La importancia de lo anterior radica en la reducción en el tamaño de los filtros de salida.

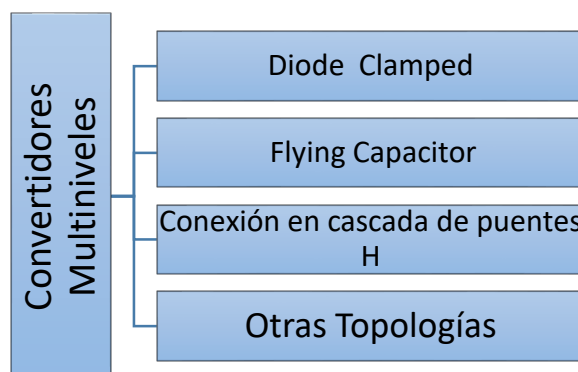
Por otra parte, existen algunos convertidores estáticos multiniveles que permiten la obtención de una frecuencia aparente de salida mayor a la frecuencia de conmutación de los semiconductores utilizados en el convertidor. El aumento de niveles de tensión en un convertidor estático multinivel se obtiene mediante dos formas; la primera es mediante el uso de puntos intermedios de bus y la segunda es mediante el uso de capacitores en serie.

Como aplicación industrial, la tecnología multinivel se puede adaptar fácilmente a accionamientos convencionales de velocidad fija o bien en aquellos accionamientos de alta potencia cuyos motores no tienen aislación reforzada, es decir, su aislación no está diseñada para incorporar accionamientos estáticos en su sistema.

Dentro de los convertidores multiniveles clásicos se encuentran tres topologías, estas son:

- NPC: Conecta dos diodos al punto medio de bus para obtener un nivel de tensión adicional, en concreto la tensión del punto intermedio del bus.
- FC: Utiliza capacitores para sumar o restar la tensión de la misma a la tensión del bus y así obtener un mayor número de niveles de tensión.
- CHB: Conecta en serie puentes en H para obtener más niveles de tensión.

Lo anterior se puede agrupar de forma general de la siguiente manera, ver Fig. 3.19 :



**Fig. 3.19 – Topología de los convertidores multiniveles**

Dentro de las desventajas de los convertidores multiniveles se encuentra el incremento de la complejidad del control para el convertidor a medida que se aumenta el número de niveles (más de 7). Por otra parte, si la obtención de diferentes niveles de tensión de entrada se da mediante el uso de

capacitores la tensión en este componente debe permanecer constante o equilibrada en cualquier condición de trabajo, con el objeto que cada capacitor actúe como una fuente de tensión constante, lo que en la práctica se hace difícil.

En la Tabla 3.7 se hace la comparación de las características de las topologías básicas mencionadas anteriormente para  $n$  niveles.

**Tabla 3.7 – Características de las Topologías Multiniveles Básicas**

Topología / Concepto	Diodo Clamped	Flying Capacitor	Cascaded Full- H Bridge
Interruptores con diodo en antiparalelo	$6(n - 1)$	$6(n - 1)$	$6(n - 1)$
Diodos independientes con posibles tensiones de bloqueo diferentes	$6(n - 2)$	0	0
Diodos independientes (asociación serie con misma tensión de bloqueo)	$3(n - 1)(n - 2)$	0	0
Capacidades con diferentes tensiones	$n - 1$	$3n - 5$	$(3n/2) - 1.5$ $(3n/2) - 2$
Numero de capacidades (con igual tensión nominal)	$n - 1$	$(n - 1) + \left(\frac{(n - 1)(n - 2)}{2}\right)$	$(3n/2) - 1.5$ $(3n/2) - 2$
Tensión de bloqueo de los interruptores	$\frac{V_{pn}}{n - 1}$	$\frac{V_{pn}}{n - 1}$	$V_{cc}$ (tensión de entrada de una etapa)
Numero de niveles de tensión compuesta a la salida	$2n - 1$	$2n - 1$	$2n - 1$
Numero de niveles de la tensión simple a la salida	$4n - 3$	$4n - 3$	$4n - 3$

### C. Convertidor multinivel del tipo NPC

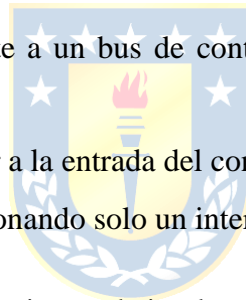
El concepto de topología multinivel surgió por primera vez a partir del inversor de tres niveles presentado por Nabae et al. en 1980 y es considerado como el origen de la conversión multinivel reciente. Esta topología ha sido el más ampliamente estudiado y aplicado en el conjunto de las topologías de convertidores estáticos de potencia a su vez ha sido la primera topología multinivel puesta en práctica.

A medida que se aumente el número de niveles de tensión, aumentará el número de componentes en la topología. Un inversor de  $n$  niveles de tensión contará con  $(n - 1)$  condensadores en la parte continua cuya función es bloquear una tensión  $\frac{V_{dc}}{n-1}$ . Por otra parte, los diodos deben soportar diferentes rangos de tensión inversa ya que su función es bloquear la tensión de más de un condensador, en

función del estado de conmutación. Como cada diodo debe soportar un rango de tensión igual al rango de tensión máximo en cada pierna, el número de diodos que se requieren en cada fase estará dado por  $(n - 1) \cdot (n - 2)$ . Como la cantidad de componentes depende exclusivamente del número de niveles  $n$  a implementar esta topología se hace poco eficiente de implementar para un número elevado de niveles. Por lo tanto, la recuperación inversa de los diodos y la limitación que conlleva es el principal inconveniente de esta topología.

Las ventajas de la topología Diode-clamped o NPC son:

- La tensión de bloqueo de los interruptores es la tensión de una capacidad de entrada,  $\frac{V_{pn}}{n-1}$ , donde  $V_{pn}$  es el voltaje del bus de entrada continua y  $n$  el número de niveles.
- El número de capacitancias requeridas es menor en comparación a otras topologías multiniveles. Esto conlleva a una gran ventaja en cuanto a la disminución en los costos de implementar una topología NPC
- Se pueden conectar directamente a un bus de continua, sin la necesidad de crear otro bus adicional.
- No requiere de un transformador a la entrada del convertidor
- Cambio de un estado a otro accionando solo un interruptor.



Mientras que las desventajas y/o inconvenientes de implementar un NPC son:

- Esta topología requiere de diodos de alta velocidad que deben ser capaces de soportar corrientes máximas y estar sometidos a un gran estrés de recuperación inversa.
- En topologías de más de tres niveles, los diodos de fijación requieren bloquear diferentes tensiones, en función de su posición en el convertidor, siendo la tensión máxima de bloqueo  $\frac{V_{pn}(n-2)}{n-1}$  lo que hace necesario la asociación en serie de diodos que soporten una mayor tensión. En el caso de utilizar diodos con la misma capacidad de bloqueo que los interruptores del convertidor,  $\frac{V_{pn}}{n-1}$ , se requieren  $(n - 1) \cdot (n - 2)$  diodos por fase. De lo anterior, el número de diodos de fijación aumenta cuadráticamente con el número de niveles, complicando el diseño, incrementando el costo y disminuyendo la fiabilidad del convertidor. Si el número de niveles es grande, el número de diodos requeridos puede llegar a impedir la realización física del convertidor, además de incrementar inductancias parasitas y coste. De esto se extiende que

el número de niveles máximo para implementar de buena manera este convertidor es de 7 a 9 niveles en la práctica.

- Se debe mantener el equilibrio en las tensiones de las capacidades en todo instante de funcionamiento complicando de esta forma el control del convertidor. Es por esto que mantener este equilibrio se dificulta conforme se incrementa el número de niveles, incluso puede ser imposible en algunas condiciones de operación del convertidor. Para topologías de más de tres niveles, la regulación del equilibrio de tensión es un tema todavía sin resolver.

#### D. Técnicas de modulación para convertidores multiniveles

En la Fig. 3.21 se muestra un esquema con las clasificaciones de las distintas estrategias de conmutación utilizadas en los convertidores estáticos multiniveles, en función de la frecuencia de conmutación de los interruptores.

Dentro de los objetivos principales de las técnicas de modulación para convertidores d.c/a.c están la regulación de la amplitud y frecuencia de salida, la minimización de los contenidos armónicos de la tensión de salida del inversor y mantener el equilibrio de las tensiones instantáneas de los capacitores presentes en la topología multinivel en el caso de ser requerido. Sin embargo, puede ser un punto interesante a estudiar que la estrategia de conmutación a utilizar pueda cumplir con requisitos adicionales por ejemplo en el caso de los motores de corriente alterna donde se desea la cancelación de la tensión de modo común entregada por el convertidor con el propósito de minimizar el efecto de las corrientes parasitas que circulan por los rodamientos y que disminuyen la vida útil del convertidor.

No obstante, en este apartado nos enfocaremos en el estudio de la modulación PWM la cual ha sido la utilizada hasta el momento en todas las simulaciones llevadas a cabo.

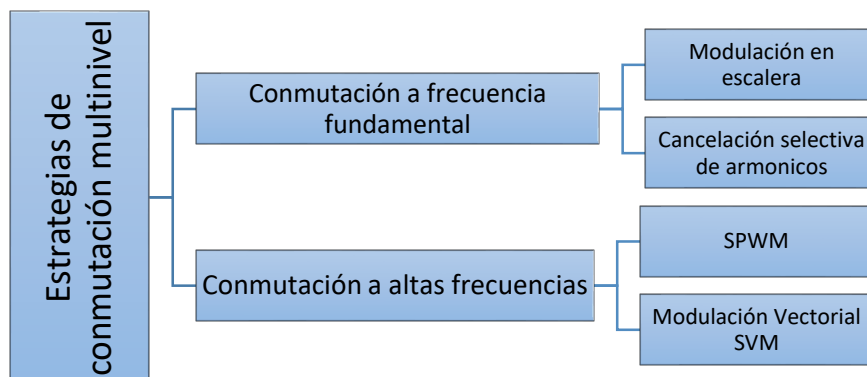


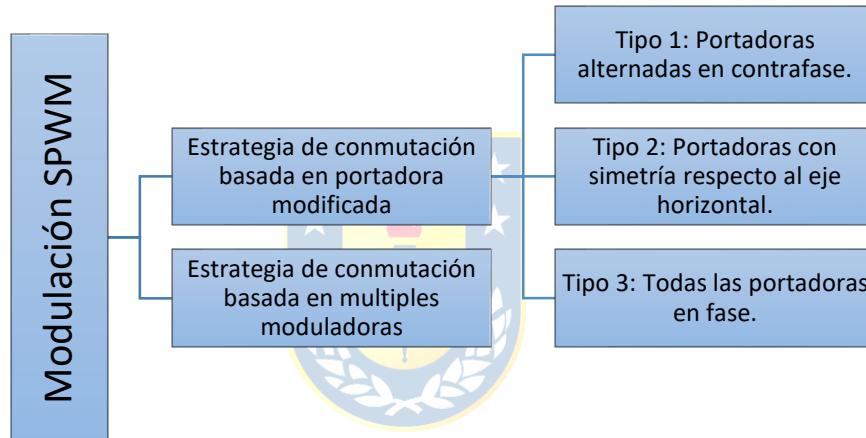
Fig. 3.20 – Estrategias de Conmutación para Topologías de Convertidores Estáticos multiniveles



## D ..1 Modulación SPWM

La modulación SPWM es una de las técnicas de modulación más estudiadas y utilizadas en aplicaciones industriales debido a su simplicidad de implementación y a los buenos resultados que entrega los que garantizan un buen funcionamiento en todas las condiciones de trabajo.

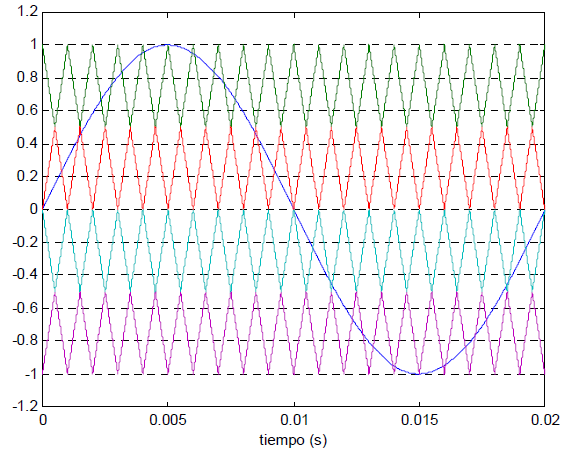
Consiste principalmente en comparar una señal de naturaleza senoidal, denominada moduladora, con una señal portadora, la cual generalmente es de naturaleza triangular, en algunos casos del tipo diente de sierra o trapezoidal. La comparación entre estas dos señales da como resultado la conmutación de los semiconductores del convertidor estático. Es considerada una técnica de modulación bastante flexible ya que permite emplear diferentes tipos de moduladoras y/o portadoras, los cuales se pueden clasificar en dos grandes bloques, Fig. 3.21



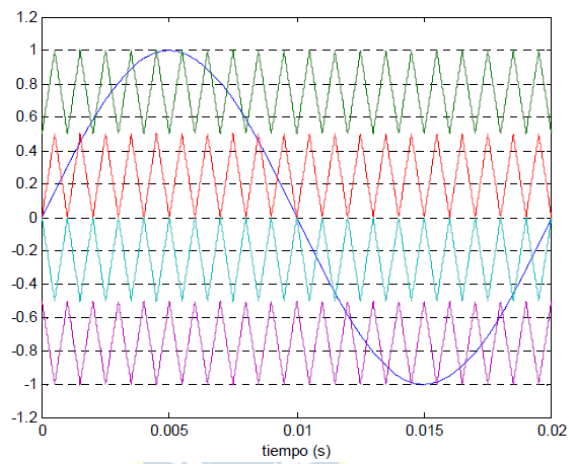
**Fig. 3.21 – Estrategias de modulación SPWM**

En las Fig. 3.22, Fig. 3.23 y Fig. 3.24 se pueden observar las gráficas para la estrategia de conmutación basada en portadoras modificadas de tipo 1, tipo 2 y tipo 3 respectivamente. En cualquier de los tres casos, cuando el índice de modulación es alto no hay diferencia entre los tres tipos de portadoras.

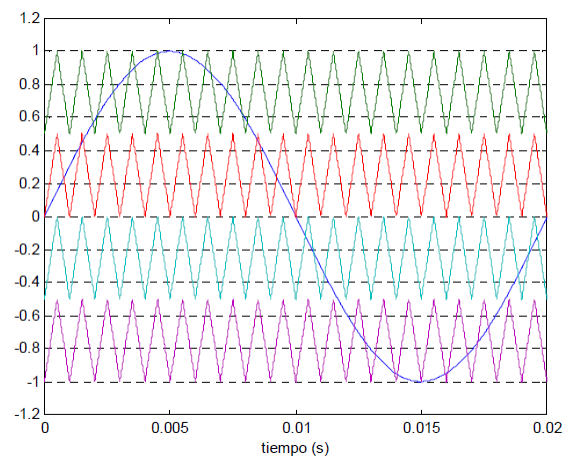
Por otra parte, la estrategia de modulación basada en múltiples moduladoras se basa en el uso de varias moduladoras, señales sinusoidales, y una única portadora triangular. En la Fig. 3.25 se puede observar la modulación para un convertidor de tres niveles. Con respecto a otras modulaciones, este tipo de modulación no presenta el problema de pulso mínimo y ofrece un mejor contenido armónico cuando se trabaja a bajo índice de con respecto a otras modulaciones.



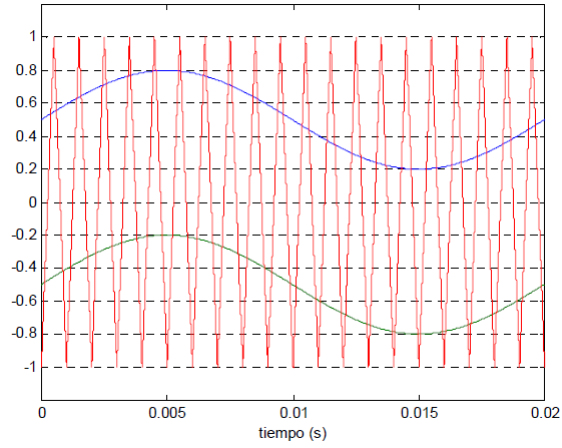
**Fig. 3.22 – Tipo 1: Portadoras Alternadas en Contrafase para un Inversor de Cinco Niveles**



**Fig. 3.23 – Tipo 2: Portadora con Simetría Respecto al Eje Horizontal para Inversor de Cinco Niveles**



**Fig. 3.24 – Tipo 3: Todas las Portadoras en Fase para Inversor de Cinco Niveles.**



**Fig. 3.25 – Topología de los Convertidores Multiniveles**



## Capítulo 4. Desarrollo de Librerías en Simulink® para el Equipo OPAL – RT®

### 4.1. Introducción

Como se mencionó anteriormente, para llevar a cabo una simulación en el equipo OPAL – RT® se debe simular el diagrama en bloques del modelo a estudiar mediante Simulink®, simulación que posteriormente se enlazara con el programa RT – LAB®.

### 4.2. Como Crear y Agregar una Biblioteca al Explorador de Bibliotecas de Simulink®

Para el desarrollo de las librerías para el equipo OPAL – RT®, Simulink® da la opción de crear una y, opcionalmente, agregarla al explorador de bibliotecas de Simulink®.

Lo primero es abrir la librería de Simulink® ubicada en la barra de inicio de Matlab®, Fig. 4.1. Se abrirá el buscador de la librería de Simulink®, ver Fig. 4.2, en su barra de tareas se encuentra la opción de *new model*, *new library* y *from template*, se escoge la opción *new library* la cual abrirá una ventana en blanco con formato archivo .SLX para comenzar la creación de la nueva biblioteca, ver Fig. 4.3.



Fig. 4.1 – Barra de inicio de Matlab®

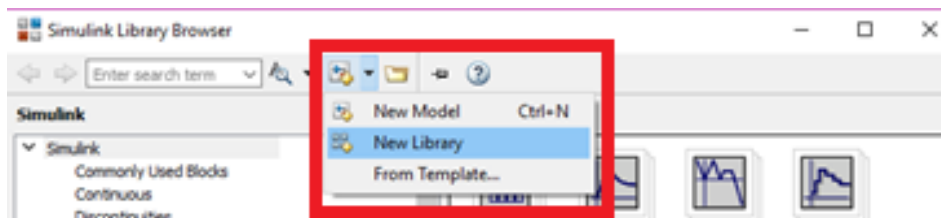
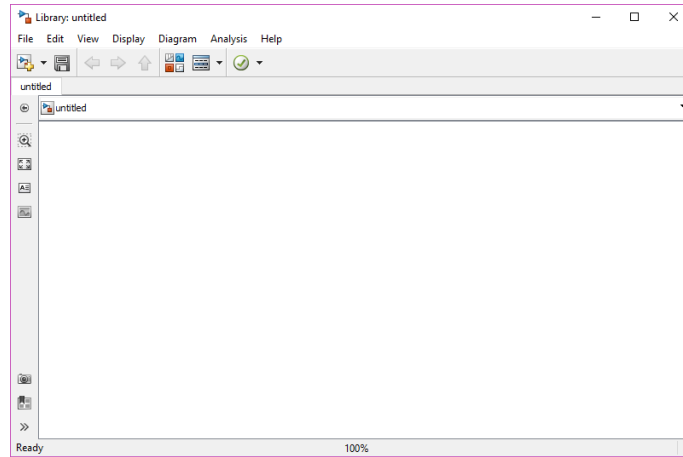


Fig. 4.2 – Ventana de Simulink® en el Library Browser



**Fig. 4.3 – Archivo en Blanco para Comenzar a Crear una Librería en Simulink®**

Una vez creado el archivo de biblioteca se procede a guardar el archivo con su extensión *.SXL*. Para agregar la biblioteca creada, la librería debe ser guardada en una carpeta en la ruta Matlab®. De lo contrario, guarde el archivo en una ubicación donde los modelos que usan los bloques de biblioteca puedan acceder a él.

Luego, se debe generar una función *sbblocks* en su ruta Matlab® para que el archivo de librería creado aparezca en la librería de Simulink® y se agregue al navegador. Cabe destacar que para que esta librería sea cargada automáticamente en la librería de Simulink® al abrir Matlab®, ya sea desde *RT – LAB®* o directamente, se debe modificar el archivo *startup.m* ubicado en la carpeta de instalación de la versión de Matlab®. El código de la función *sbblocks* y el procedimiento para cargar el archivo automáticamente se puede revisar en el Anexo B.2 y B.3 respectivamente.

## **4.3. Desarrollo de Librerías para Topologías de Paneles Solares Fotovoltaicos**

### **4.3.1 Introducción**

En el siguiente apartado se desarrolla la librería del modelo simplificado del panel solar fotovoltaico. Como se mencionó en el capítulo 3, se selecciona este modelo para desarrollar su librería debido a su simplicidad y a su exactitud en las respuestas con respecto al modelo SMD, ver Fig. 3.8 y Fig. 3.9.

### 4.3.2 Librería para la Topologías Simplificada del Panel Solar Fotovoltaico

En la Fig. 4.4 se puede observar la librería para el Modelo Simplificado del Panel Solar Fotovoltaico estudiado en el capítulo 3. En la Fig. 4.5 se ve el bloque en detalle donde las entradas a este bloque son los parámetros  $n, T^\circ, N_{sc}, V_{oc}$  e  $I_{sc}$ , mientras que las salidas del bloque serán la corriente  $I_{PV\_simpl}$  y el voltaje  $V_{PV}$ . La estructura interna y diseño del bloque se observa en la Fig. 4.6 en la cual se implementó la ecuación (3.15), para acceder a ella debe seleccionar el bloque y apretar el botón derecho, ir a *mask* y luego a la opción *look under mask*. Esto se puede realizar en todos los modelos de las librerías desarrolladas en este trabajo.

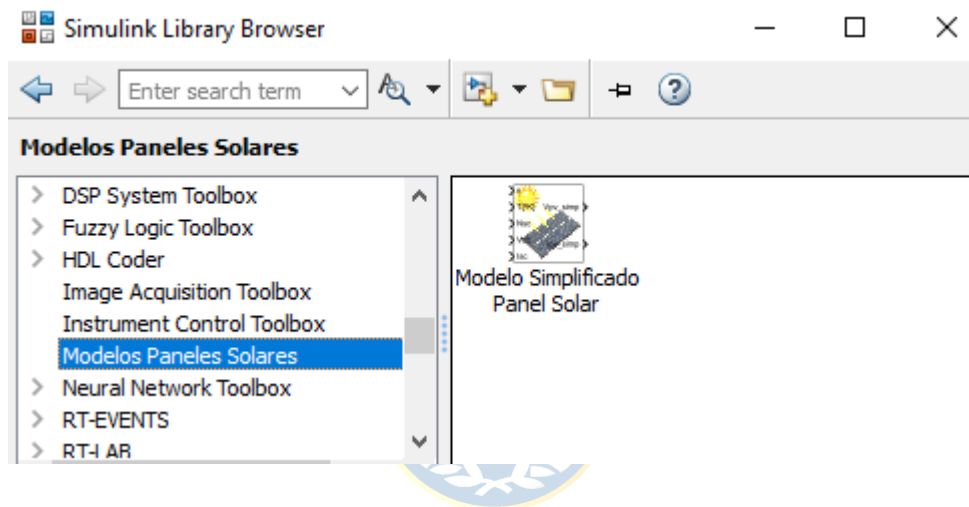


Fig. 4.4 – Librería Simulink® Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico



Fig. 4.5 – Bloque de Librería en Simulink® para Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico

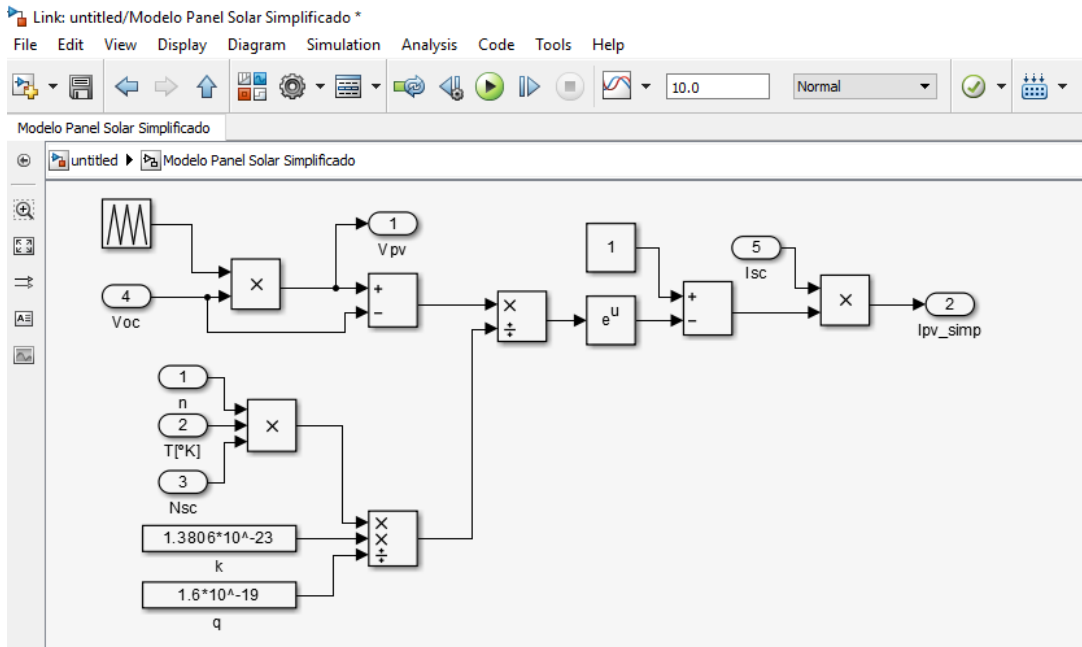


Fig. 4.6 – Estructura Interna del Bloque de Librería del Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico

## 4.4. Desarrollo de Librerías para Topologías de Convertidores Estáticos de Potencia

### 4.4.1 Introducción

A continuación, se presentan las librerías para las topologías de convertidores estáticos de potencia estudiados en el capítulo 3, a su vez se estudiarán la estructura interna de cada bloque a fin de que el usuario pueda estudiar y/o entender la dinámica del bloque a usar. Como varias topologías presentan ecuaciones en común se decidió agrupar los bloques de librerías según su función, lo anterior se puede observar en el diagrama de bloques de la Fig. 4.7.

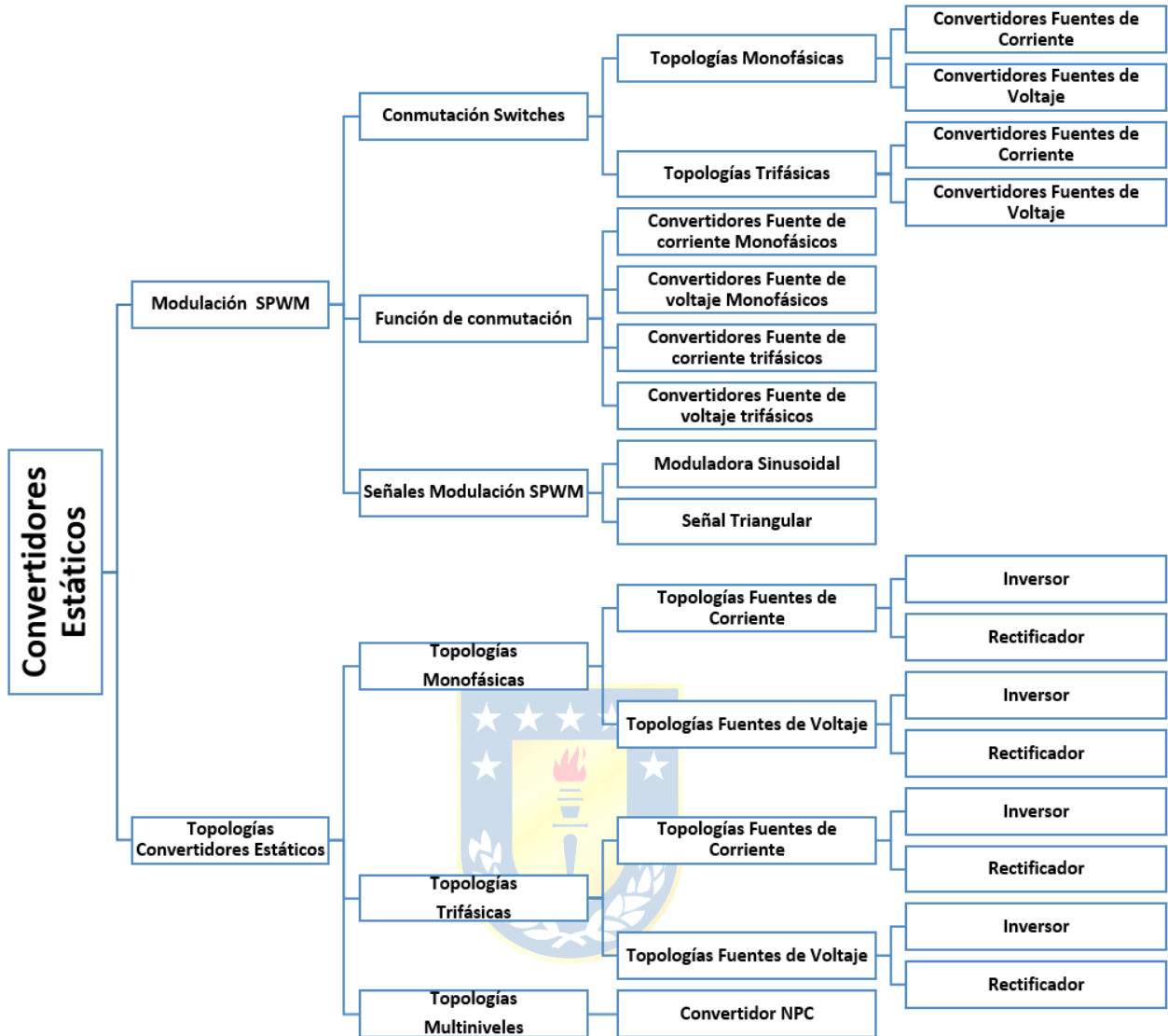


Fig. 4.7 – Diagrama organizacional librería Convertidores Estáticos en Simulink®

#### 4.4.2 Librería Modulación SPWM

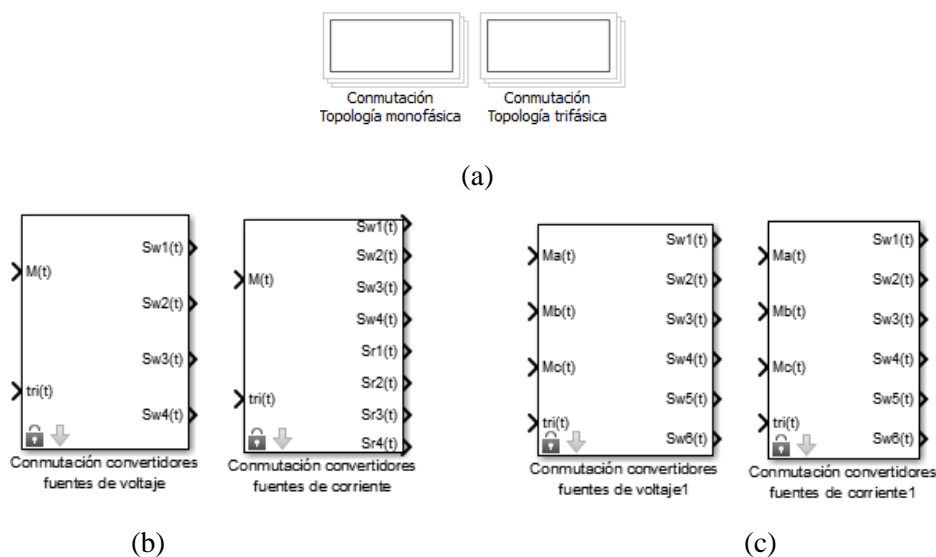
Como se observa en el diagrama de bloques de la Fig. 4.7, la librería de Modulación SPWM contiene tres sub-librerías:

1. Conmutación Switches
2. Función de conmutación
3. Señales Modulación SPWM



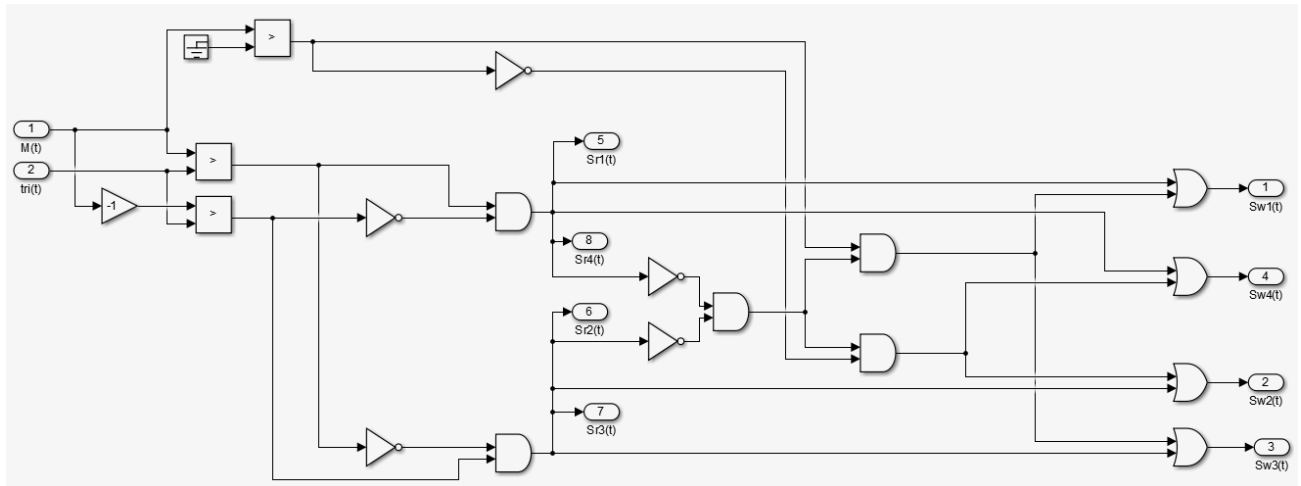
Los bloques presentes en estas sub-librerías se pueden observar en las Fig. 4.8 , Fig. 4.13 y Fig. 4.18, respectivamente, los cuales fueron construidos a partir de las ecuaciones estudiadas en el capítulo 3.

Por otra parte, la estructura interna de cada uno de estos bloques para el caso de la conmutación de los switches se muestra en las Fig. 4.9, Fig. 4.10 , Fig. 4.11 y Fig. 4.12 en los cuales se implementaron las ecuaciones del Anexo C.2, C1, C.4 y C.3 respectivamente. La estructura interna de los bloques de las funciones de conmutación se observa en las Fig. 4.14 para los convertidores fuentes de corriente monofásicos donde se implementó la ecuación (3.18), Fig. 4.15 corresponde a la función de conmutación para los convertidores fuentes de corriente basados en la ecuación (3.18). por otra parte, para los convertidores trifásicos fuentes de corriente las ecuaciones de sus funciones de conmutación (3.31), (3.32) y (3.33) se muestra en la Fig. 4.16 y para los convertidores fuente de voltaje cuyas ecuaciones correspondientes a la función de conmutación son (3.35), (3.36) y (3.37) se puede observar en la Fig. 4.17. Finalmente en las Fig. 4.19 y Fig. 4.20 se muestra la estructura interna de los bloques correspondientes a la librería señales modulación SPWM en donde se implementaron las ecuaciones (3.16) y (3.17). respectivamente. Cabe destacar que, por un tema de compatibilidad con el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>, este solo acepta datos del tipo *double*, es por ello que en las funciones de conmutación de los convertidores se ocupan los bloques de conversión, Fig. 4.14, Fig. 4.15, Fig. 4.16 y Fig. 4.17.

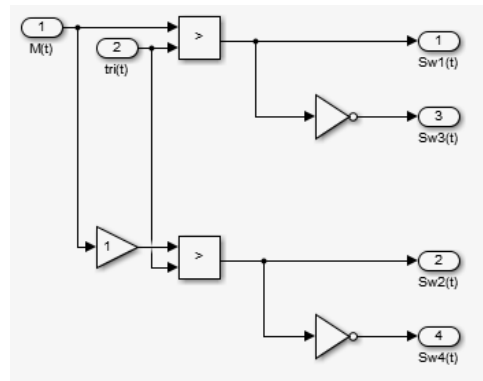


**Fig. 4.8 – Librería Conmutación de Convertidores Estáticos**

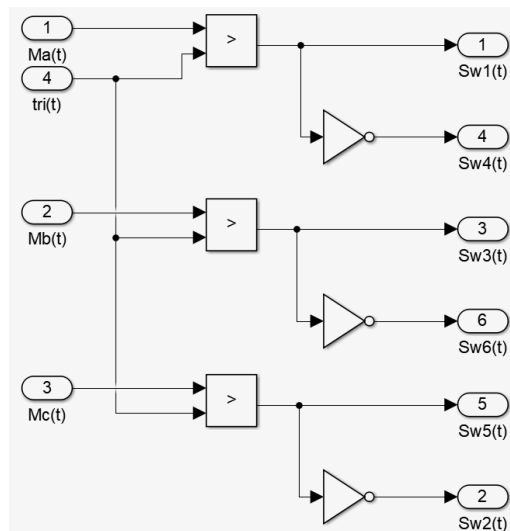
(a)Biblioteca Conmutación Switches; (b) Bloques Librería Conmutación Switches Topologías Monofásicas; (c) Bloques Librería Conmutación Switches Topologías Trifásicas



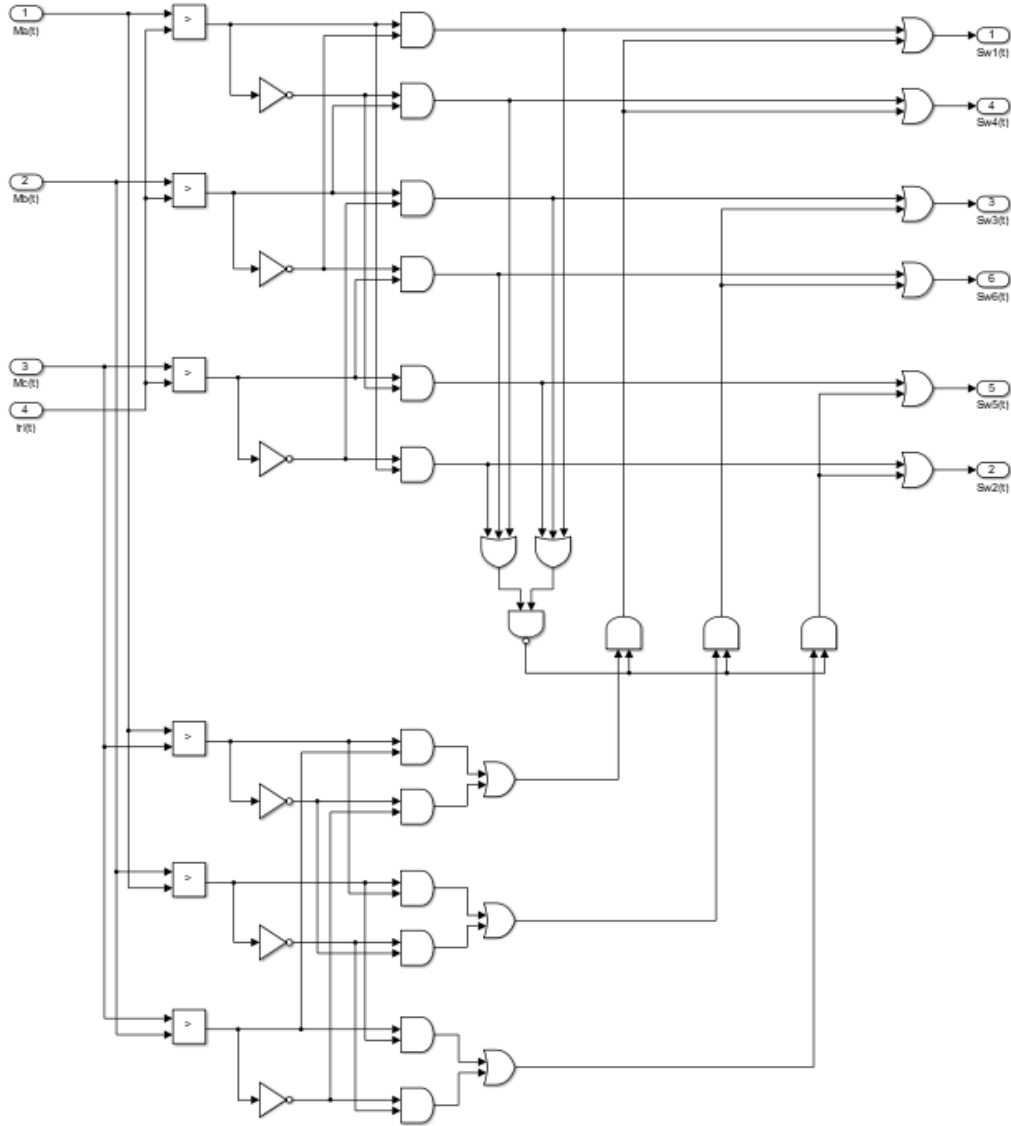
**Fig. 4.9 – Estructura Interna Bloques Librería Conmutación Convertidor Fuente de Corriente Monofásico**



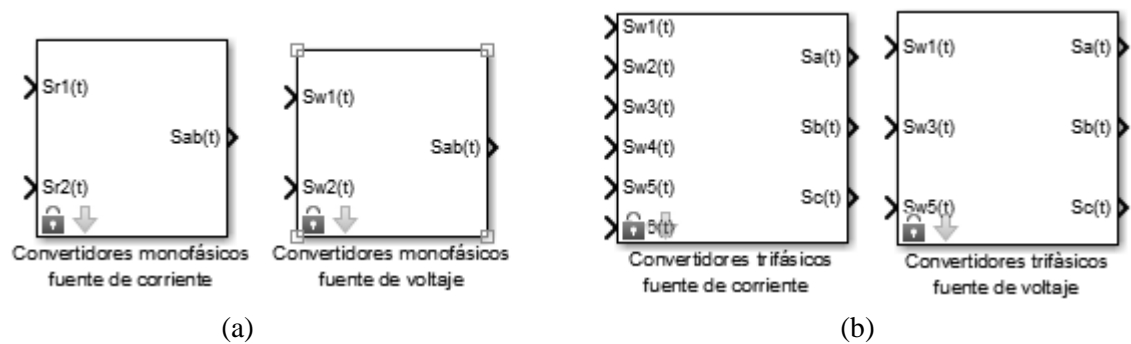
**Fig. 4.10 – Estructura Interna Bloques Librería Conmutación Convertidor Fuente de Voltaje Monofásico**



**Fig. 4.11 – Estructura Interna Bloques Librería Conmutación Convertidor Fuente de Voltaje Trifásico**

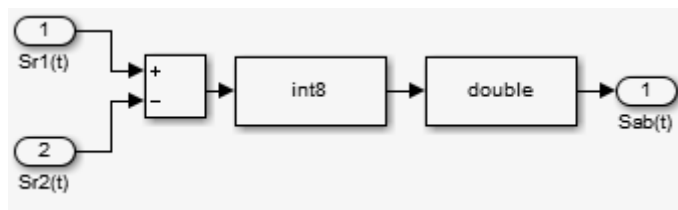


**Fig. 4.12 – Estructura Interna Bloques Librería Conmutación Convertidor Fuente de Corriente Trifásico**

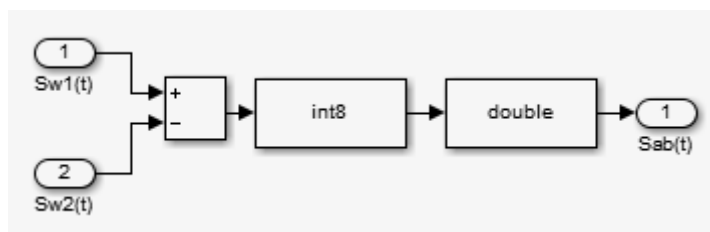


**Fig. 4.13 – Librería Funciones de Conmutación**

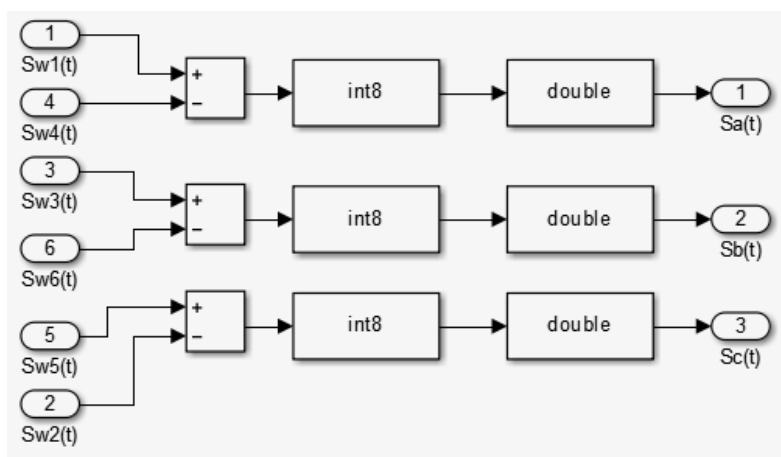
(a) Bloques Librería Función de Conmutación Topología Monofásica, (b) Bloques Librería Función de Conmutación Topología Trifásica



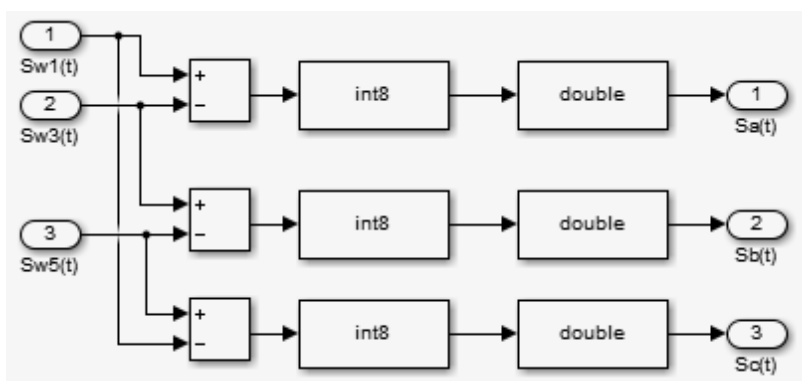
**Fig. 4.14 – Estructura interna bloques librería Función de conmutación convertidor fuente de corriente monofásico**



**Fig. 4.15 – Estructura Interna Bloques Librería Función de Conmutación Convertidor Fuente de Voltaje Monofásico**



**Fig. 4.16 – Estructura Interna Bloques Librería Función de Conmutación Convertidor Fuente de Corriente Trifásico**



**Fig. 4.17 – Estructura Interna Bloques Librería Función de Conmutación Convertidor Fuente de Voltaje Trifásico**

### Librería Modulación SPWM

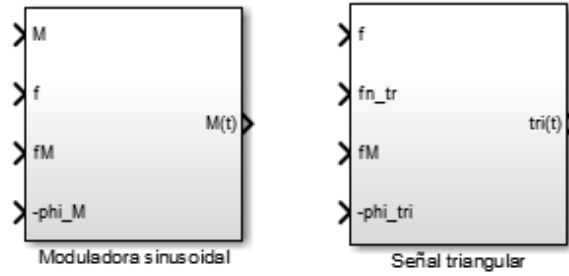


Fig. 4.18 – Bloques Librería Modulación SPWM

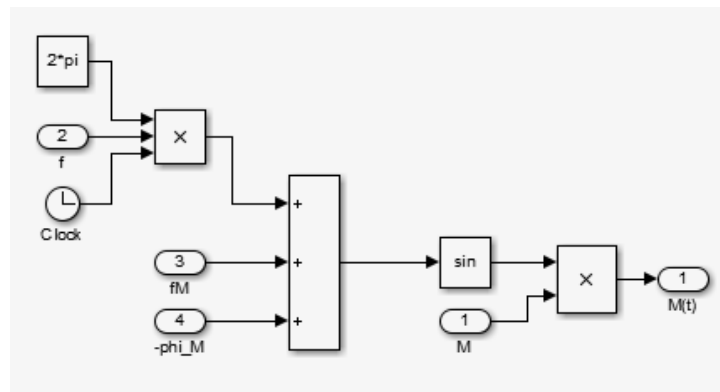


Fig. 4.19 – Estructura Interna Bloques Librería Modulación SPWM, Moduladora Sinusoidal

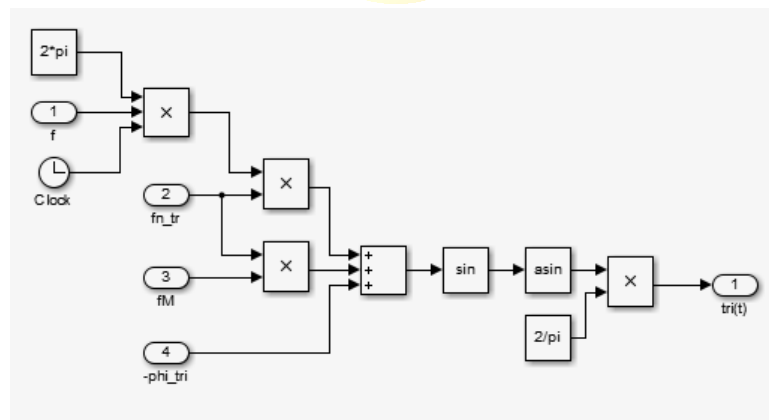


Fig. 4.20 – Estructura Interna Bloques Librería Modulación SPWM, Señal Triangular

### 4.4.3 Librerías Topologías Convertidores Estáticos

Como se observa en el diagrama de bloques de la Fig. 4.7, la librería para las Topologías de Convertidores Estáticos contiene tres sub-librerías:

1. Topologías Monofásicas
2. Topologías Trifásicas
3. Topologías Multiniveles

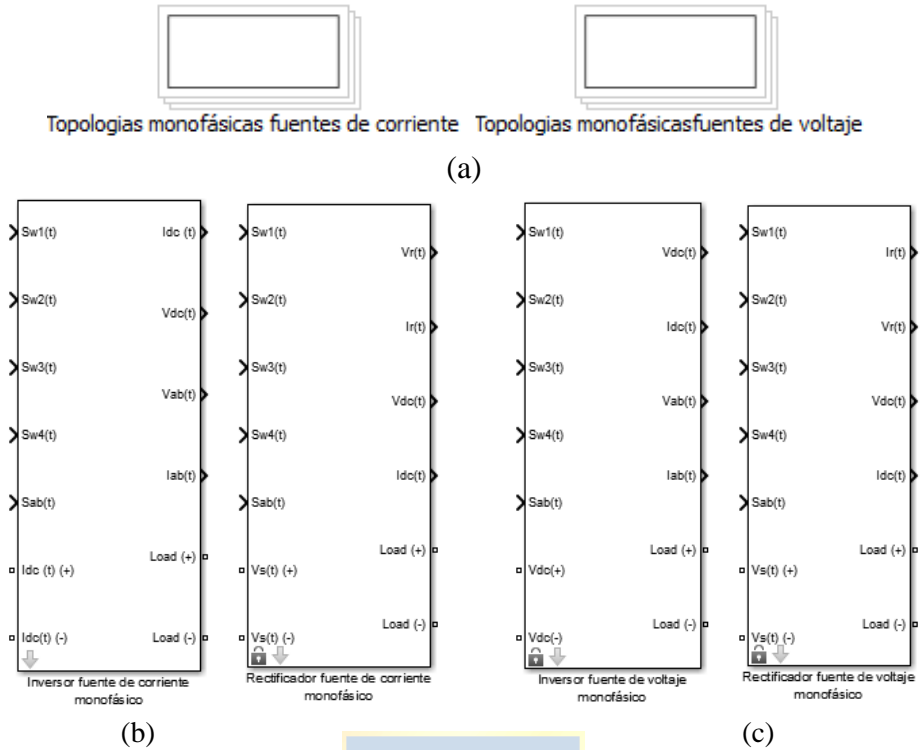
Los bloques presentes en cada una de estas sub-librerías junto con sus estructuras internas se detallarán a continuación.

#### A. Topologías Monofásicas

En la Fig. 4.21 se puede observar los cuatro bloques que constituyen a la librería de convertidores estáticos monofásicos, correspondientes a inversor y rectificador fuentes de corriente e inversor y rectificador fuente de voltaje.

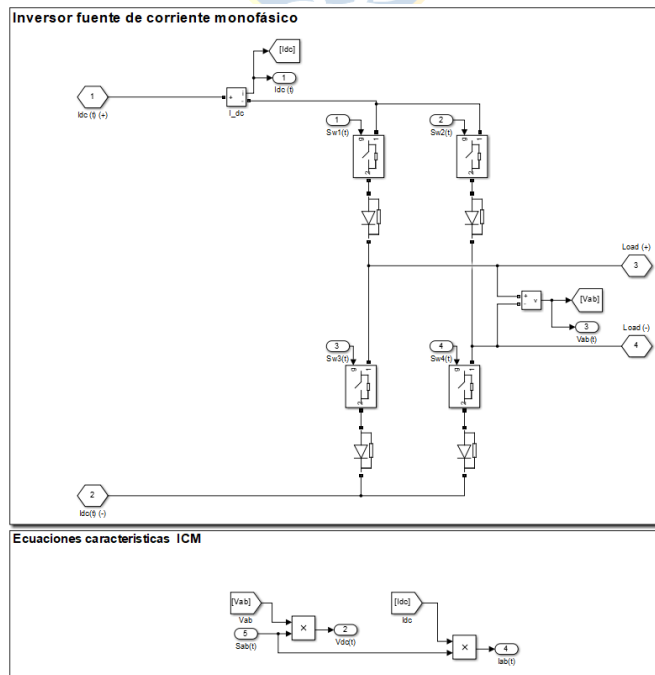
En las Fig. 4.22, Fig. 4.23, Fig. 4.24 y Fig. 4.25 se puede observar la estructura interna de cada uno de los bloques correspondientes a las topologías de convertidores estáticos monofásicos ya mencionadas. En ellas se puede observar la presencia de puertas de comunicación a la entrada y salida del convertidor cuya función es actuar como puerto de conexión física con lo que se desee conectar como fuente de alimentación y/o carga a modo que el usuario modele su convertidor a libre albedrío. También es posible observar la presencia de las dos piernas de los convertidores monofásicos, cada una constituida por dos switches ideales. A su vez se incorporaron medidores de corriente y voltaje a la entrada y salidas del convertidor de forma que el usuario pueda realizar una medición directa desde la salida del bloque.

Cabe destacar que de los modelos matemáticos de estas topologías fue posible simular sus ecuaciones características y obtener algunas de las señales de los convertidores.



**Fig. 4.21 – Librería Topología Monofásica de Convertidores Estáticos**

(a) Biblioteca Topologías Monofásicas de Convertidores Estáticos; (b) Bloques Librería Convertidores Estáticos Topologías Monofásicas Fuente de Corriente; (c) Bloques Librería Convertidores Estáticos Topologías Monofásicas Fuente de Voltaje



**Fig. 4.22 - Bloques librería Convertidores Estáticos, Inversor Fuente de Corriente Monofásico**

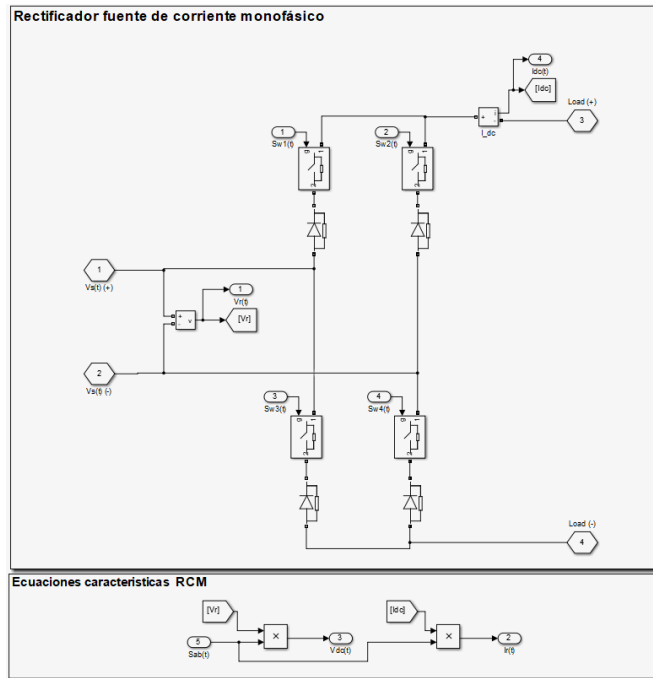


Fig. 4.23 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Rectificador de Corriente Monofásico

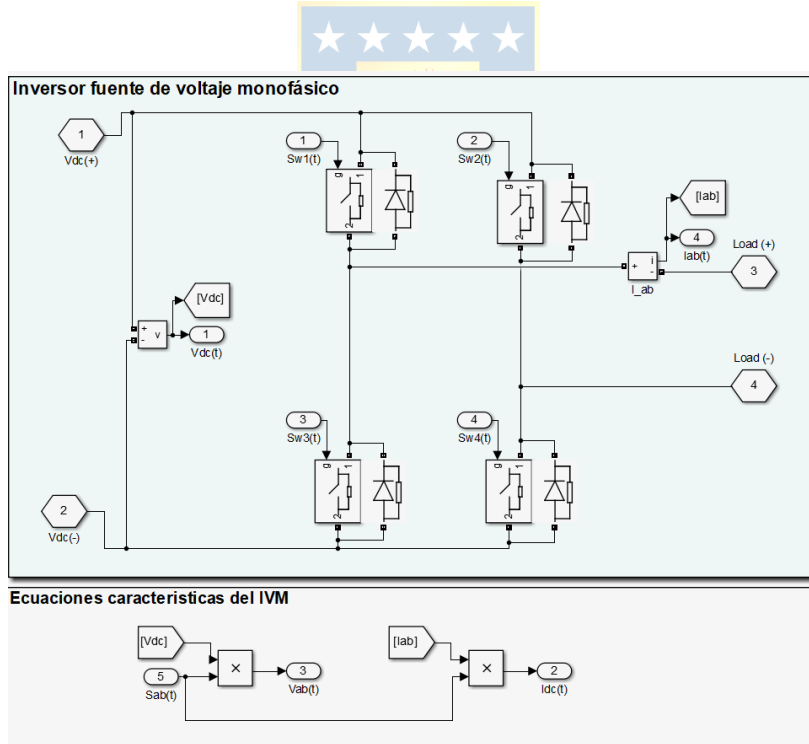
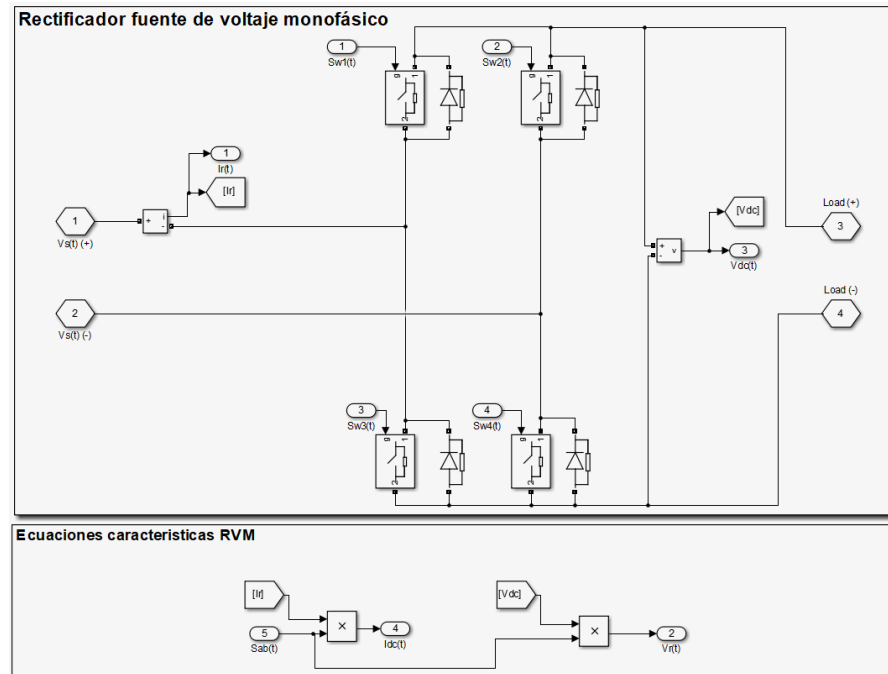


Fig. 4.24 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Inversor Fuente de Voltaje Monofásico



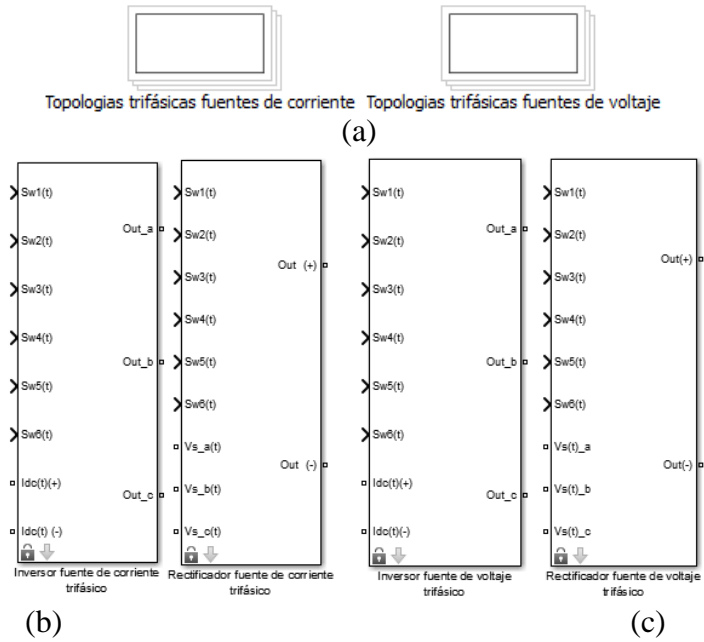


**Fig. 4.25 - Bloques Librería Convertidores Estáticos. Rectificador Fuente de Voltaje Monofásico**

## B. Topologías Trifásicas

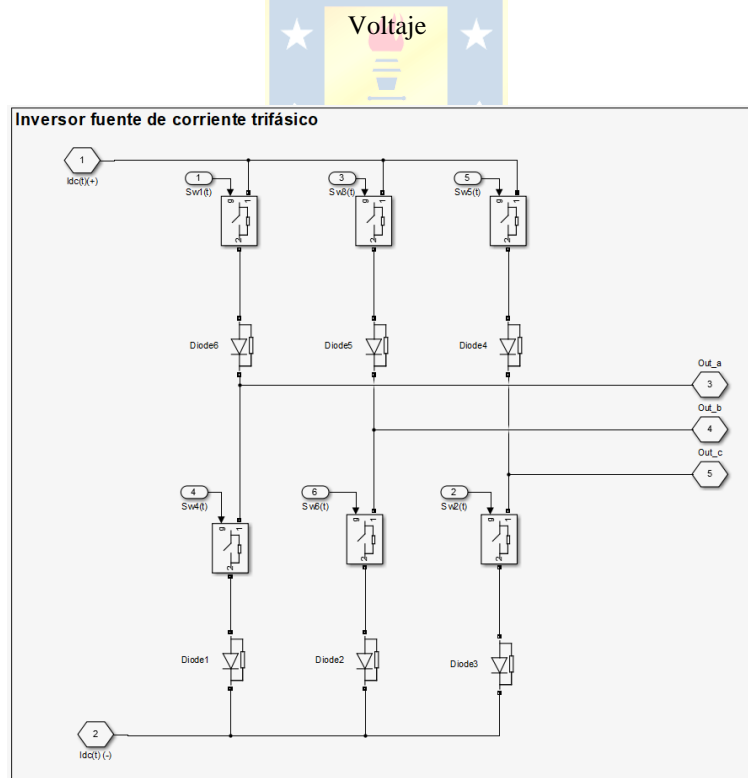
En la Fig. 4.26 se puede observar los cuatro bloques que constituyen a la librería de convertidores estáticos trifásicos, correspondientes a inversor y rectificador fuentes de corriente e inversor y rectificador fuente de voltaje.

En las Fig. 4.27, Fig. 4.28, Fig. 4.29 y Fig. 4.30 se puede observar la estructura interna de cada uno de los bloques correspondientes a las topologías de convertidores estáticos trifásicos ya mencionados. Al igual que en el caso monofásico se puede observar la presencia de puertos de comunicación a la entrada y salida del convertidor cuya función es actuar como puerto de conexión física con lo que se desee conectar como fuente de alimentación y/o carga a modo que el usuario modele su convertidor a libre albedrío. También es posible observar la presencia de las tres piernas de los convertidores trifásicos, cada una constituida por dos switches ideales. A su vez se incorporaron medidores de corriente y voltaje a la entrada y salidas del convertidor de forma que el usuario pueda realizar una medición directa desde la salida del bloque.

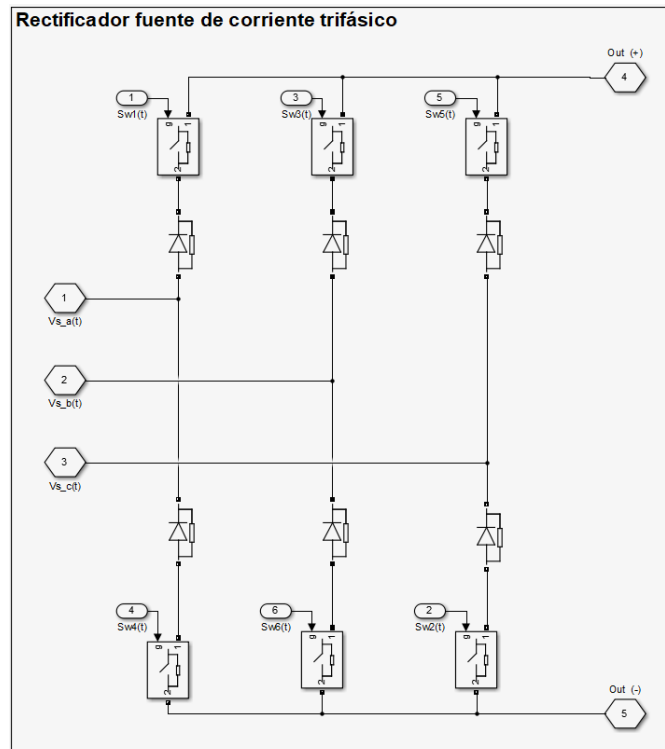


**Fig. 4.26 - Librería Topología Trifásica de Convertidores Estáticos**

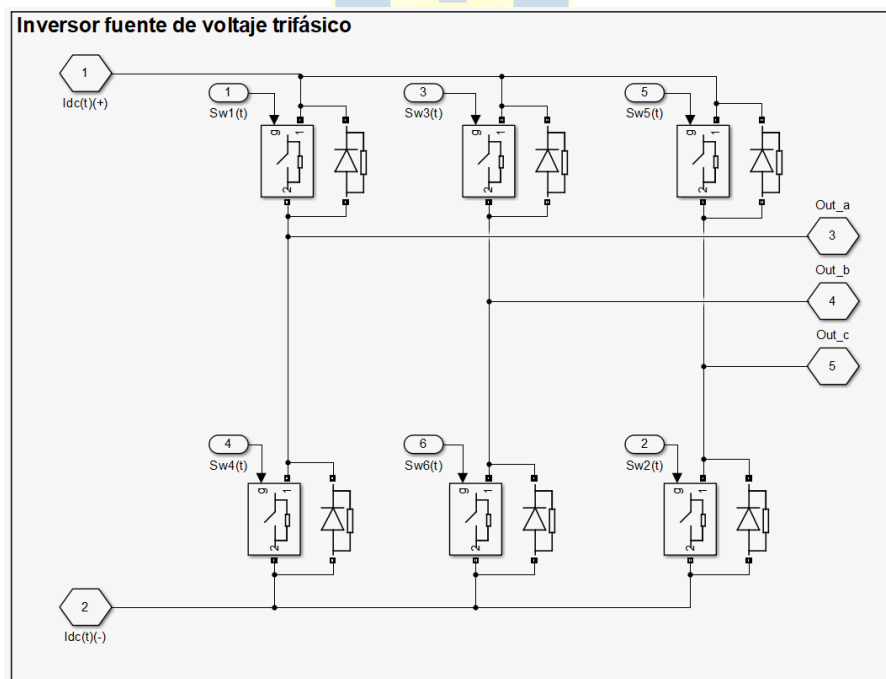
(a)Biblioteca Topologías Trifásicas de Convertidores Estáticos; (b) Bloques Librería Convertidores Estáticos Topologías Trifásicas Fuente de Corriente; (c) Bloques Librería Convertidores Estáticos Topologías Trifásicas Fuente de



**Fig. 4.27 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Inversor Fuente de Corriente Trifásico**



**Fig. 4.28 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Rectificador Fuente de Corriente Trifásico**



**Fig. 4.29 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Inversor Fuente de Voltaje Trifásico**

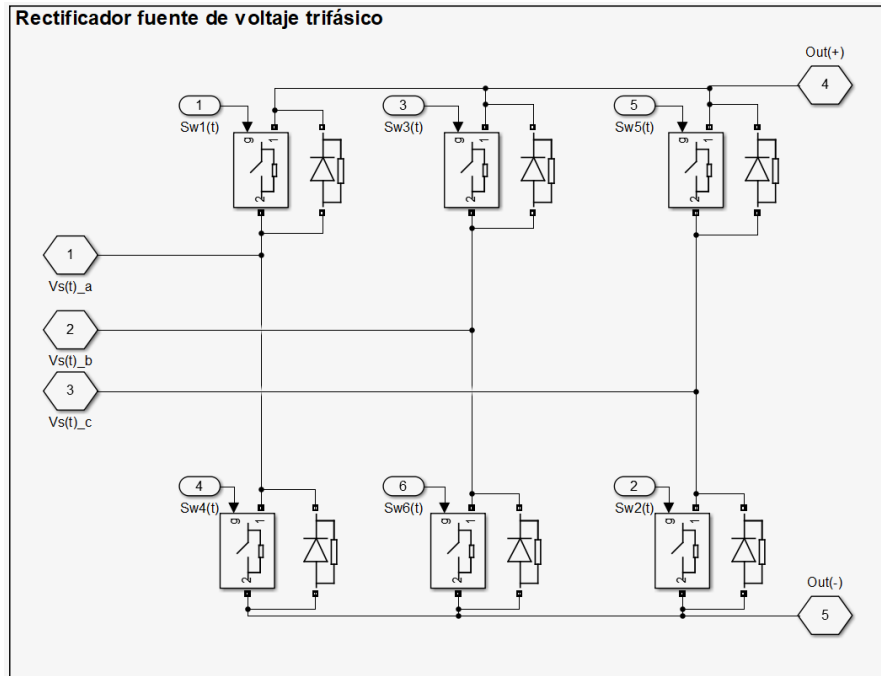


Fig. 4.30 - Bloques Librería Convertidores Estáticos, Rectificador Fuente de Voltaje Trifásico

### C. Topologías Multiniveles

Como se mencionó anteriormente, la librería de la topología multinivel a desarrollar corresponde a la celda básica para construir un convertidor NPC de n niveles, con n el número de niveles. Además, se desarrollará un bloque de modulación SPWM para un convertidor NPC trifásico de tres niveles.

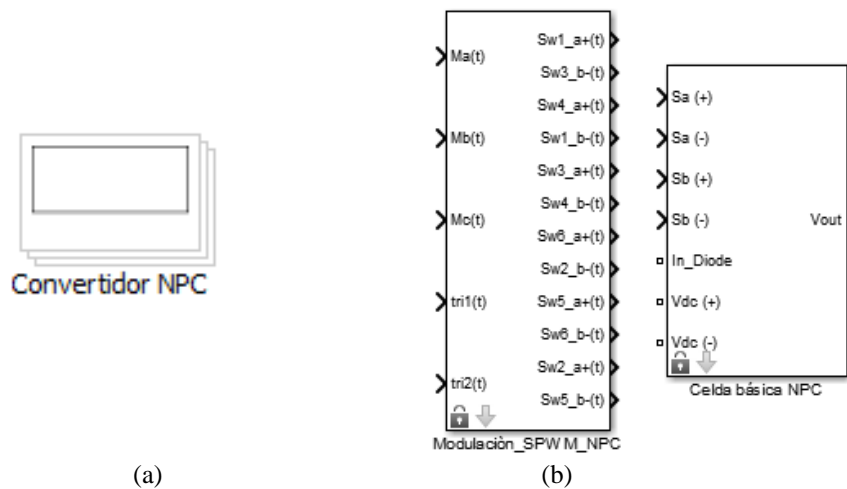


Fig. 4.31 – Librería Topología NPC Convertidor Multinivel

(a) Clasificación Biblioteca Topologías NPC Convertidor Multinivel; (b) Bloques Librería Convertidores Estáticos Topología NPC

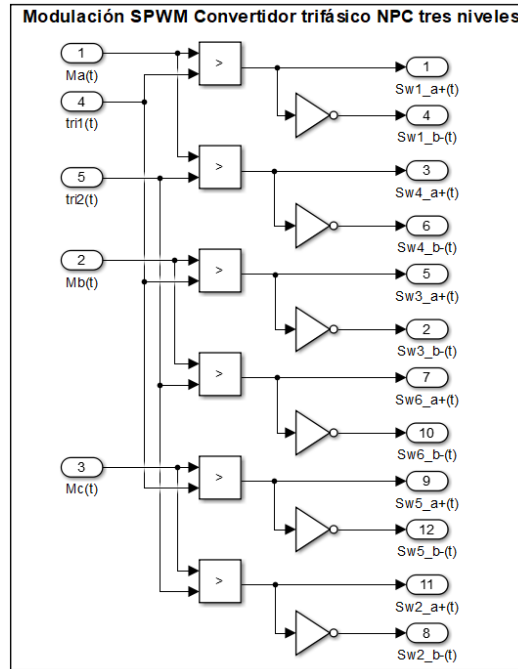


Fig. 4.32 - Bloques Librería Modulación SPWM Convertidores Estáticos Topología NPC Trifásico Tres Niveles

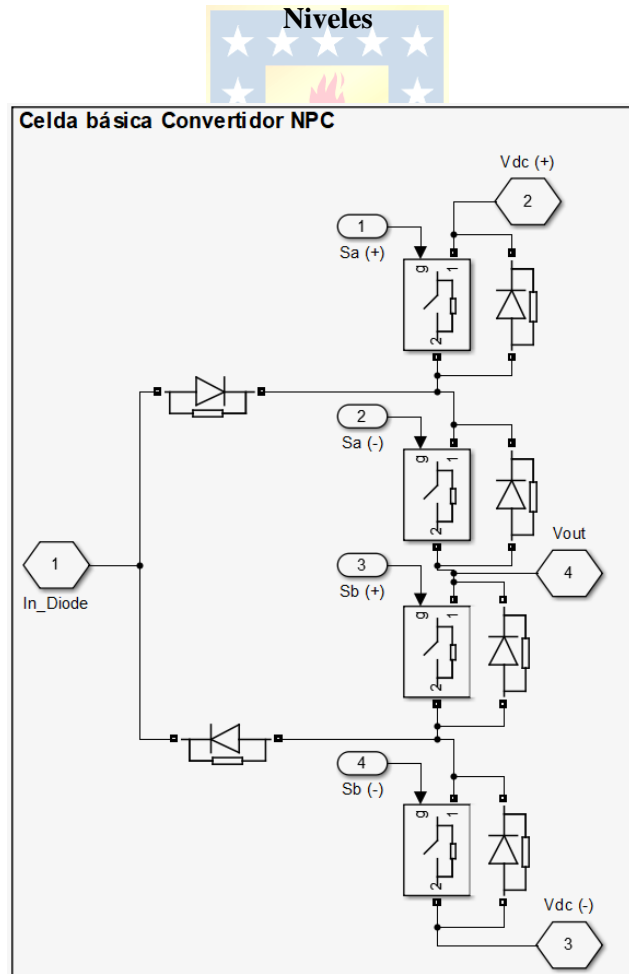


Fig. 4.33 - Bloques Librería Celda Básica Convertidores Estáticos Topología NPC

# Capítulo 5. Simulaciones Utilizando las Librerías Desarrolladas en Simulink® para el Equipo OPAL – RT®

---

## 5.1. Introducción

En el siguiente capítulo se presentan los contraste entre las simulaciones obtenidas mediante los softwares PSIM®, Mathcad® y las simulaciones obtenidas en Simulink® utilizando las librerías desarrolladas para las simulaciones en el equipo OPAL – RT®. Cabe destacar que las simulaciones realizadas en Simulink® son las que posteriormente se enlazaran con el software RT – LAB® para la obtención de las curvas en tiempo real por lo que si se logra llevar a cabo la obtención de las curvas en Simulink® el modelo debería funcionar sin ningún problema al momento de cargarlo en el equipo OPAL – RT®.

Es de suma importancia realizar estas comparaciones para validar las respuestas de simulación de otros softwares más alcanzables para los estudiantes versus el costo de adquisición de un equipo como lo es OPAL – RT®.

## 5.2. Simulaciones En PSIM®, Mathcad® y Simulink®

En el software Mathcad® se llevó a cabo la simulación del modelo simplificado del panel solar fotovoltaico mientras que en el software PSIM® se simularon las topologías de convertidores estáticos a modo de contrastarlas con las curvas obtenidas para las simulaciones de las mismas topologías en Simulink® mediante el uso de las librerías desarrolladas para simular en tiempo real en el equipo OPAL – RT®.

Se comenzará con la simulación del modelo simplificado del panel solar fotovoltaico, luego con las simulaciones de las topologías monofásicas y trifásicas de convertidores estáticos de potencia y finalmente presentar las curvas obtenidas para la topología multinivel de un inversor NPC de tres niveles.

### 5.2.1 Modelo Simplificado del Panel Solar Fotovoltaico

En las Fig. 5.1 y Fig. 5.2 se presentan las simulaciones obtenidas a partir de la simulación en Simulink<sup>®</sup> utilizando al librería desarrollada para este modelo. Estas curvas se contrastaron con las obtenidas mediante la simulación en Mathcad<sup>®</sup>, ver Fig. 3.6 y Fig. 3.7, en ellas se puede observar que ambas simulaciones responden de igual forma ante los mismos parámetros de entrada lo que nos acerca aún más a obtener una simulación en tiempo real al momento de cargar el modelo en el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>.

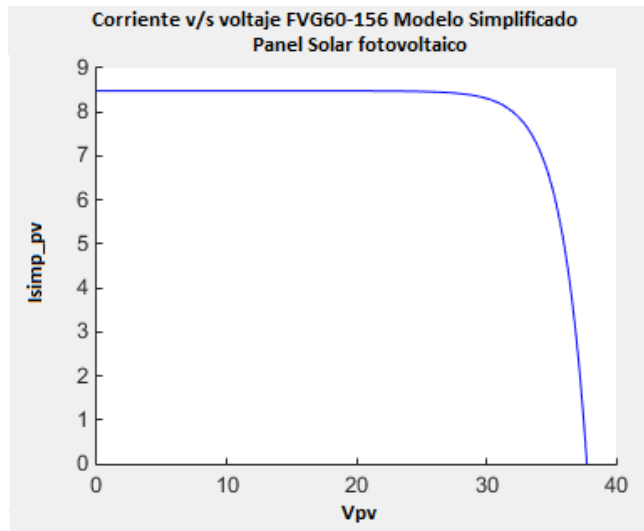


Fig. 5.1 – Curva de Corriente v/s Voltaje del Panel Solar FVG 60-156 Simulación RT – LAB<sup>®</sup>

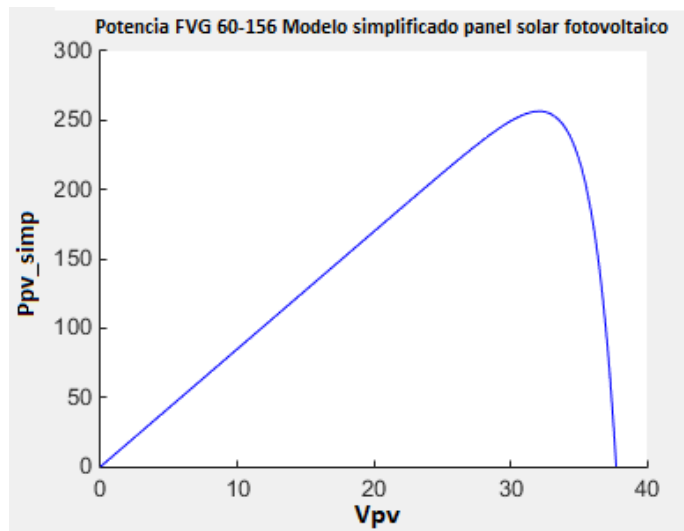


Fig. 5.2 – Curva de Potencia del Panel Solar FVG 60-156 Simulación RT – LAB<sup>®</sup>

## 5.2.2 Convertidores Estáticos de Potencia Monofásicos

Siguiendo con la comparación de los modelos ahora es el turno de los convertidores estáticos de potencia comenzando con las topologías monofásicas. Se realizaron las simulaciones en el *software PSIM*<sup>®</sup> obteniéndose las curvas características de cada topología para luego compararlas con las simulaciones realizadas en *Simulink*<sup>®</sup> utilizando los bloques de librerías diseñados y presentados en el capítulo 4. Todas las gráficas se obtuvieron en condiciones estacionarias de los modelos.

### A. Inversor Fuente de Voltaje Monofásico

La primera topología a estudiar corresponde a la del IVM comenzando con el circuito simulado en *PSIM*<sup>®</sup> y su respectivas curvas características. Seguido se presentaran las simulaciones obtenidas en *Simulink*<sup>®</sup>. Los valores de los componentes utilizados en las simulaciones se puede ver en la Tabla 5.1.

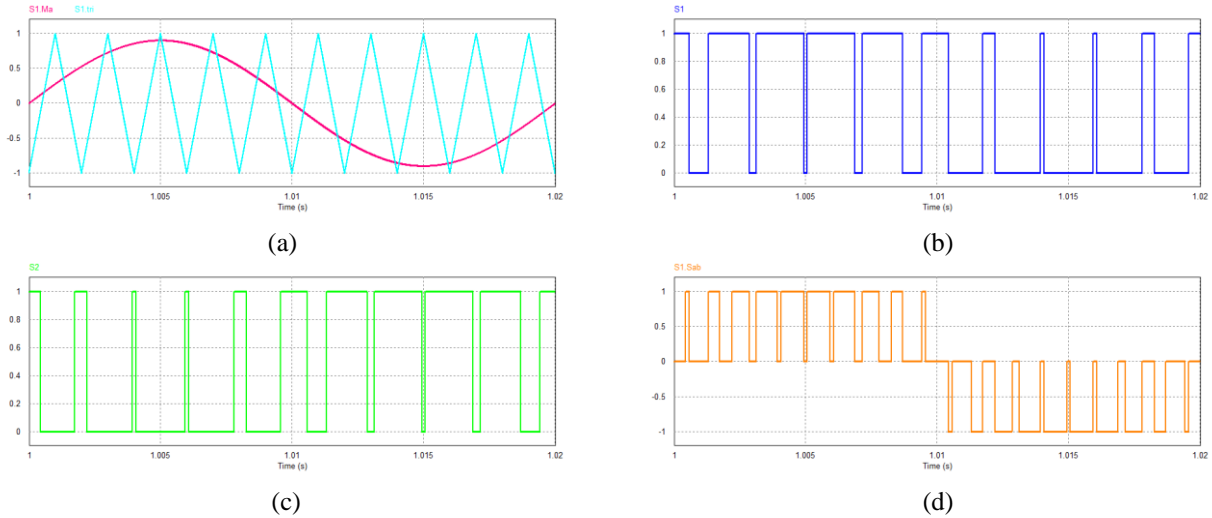
**Tabla 5.1 – Parámetros Componentes en el Circuito del IVM**

Parámetro	Valor
$V_{dc}$	500 [V]
$L_o$	15 [mH]
$R_o$	10 [ $\Omega$ ]

La simulación del circuito del IVM y del sub-circuito correspondiente a la modulación SPWM para esta topología se puede revisar en el Anexo D.1. La simulación de la modulación se realizó a partir de las ecuaciones (C.1), (C.2), (C.3) y (C.4) mientras que para simular las funciones de la moduladora y triangular, ecuaciones (3.16) y (3.17) respectivamente, se hizo uso del bloque C presenten en la librería de *PSIM*<sup>®</sup> en donde se programó en código C las funciones y parámetros de las señales, ver Anexo E.1.

Los parámetros utilizados para la obtención de las curvas características de esta topología son los definidos en la Tabla 3.2. En la Fig. 5.3 se puede observar las curvas correspondientes a la modulación SPWM donde se puede observar la frecuencia de la triangular definida como  $fn_{tr} = 10 [Hz]$ . A partir de esta modulación se obtienen las conmutaciones de los switches del convertidor y la curva correspondiente a la función de conmutación  $S_{ab}$  dada por la ecuación (3.18).





**Fig. 5.3 – Modulación SPWM del IVM en PSIM®**

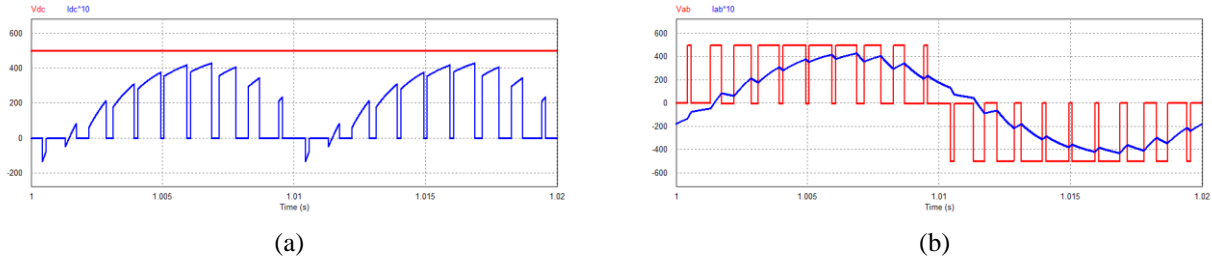
(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1$ ; (c) Conmutación switch  $S_2$ ; (d) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$

Las curvas características de esta topología se observan en la Fig. 5.4 correspondientes al voltaje y corriente alterno de salida y el voltaje y corriente continuo de entrada. Como era de esperar el voltaje  $V_{ab}$  presenta la misma forma de onda que la función de conmutación  $S_{ab}$  amplificado por el factor  $V_{dc}$ , ver ecuación (3.19). Por otra parte debido a que al carga es altamente inductiva, la forma de onda de la corriente  $I_{ab}$  se rige por su ley terminal, ecuación (5.1).

$$I(t) = \frac{1}{L} \int_0^{V_{ab}} V_{ab}(t) dt \quad (5.1)$$

La corriente  $I_{ab}$  se forma a partir de la integral del voltaje de salida  $V_{ab}$  la cual tiene una fuerte componente PWM. Como se trata de escalones de voltajes, por definición la integral de una señal escalón corresponde a una señal tipo rampa, la señal  $I_{ab}$  tendrá una pendiente positiva mientras dure el ancho de pulso positivo mientras que al producirse el canto de bajada del pulso de voltaje la pendiente de la corriente cambiara de signo debido a que comienza a restar área; lo mismo sucede en el semi-ciclo negativo de la onda de voltaje  $V_{ab}$ .

Como la topología corresponde a un inversor fuente de voltaje controlado se puede observar el voltaje de entrada  $V_{dc}$  continuo. También se puede observar la corriente  $I_{dc}$  cuya forma de onda vienen dado por la ecuación (3.20).



**Fig. 5.4 – Formas de onda en S.S en el IVM en PSIM®**

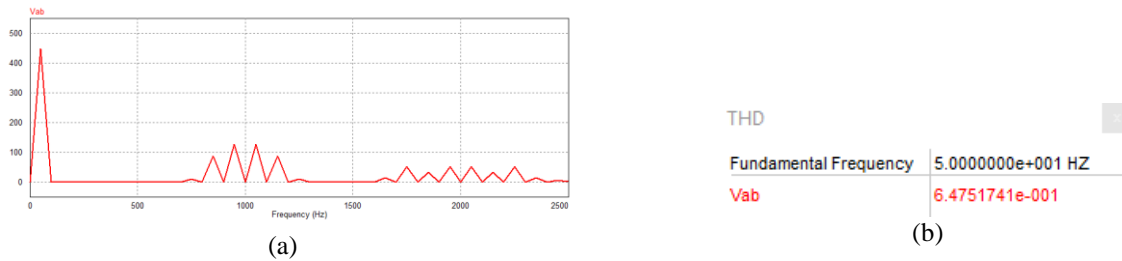
(a) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 10$  ; (b) Voltaje  $V_{ab}$  y Corriente  $I_{ab} \cdot 10$

En general los convertidores estáticos de potencia son generadores de corrientes armónicas, en el caso del IVT el voltaje continuo puro suministrado implica una corriente alterna compuesta de escalones.

Una de las razones por la cual se utilizó la técnica de modulación SPWM es porque trabajan a frecuencias del orden de los 20 a 50 [kHz] y que generalmente son implementados para obtener una baja presencia de armónicos en su análisis de FFT. Otro índice para analizar la pureza de una señal es el THD.

El THD corresponde a la distorsión total armónica de una señal y mide la cantidad de armónicos no deseados presentes en la señal. Se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. Una medida para comparar la respuesta entre ambos softwares es la obtención de las FFT y THD de sus curvas características. La distorsión armónica se genera debido a las características no lineales de los equipos y/o cargas de un sistema de potencia. Todos los cálculos de THD se hicieron hasta el armónico 50 y con el objetivo de comparar las respuestas de las simulaciones en ambos softwares.

Una característica de los convertidores monofásicos es que sus armónicas basura aparecen al doble de la frecuencia de la portadora y a los múltiplos de ella, esto se debe al coseno de ángulo doble producto de la multiplicación del voltaje o corriente sinusoidal con la función de conmutación donde ambas señales deben tener igual frecuencia. Por otra parte, otra característica importante de los convertidores monofásicos es la presencia de la segunda armónica. En nuestro caso aparecerán a la frecuencia de 1000 [Hz] o armónico 20 y sus múltiplos como se puede observar en la primera FFT de la Fig. 5.5 mientras que en el resto de los armónicos se ve una baja y/o casi nula presencia de ellos.



**Fig. 5.5 – FFT y THD en el IVM en PSIM®**

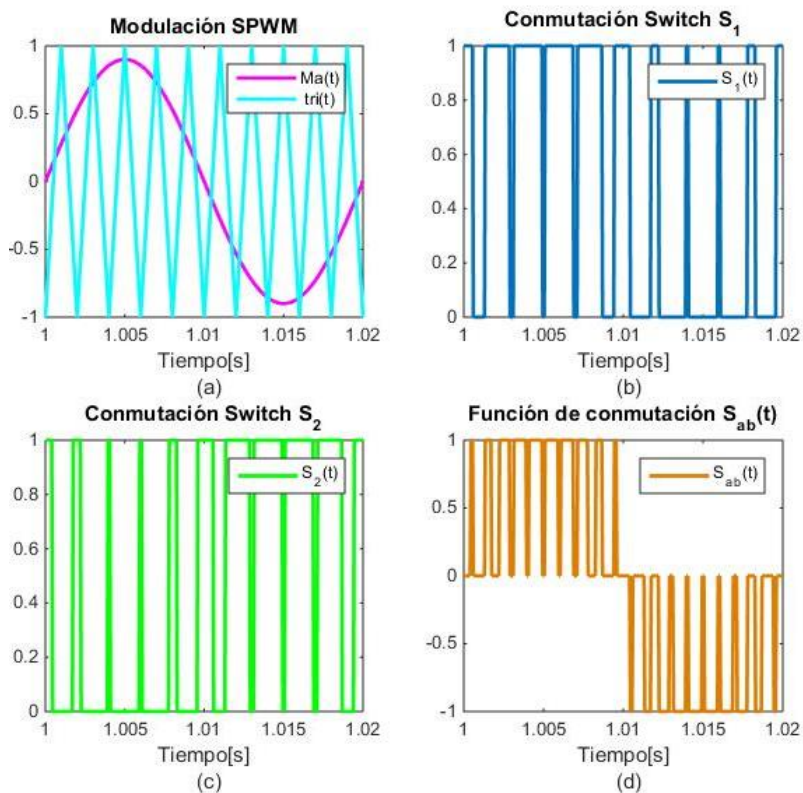
(a) FFT Voltaje  $V_{ab}(t)$ ; (b) THD Voltaje  $V_{ab}(t)$

A continuación se presentan las simulaciones obtenidas en *Simulink*®. Como se comentó anteriormente, para realizar una simulación en el equipo *OPAL – RT*® el modelo simulado en *Simulink*® debe estar construido en base a subsistemas, dicha simulación se puede revisar en el capítulo 6. Los parámetros de entrada al sistema corresponden a los de la modulación SPWM y son los mismos utilizados en el modelo en *PSIM*®, ver Tabla 3.2.

En las siguientes figuras se pueden observar las curvas obtenidas mediante la simulación en *Simulink*®. En la Fig. 5.6 se puede observar que se obtiene los mismos resultados para la modulación SPWM que en la simulación mediante *PSIM*®. También se observan las curvas correspondientes a la conmutación de los switches  $S_1$  y  $S_2$  y a la función de conmutación  $S_{ab}$  definida por la ecuación (3.18). Comparando las formas de ondas se observa que hasta el momento las respuestas de ambos softwares coinciden por lo que las curvas características de la topología IVM en *Simulink*® deberían responder de la misma forma que las obtenidas en *PSIM*®.

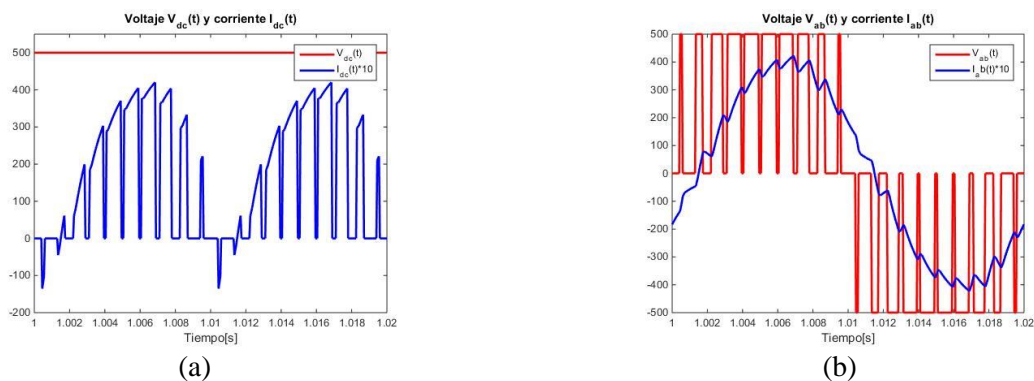
En las Fig. 5.7 se muestran las curvas características de estas topología y, como era de esperar, se obtiene el mismo comportamiento con respecto a la simulación en *PSIM*® lo cual conlleva a la validación de este último software como herramienta de simulación al alcance del estudiante.

En las Fig. 5.8 se muestra la FFT y THD de la señal  $V_{ab}(t)$  donde nuevamente se puede observar la alta presencia de armónicos a las frecuencias 1000 [Hz] y sus múltiplos de dos. A su vez la componente fundamental tiene un valor aproximado a  $M \cdot V_{dc}$  y no hay componentes de frecuencia hasta la frecuencia de la triangular es decir, hasta el armónico 10.



**Fig. 5.6 – Modulación SPWM del IVM en Simulink®**

(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1$ ; (c) Conmutación switch  $S_2$ ; (d) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$



**Fig. 5.7 – Formas de onda en S.S en el IVM en Simulink®.**

(a) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 10$ ; (b) Voltaje  $V_{ab}$  y Corriente  $I_{ab} \cdot 10$ ;

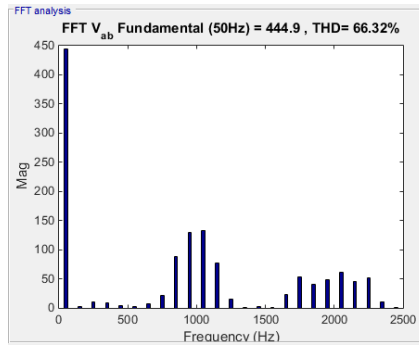


Fig. 5.8 – FFT y THD en el IVM en Simulink®

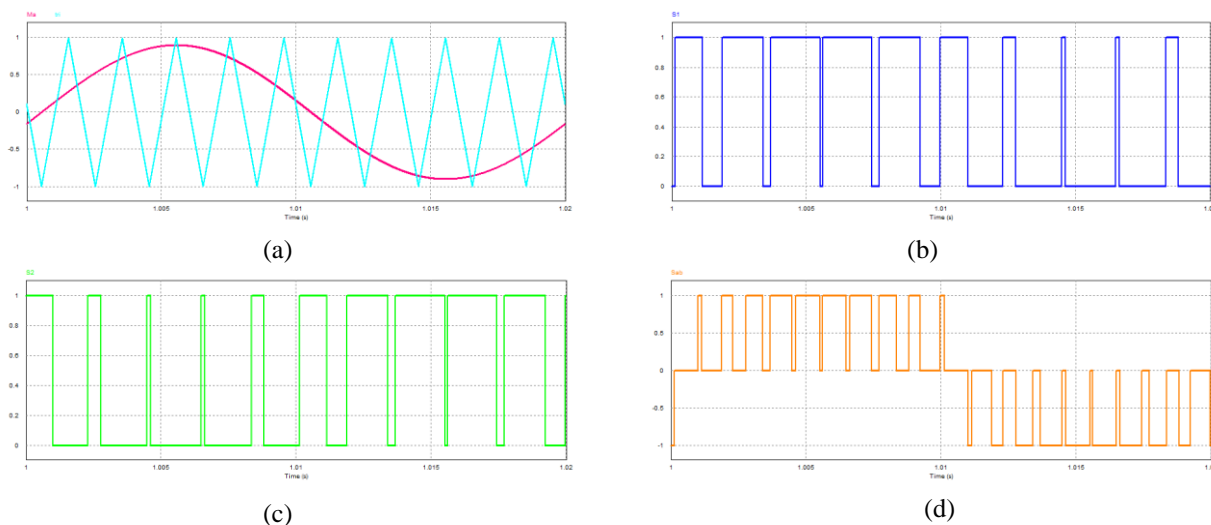
### B. Rectificador Fuente de Voltaje Monofásico

La simulación del circuito del RVM en *PSIM*® se puede revisar en el Anexo D.2, la modulación SPWM es la misma utilizada para el IVM. Los valores de los componentes utilizados en la simulaciones se puede ver en la Tabla 5.2, mientras que los parámetros utilizados para la modulación del RVM son los de la Tabla 3.3; el código C de los bloques C se pueden encontrar en el Anexo E.1.

Tabla 5.2 – Parámetros Componentes en el Circuito del RVM

Parámetro	Valor
$V_s$	$220\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t)$ [V]
$R_s$	1 [ $\Omega$ ]
$L_s$	30 [mH]
$C_{dc}$	500 [ $\mu$ F]
$R_{dc}$	100 [ $\Omega$ ]

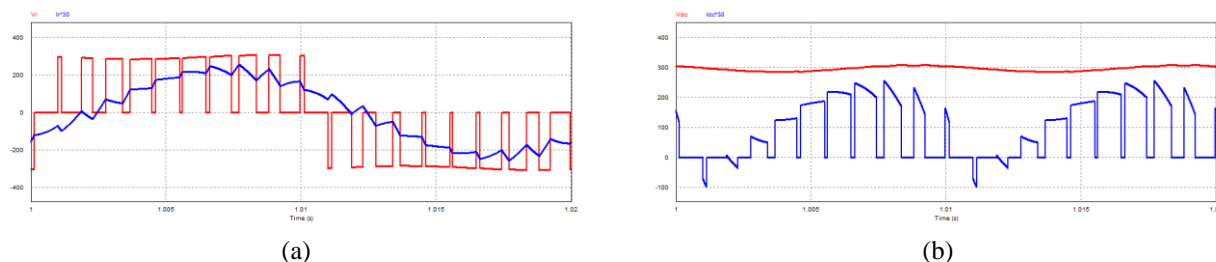
En la Fig. 5.9 se puede observar las curvas correspondientes a la modulación SPWM. Se modifica en fase la triangular para así minimizar la distorsión presente en la señal PWM. A partir de esta modulación se obtienen las conmutaciones de los switches del convertidor y la curva de la función de conmutación  $S_{ab}$ , ver Fig. 5.9.



**Fig. 5.9 – Modulación SPWM del RVM en PSIM®**

(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1$ ; (c) Conmutación switch  $S_2$ ; (d) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$

Las curvas características de esta topología se observan en la Fig. 5.10 correspondientes al voltaje  $V_r$  y corriente  $I_r$  alterna a la entrada del RVM y el voltaje  $V_{dc}$  y corriente  $I_{dc}$  continua a la salida. Es importante destacar que la corriente  $I_{dc}$  asume valores negativos lo cual tiene sentido físico cuando los interruptores son bidireccionales. Esta corriente inversa se devuelve por los diodos conectados en anti paralelo en cada *switch*. Por otra parte, el tamaño del condensador se define a partir de la cantidad de *ripple* presente en el voltaje de salida; su función es filtrar esta señal disminuyendo la cantidad de oscilaciones presente en ella y que sea lo más aproximado a una señal continua. Además se observa en la curva del voltaje  $V_r(t)$  una distorsión adicional producto de que la tensión d.c no es constante.



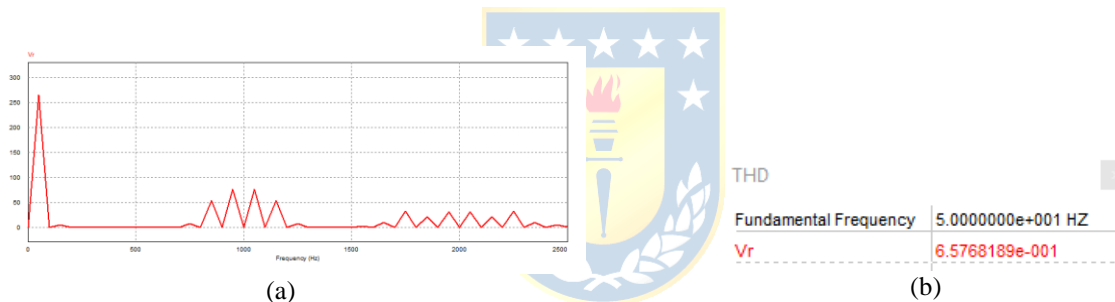
**Fig. 5.10 – Formas de onda en S.S en el RVM en PSIM®**

(a) Voltaje  $V_r$  y Corriente  $I_r \cdot 30$ ; (b) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 30$

En la Fig. 5.11 se puede ver la FFT correspondiente al voltaje  $V_r(t)$ . Se puede observar la presencia de la segunda armónica a la frecuencia fundamental y la presencia de sus armónicos basura a la frecuencia del armónico 20 y 40.

Los sistemas monofásicos de por si contienen un gran contenido de armónicos basura afectando en su rendimiento, esto se observa en el valor de THD, ver Fig. 5.11 Lo anterior se puede disminuir con el uso de filtros ya sea a la entrada o a la salida del convertidor, sin embargo, el uso de filtros a la vez afecta en la eficiencia del convertidor y aumenta su valor economico.

Otra forma de mejorar la FFT de un convertidor monofasico es aumentar la frecuencia de la mortadora en la modulación SPWM, aproximando la señal obtenida a una sinusoidal más pura debido al aumento en su muestreo. No obstante, el precio a pagar por este aumento en la frecuencia de conmutación es el aumento en las perdidas por conmutacion en los switches del circuito.

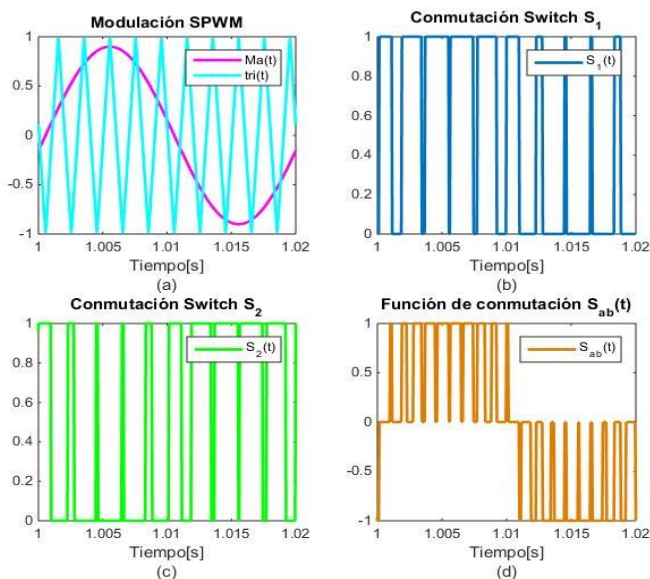


**Fig. 5.11 – FFT y THD en el RVM en PSIM®**

(a) FFT Voltaje  $V_r(t)$ ; (b) THD Voltaje  $V_r(t)$

Al igual que en el modelo del IVM, el RVM también consta de dos subsistemas. Los parámetros ingresados en la GUI corresponden a los de la modulación SPWM y son los mismos utilizados en el modelo en *PSIM*®, Tabla 3.3.

En la Fig. 5.12 se puede observar que se obtiene los mismos resultados para la modulación SPWM, la conmutación de los *switches* y la función de conmutación  $S_{ab}$  que en la simulación mediante *PSIM*®. Comparando las formas de ondas se observa que hasta el momento las respuestas de ambos softwares coinciden por lo que las curvas características de la topología RVM en *Simulink*® deberían responder de la misma forma que las obtenidas en *PSIM*®.

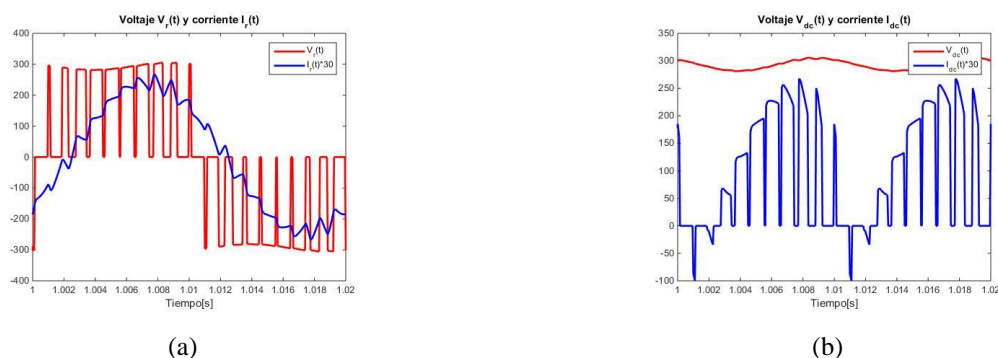


**Fig. 5.12 – Modulación SPWM del RVM en Simulink®**

(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1, S_2$ ; (c) Conmutación switch  $S_3, S_4$ ; (d) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$

En la Fig. 5.13 se muestran las curvas características de esta topología y, como era de esperar, se obtiene el mismo comportamiento con respecto a la simulación en  $PSIM$ ®. La forma de onda de la corriente  $I_{ab}$  se rige por la misma ley terminal del IVM, ecuación (5.1).

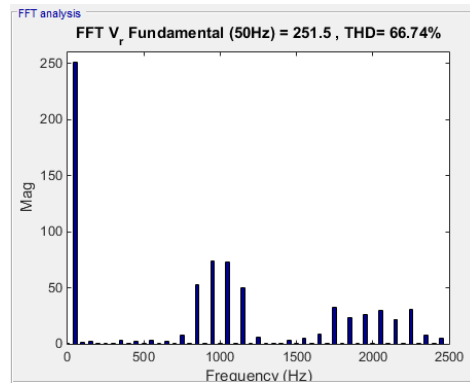
En la Fig. 5.14 se puede analizar la FFT y THD de la señal  $V_r(t)$ . Se obtienen la misma FFT y THD que en  $PSIM$ ®. Si bien el THD no es óptimo, este se puede mejorar con las técnicas mencionadas anteriormente.



**Fig. 5.13 – Formas de onda en S.S en el RVM en Simulink®,**

(a) Voltaje  $V_r$  y Corriente  $I_r \cdot 30$ ; (b) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 30$





**Fig. 5.14 – FFT y THD voltaje  $V_r(T)$  en el RVM en Simulink®**

### C. Inversor Fuente de Corriente Monofásico

La simulación del circuito del ICM en *PSIM*® se puede revisar en el Anexo D.3. Para la generación de los pulsos de disparo se implementa el circuito lógico binario presente en la Fig. D.7 (b) el cual da como resultado la modulación SPWM para esta topología. Este circuito digital asegura una correcta conmutación de los switches del convertidor y así evitar alguna condición prohibitiva en la conmutación de los switches y asegura que se logre la corriente  $I_{ab}(t)$ . Los valores de los componentes utilizados para ambas simulaciones se encuentran en la Tabla 5.3 mientras que los parámetros para la modulación del ICM son los de la Tabla 3.4; el código C de los bloques C se pueden encontrar en el Anexo D.1.

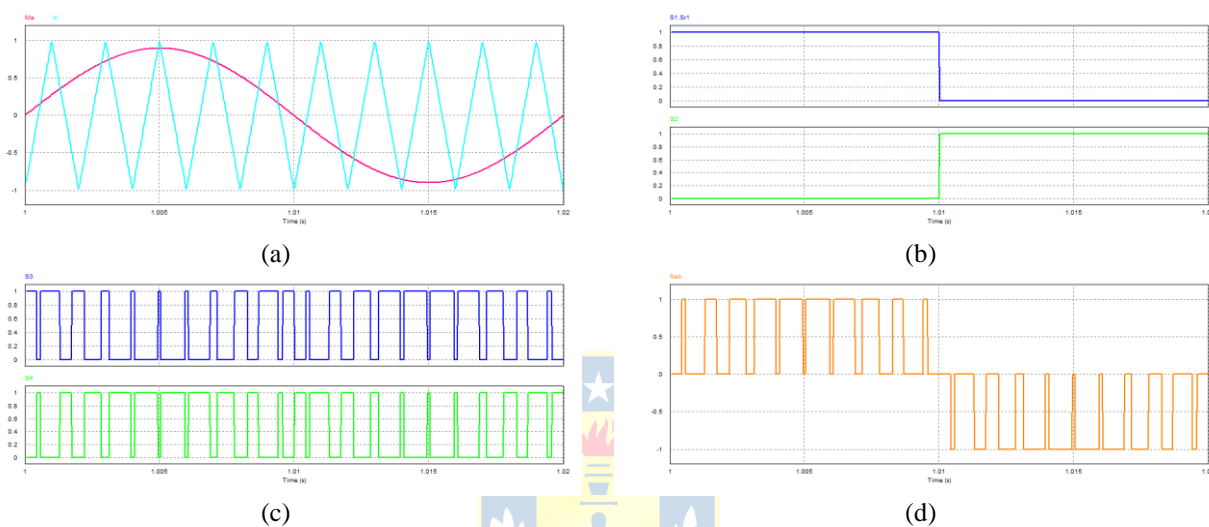
**Tabla 5.3 – Parámetros Componentes en el Circuito del ICM**

Parámetro	Valor
$I_{dc}$	10 [A]
$L_o$	30 [mH]
$R_o$	10 [ $\Omega$ ]
$C_{ac}$	100 [ $\mu$ F]

En la Fig. 5.15 se puede observar las curvas correspondientes a la modulación SPWM. A partir de esta modulación se obtienen las conmutaciones de los switches del convertidor y su respectiva función de conmutación  $S_{ab}$  dada por la ecuación (3.18). Por otra parte, las curvas características de esta topología se observan en la Fig. 5.16 correspondientes al voltaje y corriente alterno de salida, el voltaje y corriente continuo de entrada y la corriente en la carga. Además, se aprecia un voltaje

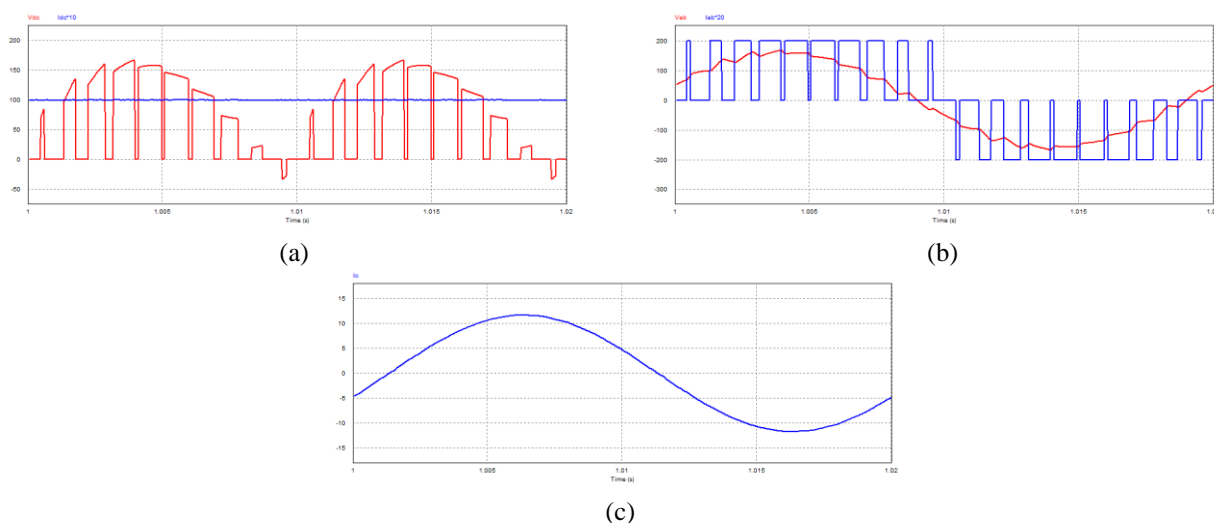
negativo  $V_{dc}$  en el enlace continuo lo que exige a los switches la capacidad de bloqueo de voltaje inverso. Por la naturaleza PWM de la corriente  $I_{ab}(t)$  se requiere implementar un condensador  $C_{ac}$  a la salida del conversor con el objetivo de disminuir la cantidad de ripple presente en la señal  $V_{ab}$ , el tamaño del condensador definirá que tan aproximada es la señal  $V_{ab}$  a una sinusoidal.

La calidad de la señal  $I_{dc}(t)$ , es decir, que tan aproximada sea a una señal continua, está directamente relacionada con que tan aproximada a una sinusoidal pura sea nuestra señal  $I_{ab}(t)$



**Fig. 5.15 – Modulación SPWM del ICM en PSIM®**

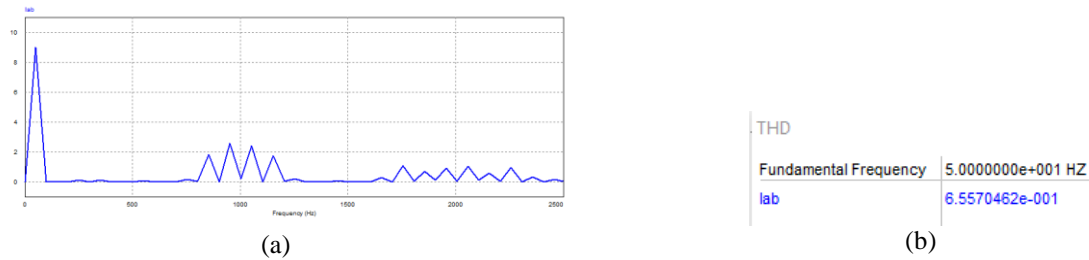
(b) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1, S_2$ ; (c) Conmutación switch  $S_3, S_4$ ; (d) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$



**Fig. 5.16 – Formas de onda en S.S en el ICM en PSIM®**

(a) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 10$ ; (b) Voltaje  $V_{ab}$  y Corriente  $I_{ab} \cdot 20$ ; (c) Corriente  $I_o$

En la Fig. 5.17 se muestra la FFT y THD de la señal  $I_{ab}(t)$ . Nuevamente se observa la presencia de la segunda armónica con un valor aproximado a  $M \cdot I_{dc}(0)$ . Aparecen los armónicos al doble de la frecuencia fundamental y a sus múltiplos. Por otra parte, en esta topología se obtiene un THD 65.57% , nuevamente se evidencia ineficiencia del uso de estos convertidores sin el uso de un filtro de mayor tamaño.

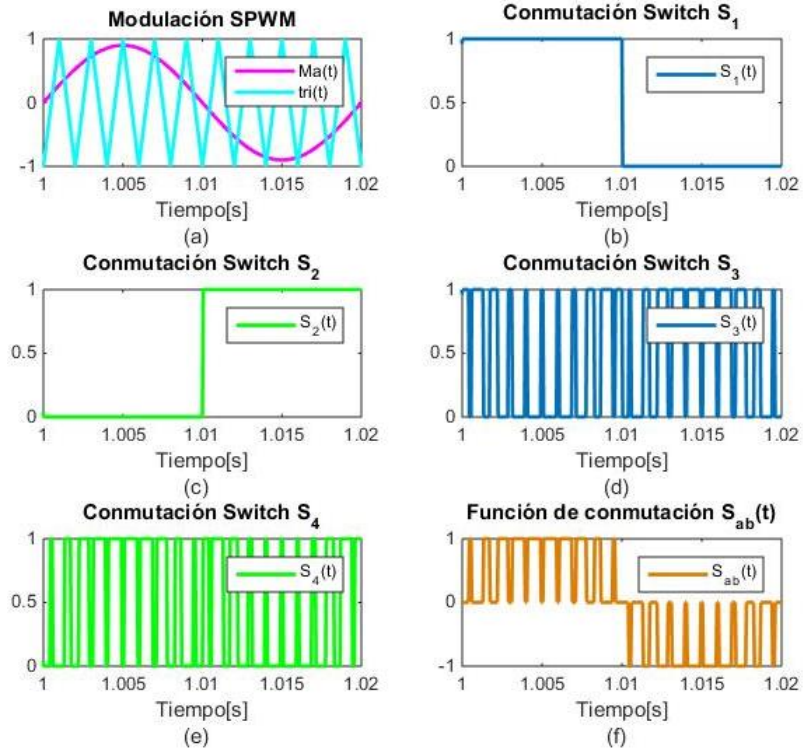


**Fig. 5.17 – FFT y THD en el ICM en PSIM®**

(a) FFT Corriente  $I_{ab}$ ; (b) THD Corriente  $I_{ab}$

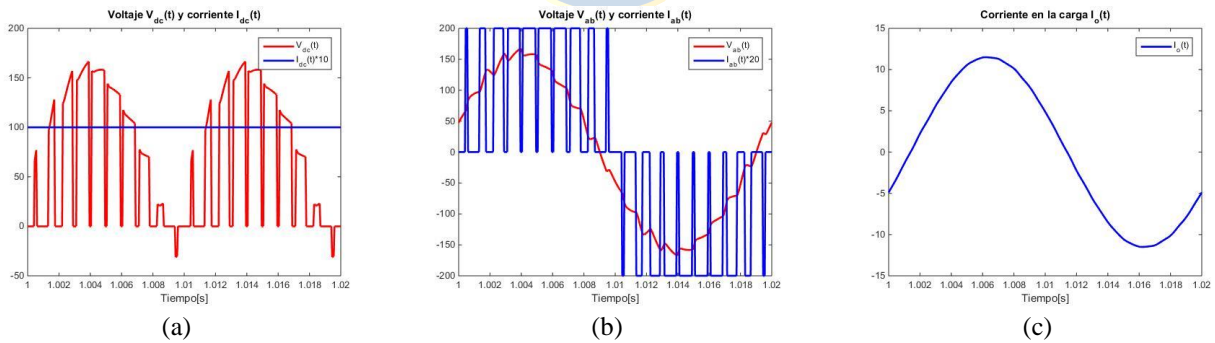
A continuación se presentan las curvas obtenidas mediante la simulación en *Simulink*®. Los parámetros de entrada al sistema corresponden a los de la modulación SPWM y son los mismos utilizados en el modelo en *PSIM*®, Tabla 3.4.

En la Fig. 5.18 se puede observar que se obtiene los mismos resultados para la modulación SPWM que en la simulación mediante *PSIM*®. Comparando las formas de ondas se observa que hasta el momento las respuestas de ambos softwares coinciden por lo que las curvas características de la topología ICM en *Simulink*® deberían responder de la misma forma que las obtenidas en *PSIM*®.



**Fig. 5.18 – Modulación SPWM en el ICM en Simulink®**

(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1$ ; (c) Conmutación switch  $S_2$ ; (d) Conmutación switch  $S_3$ ; (e) Conmutación switch  $S_4$ ; (f) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$



**Fig. 5.19 – Formas de onda en S.S en el ICM en Simulink®**

(a) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 10$ ; (b) Voltaje  $V_{ab}$  y Corriente  $I_{ab} \cdot 20$ ; (c) Corriente  $I_o$

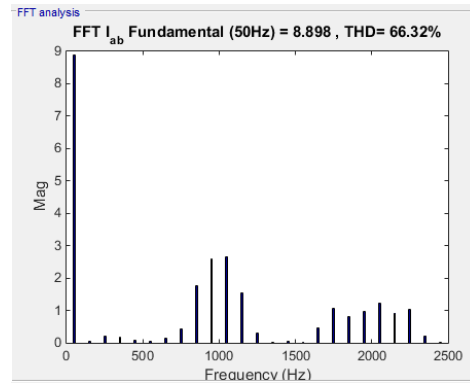


Fig. 5.20 – FFT y THD Corriente  $I_{ab}$  en el ICM en Simulink®

#### D. Rectificador Fuente de Corriente Monofásico

Finalmente, la última topología monofásica corresponde a la del RCM, ver Anexo D.4. Al igual que en las topología RVM, en la RCM la modulación SPWM es la misma utilizada para el ICM, ver Fig. D.3 (b). Los parámetros utilizados para la simulación se encuentran en la Tabla 5.4, los parámetros para la modulación del RCM son los de la Tabla 3.2; el código C de los bloques C se pueden encontrar en el Anexo E.1.

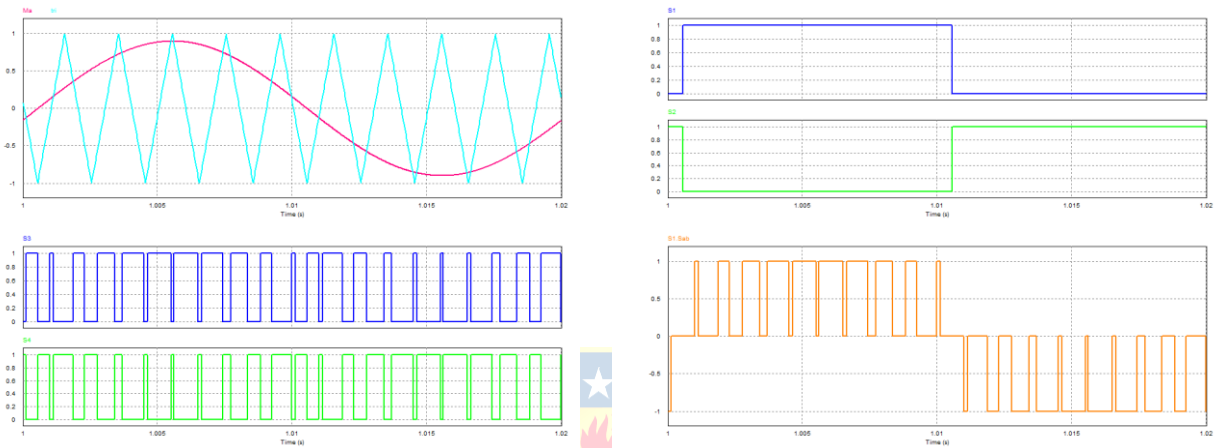
Tabla 5.4 – Parámetros Componentes en el Circuito del RCM

Parámetro	Valor
$V_s$	$220\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t)$ [V]
$R_s$	1 [ $\Omega$ ]
$L_s$	5 [mH]
$C_{ac}$	25 [ $\mu$ F]
$R_{dc}$	10 [ $\Omega$ ]
$L_{dc}$	250 [ $\mu$ H]

A partir de la modulación de la Fig. 5.21 se obtienen las conmutaciones de los switches del convertidor. Además, se muestra la curva correspondiente a la conmutación de los switches y la función de conmutación  $S_{ab}$  dada por la ecuación (3.18).

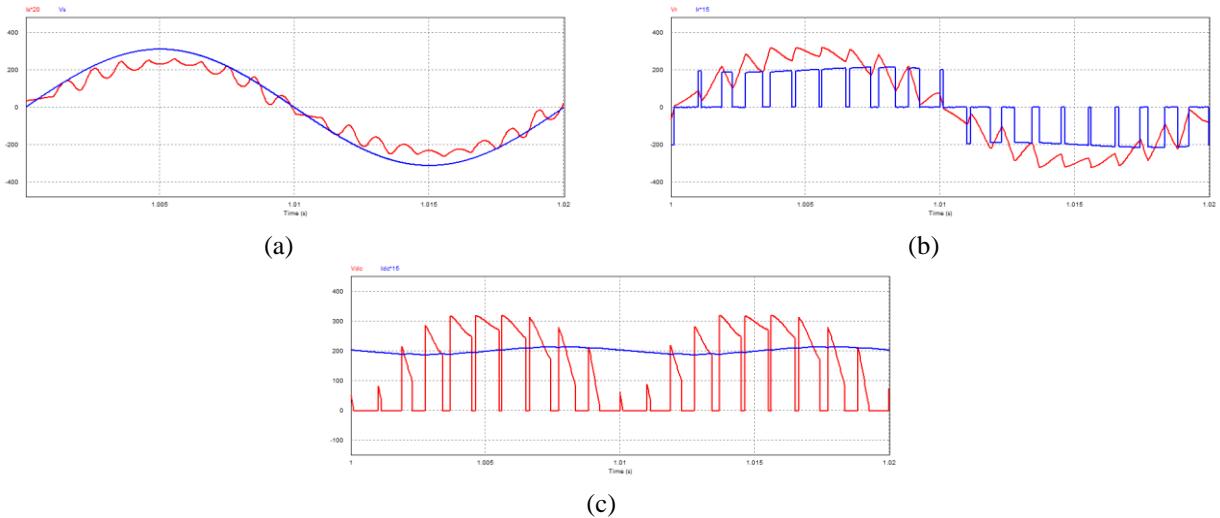
Las curvas características de estas topologías se observan en la Fig. 5.22 correspondientes al voltaje y corriente después del condensador en el lado a.c donde se aprecia la forma de onda PWM de

la corriente  $I_r$  lo que exige el uso de un filtro inductivo- capacitivo para reducir la componente de *ripple* de la onda de corriente en la red alterna. Se observa el voltaje y corriente continuo de salida. Para la obtención de estas curvas se requiere del uso de un filtro capacitivo cuya función es aplanar la corriente en la carga. Para que esta corriente tenga un comportamiento constante exige que el valor del inductor  $L_{dc}$  sea muy alto. Según la teoría, este valor alto también se debe por la presencia de la segunda armónica de voltaje en  $V_{dc}$  característica propia de los sistemas monofásicos.



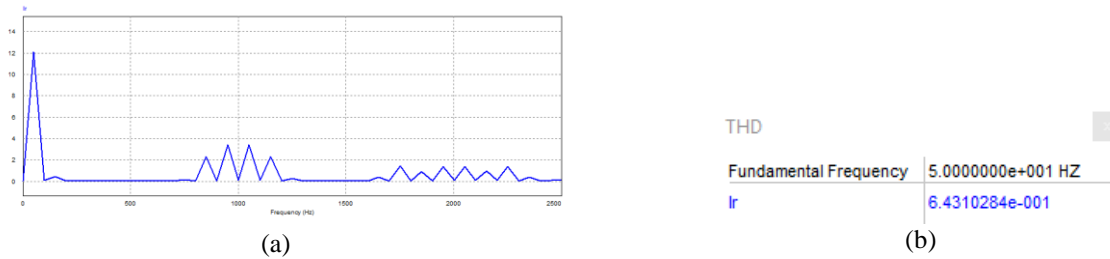
**Fig. 5.21 – Modulación SPWM del RCM en PSIM®**

(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1, S_2$ ; (c) Conmutación switch  $S_3, S_4$ ; (d) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$



**Fig. 5.22 – Formas de onda en S.S en el RCM en PSIM®**

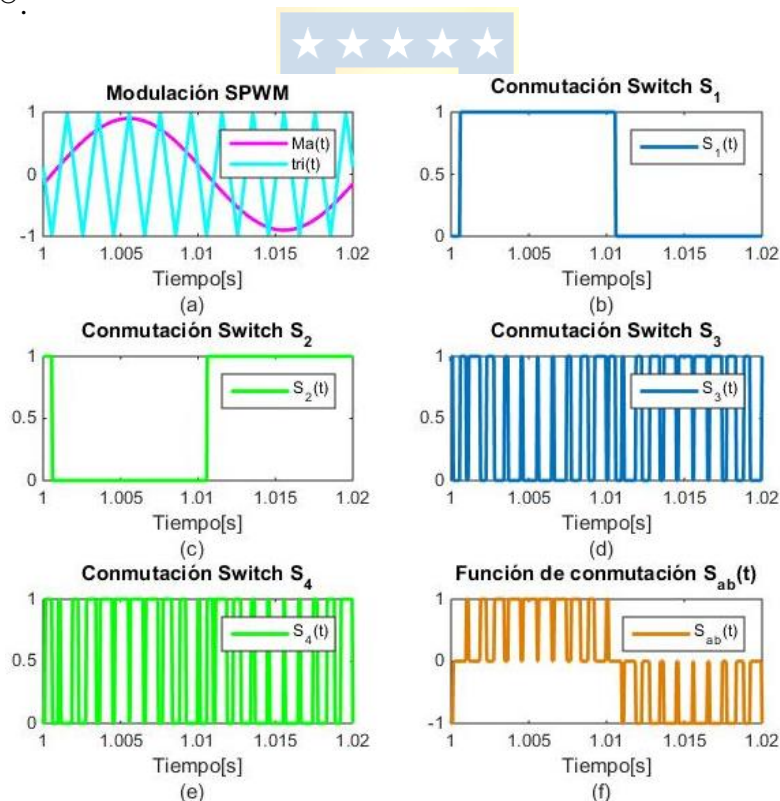
(a) Voltaje  $V_s$  y Corriente  $I_s$ ; (b) Voltaje  $V_r$  y Corriente  $I_r \cdot 15$ ; (c) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 15$



**Fig. 5.23 – FFT y THS en el RCM en PSIM®**

(a) FFT Corriente  $I_r(t)$ ; (b) THD Corriente  $I_r(t)$

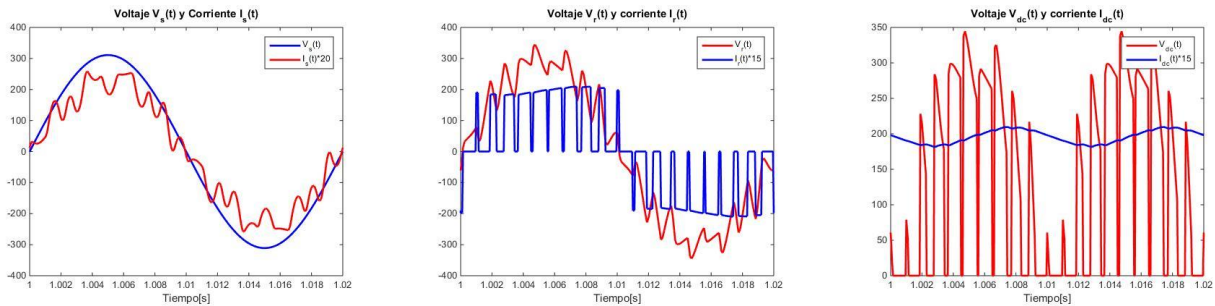
En las siguientes figuras se pueden observar las curvas obtenidas mediante la simulación en *Simulink*®. En la Fig. 5.24 se puede observar que se obtienen los mismos resultados para la modulación SPWM que en la simulación mediante *PSIM*®. Comparando las formas de ondas se observa que hasta el momento las respuestas de ambos softwares coinciden por lo que las curvas características de la topología IVM en *Simulink*® deberían responder de la misma forma que las obtenidas en *PSIM*®.



**Fig. 5.24 – Modulación SPWM del RCM en Simulink®**

(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1$ ; (c) Conmutación switch  $S_2$ ; (d) Conmutación switch  $S_3$ ; (e) Conmutación switch  $S_4$ ; (f) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$

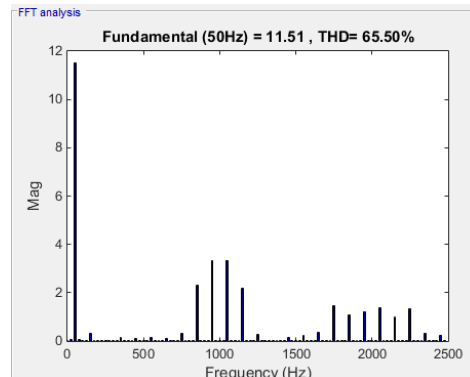
En la Fig. 5.25 se muestran las curvas características de esta topología y, como era de esperar, se obtiene el mismo comportamiento con respecto a la simulación en *PSIM*<sup>®</sup>. El tamaño del inductor  $L_S$  y el condensador  $C_S$  definen la componente de ripple presente en la señal  $V_r$  e  $I_S$ . Por otra parte, se requiere de un condensador  $C_{ac}$  a la entrada del convertidor por la naturaleza PWM de la corriente  $I_r$ . Se observa que la corriente  $I_{dc}(t)$  dista de ser constante, esto se debe al tamaño utilizado del inductor  $L_{dc}$  el cual define la cantidad de oscilación presente en la señal, para que esta corriente se aproxime más a una sinusoidal implica un aumento en el inductor  $L_{dc}$ . Al igual que en el ICM, la topología exige a los switches la capacidad de bloqueo de voltaje inverso para proteger al convertidor ya que la tensión en el enlace d.c puede ser negativo.



**Fig. 5.25 – Formas de onda en S.S en el RCM en Simulink<sup>®</sup>**

(a) Voltaje  $V_s$  y Corriente  $I_s \cdot 20$  ; (b) Voltaje  $V_r$  y Corriente  $I_r \cdot 15$  ; (c) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 15$

En la Fig. 5.26 se muestra la FFT y THD de la corriente  $I_r(t)$ . Se observa la presencia de armónicos no deseados a bajas frecuencias lo que implica un aumento en la distorsión de las señales de salida, la topología exige a los filtros en RMS y se reduce el ancho de banda de los controladores.



**Fig. 5.26 –FFT y THD de la corriente  $I_r(t)$  del RCM en Simulink<sup>®</sup>**



### 5.2.3 Convertidores Estáticos de Potencia Trifásico

Al igual que en el caso monofásico, se realizaron simulaciones en el *software PSIM*<sup>®</sup> obteniendo las curvas características de cada topología acercándonos a realizar simulaciones en tiempo real para topologías de convertidores trifásicos sin la necesidad de implementar el sistema en terreno.

#### A. Inversor Fuente de Voltaje Trifásico

La simulación del circuito del IVT y el sub-circuito correspondiente a la modulación SPWM para esta topología se puede ver en el Anexo D.5. La simulación de la modulación se realizó a partir de las ecuaciones del ANEXO C.4 mientras que para simular las funciones de las moduladora y triangular, ecuaciones (3.27), (3.28), (3.29) y (3.30) respectivamente, se hizo uso del bloque C presenten en la librería de *PSIM*<sup>®</sup> en donde se programó en código C las funciones y parámetros de las señales, ver Anexo E.2.

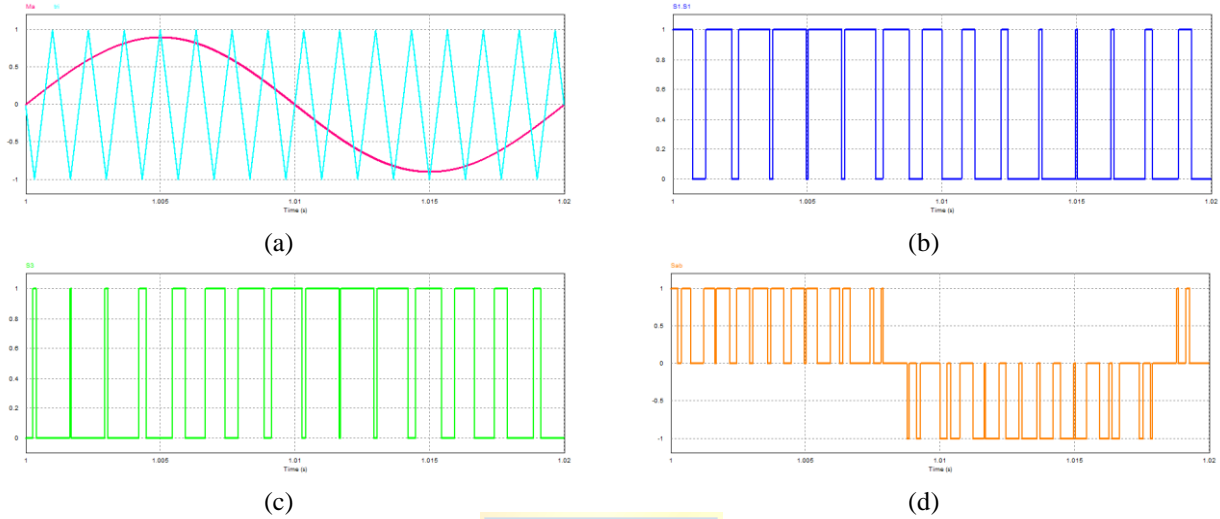
Los parámetros utilizados para la obtención de las curvas características de esta topologías son los definidos en la Tabla 3.5 mientras que los valore para los componentes del circuito se encuentra en la Tabla 5.5.

**Tabla 5.5 – Parámetros Componentes en el Circuito del IVT**

Parámetro	Valor
$V_s$	$220\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t)$ [V]
$R_s$	1 [ $\Omega$ ]
$L_s$	30 [mH]
$C_{dc}$	500 [ $\mu$ F]
$R_{dc}$	100 [ $\Omega$ ]

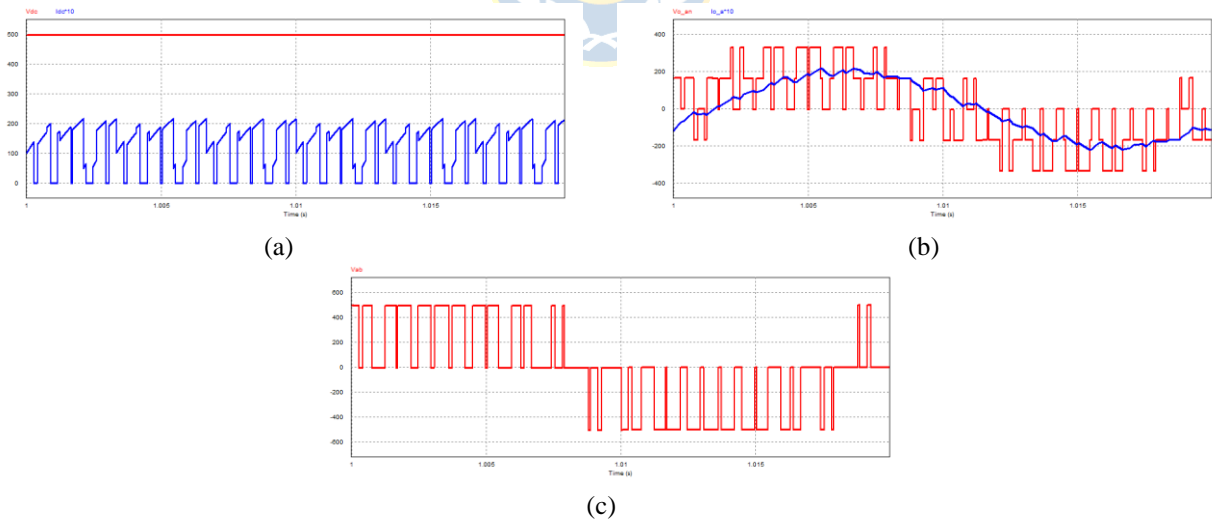
En la Fig. 5.27 se puede observar las curvas correspondientes a la modulación SPWM de la cual se obtienen las conmutaciones de los switches del convertidor y su correspondiente función de conmutación  $S_{ab}$ . Las curvas características de estas topologías se observan en la Fig. 5.28. Al igual que en el caso monofásico, el voltaje entre líneas  $V_{ab}$  presenta la misma forma de onda que la función de conmutación  $S_{ab}$  amplificado por el factor  $V_{dc}$ . Una característica fundamental propia de los sistemas trifásicos consiste en la cancelación de la segunda armónica de voltaje y de corriente. En

particular se debe a la conexión trifásica de las fuentes tanto en estrella como en delta en el lado a.c. Esta característica influye principalmente en la disminución del valor de los filtros a implementar, influyendo así en su tamaño y costo en el mercado.



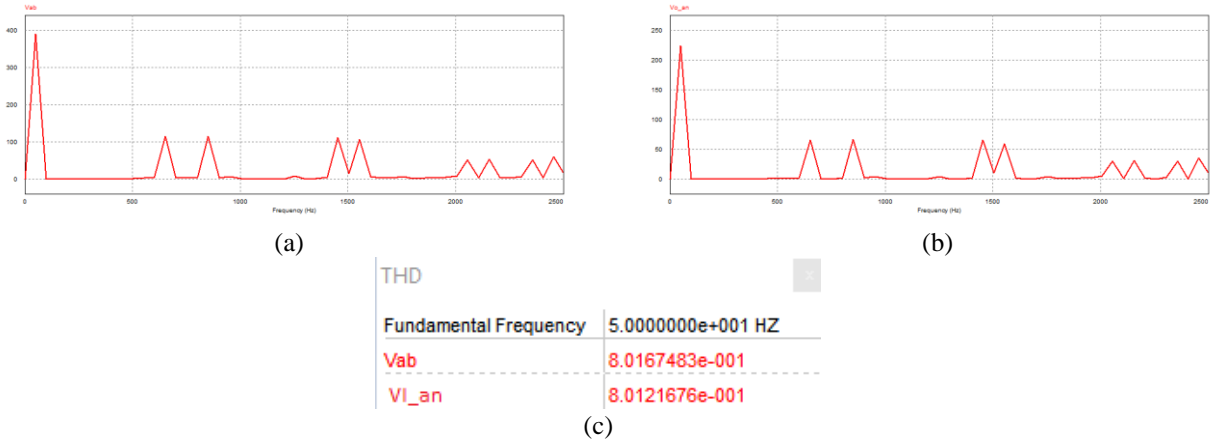
**Fig. 5.27 – Modulación SPWM en el IVT en PSIM®**

(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1$ ; (c) Conmutación switch  $S_3$ ; (d) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$



**Fig. 5.28 – Formas de onda en S.S el IVT en PSIM®**

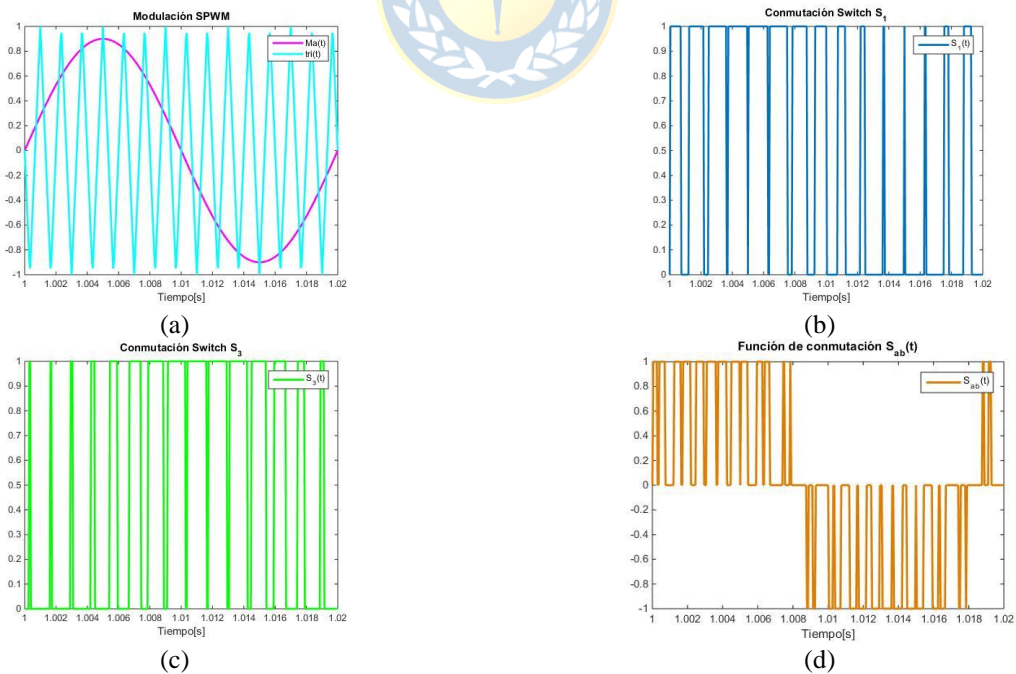
(a) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 10$ ; (b) Voltaje  $V_{oan}$  y Corriente  $I_{oa} \cdot 10$ ; (c) Voltaje  $V_{ab}$ ;



**Fig. 5.29 – FFT y THD en el IVT en PSIM®**

(a) FFT Voltaje  $V_{ab}$ ; (b) FFT Voltaje  $V_{I_{an}}$ ; (c) THD Voltaje  $V_{ab}$  y  $V_{I_{an}}$

A continuación, se presentan las curvas obtenidas mediante la simulación en Simulink®. En la Fig. 5.30 se puede observar que se obtienen los mismos resultados para la modulación SPWM que en la simulación mediante *PSIM*®. Comparando las formas de ondas se observa que hasta el momento las respuestas de ambos softwares coinciden por lo que las curvas características de la topología IVM en *Simulink*® deberían responder de la misma forma que las obtenidas en *PSIM*®.

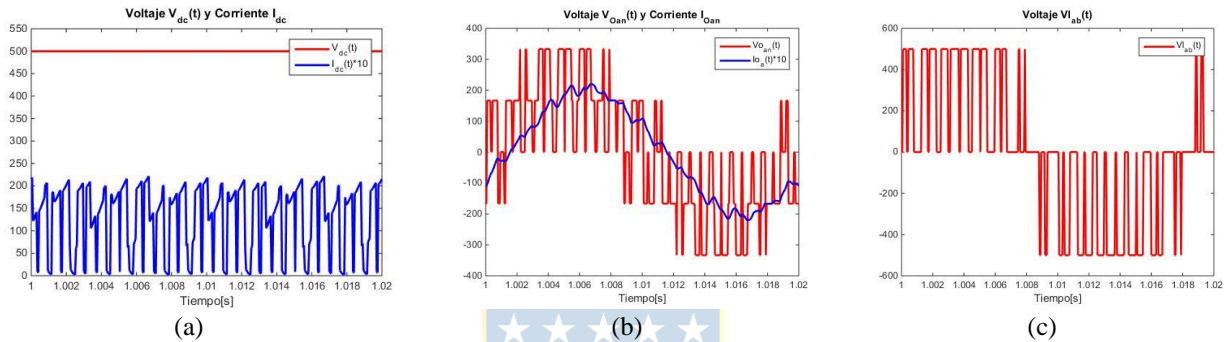


**Fig. 5.30 – Modulación SPWM en el IVT en Simulink®**

(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1$ ; (c) Conmutación switch  $S_3$ ; (d) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$

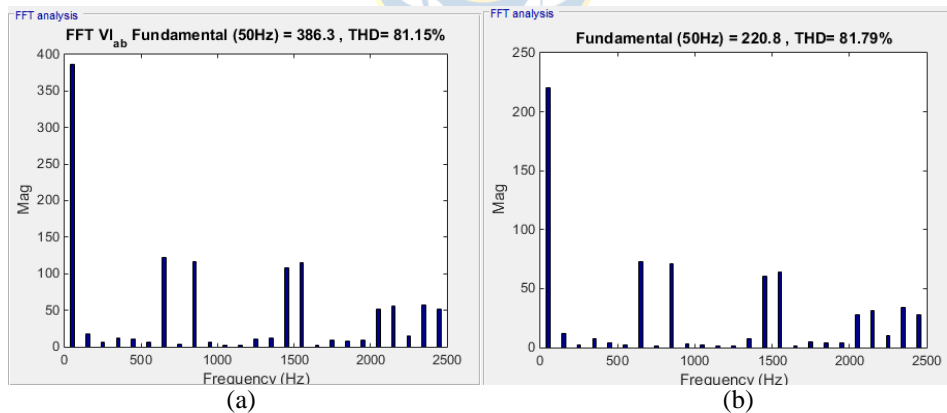
En las Fig. 5.31 se muestran las curvas características de estas topología y, como era de esperar, se obtiene el mismo comportamiento con respecto a la simulación en *PSIM*<sup>®</sup> lo cual conlleva a la validación de este último software como herramienta de simulación al alcance del estudiante.

En la Fig. 5.32 (a) y Fig. 5.32 (b) se aprecian las FFT del voltaje  $V_{lab}$  y  $V_{Oan}$  respectivamente. Ambas graficas coinciden con las obtenidas en *PSIM*<sup>®</sup>, al igual que sus THD validando ambos modelos en sus respectivo softwares de simulación



**Fig. 5.31 – Formas de onda en S.S del IVT en Simulink<sup>®</sup>**

(a) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 10$ ; (b) Voltaje  $V_{oan}$  y Corriente  $I_{oa} \cdot 10$ ; (c) Voltaje  $V_{lab}$



**Fig. 5.32 – FFT y THD en el IVT en Simulink<sup>®</sup>**

(a) FFT y THD Voltaje  $V_{lab}$ ; (b) FFT y THD Voltaje  $V_{Oan}$

## B. Rectificador fuente de voltaje trifásico

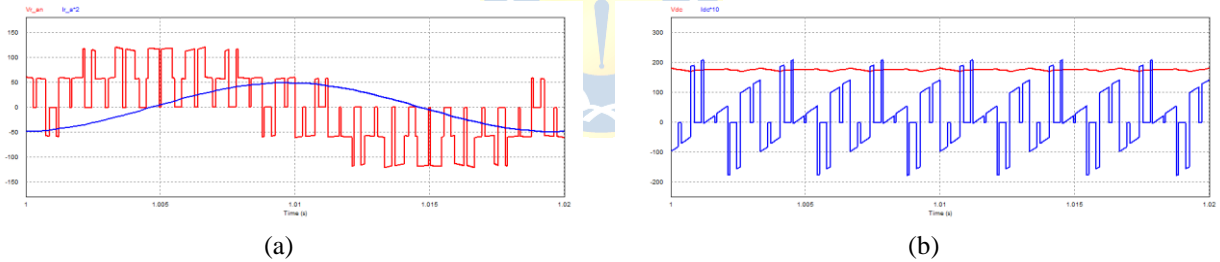
La simulación del circuito del RVT en *PSIM*<sup>®</sup> se puede ver en el Anexo D.6. La modulación SPWM es la misma utilizada para el IVT, ver Fig. D.5 (b). Los parámetros utilizados para la modulación del IVT son los de la Tabla 3.5; el código C de los bloques C se pueden encontrar en el

Anexo D.2. Mientras que los valores de los componentes en el circuito de las simulaciones se encuentran en la Tabla 5.6. Como la modulación y los parámetros de simulación son los mismos del caso IVM, las gráficas para la modulación SPWM, la conmutación de los switches y las funciones de conmutación serán las mismas, ver Fig. 5.27.

Las curvas características de esta topología se observan en la Fig. 5.33 correspondientes al voltaje y corriente continua a la salida del RVT y al voltaje y corriente alterno a la entrada del convertidor.

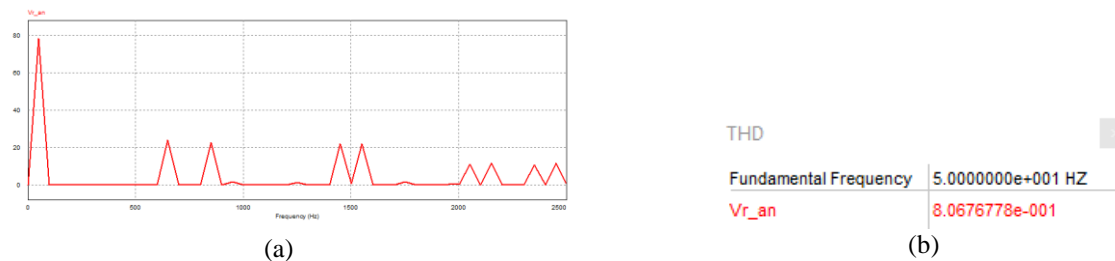
**Tabla 5.6 – Parámetros Componentes en el Circuito del RVT**

Parámetro	Valor
$V_s$	$220\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t + \varphi)$ [V]
$R_s$	1 [ $\Omega$ ]
$L_s$	30 [mH]
$C_{dc}$	500 [ $\mu$ F]
$R_{dc}$	100 [ $\Omega$ ]



**Fig. 5.33 – Formas de onda en S.S en el RVT en PSIM®**

(a) Voltaje  $V_{ran}$  y Corriente  $I_{ran} \cdot 2$ ; (b) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 10$ ;

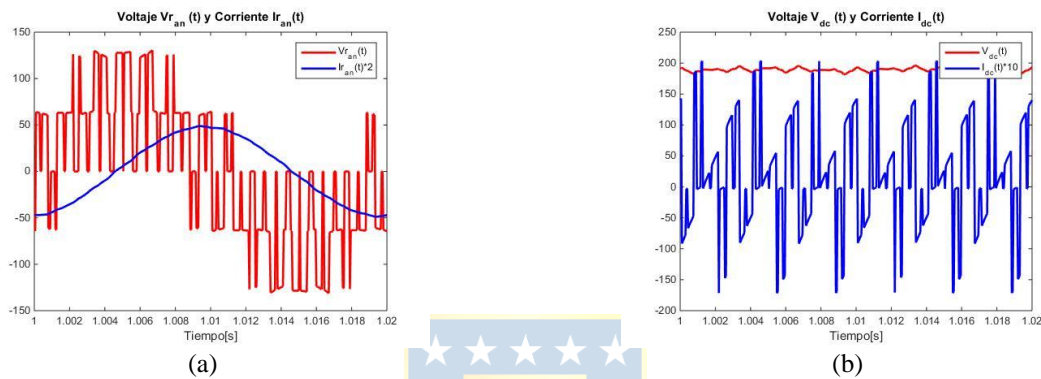


**Fig. 5.34 – FFT y THD en el RVT en PSIM®**

(a) FFT Voltaje  $V_{ran}$ ; (b) THD  $V_{ran}$

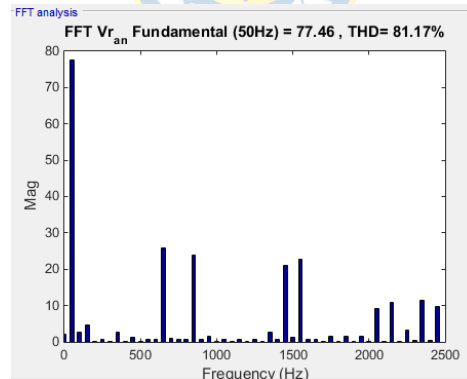
A continuación se presentan las simulaciones realizadas en Simulink<sup>®</sup>. La modulación es la misma que para el caso IVT por ello que las curvas correspondientes a la modulación son iguales en ambas topologías, ver Fig. 5.30.

Comparando las formas de ondas de la Fig. 5.35 se observa que las respuestas de las curvas características de ambos softwares coinciden. En la Fig. 5.36 se observa la FFT del voltaje  $V_{ran}(t)$  cuya fundamental alcanza a la moduladora por la fundamental de  $V_{dc}$  sobre 2.



**Fig. 5.35 – Formas de onda en S.S en el RVT en Simulink<sup>®</sup>**

(a) Voltaje  $V_{ran}$  y Corriente  $I_{ran} \cdot 2$ ; (b) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 10$



**Fig. 5.36 – FFT y THD Voltaje  $V_{ran}$  en el RVT en Simulink<sup>®</sup>**

### C. Inversor Fuente de Corriente Trifásico

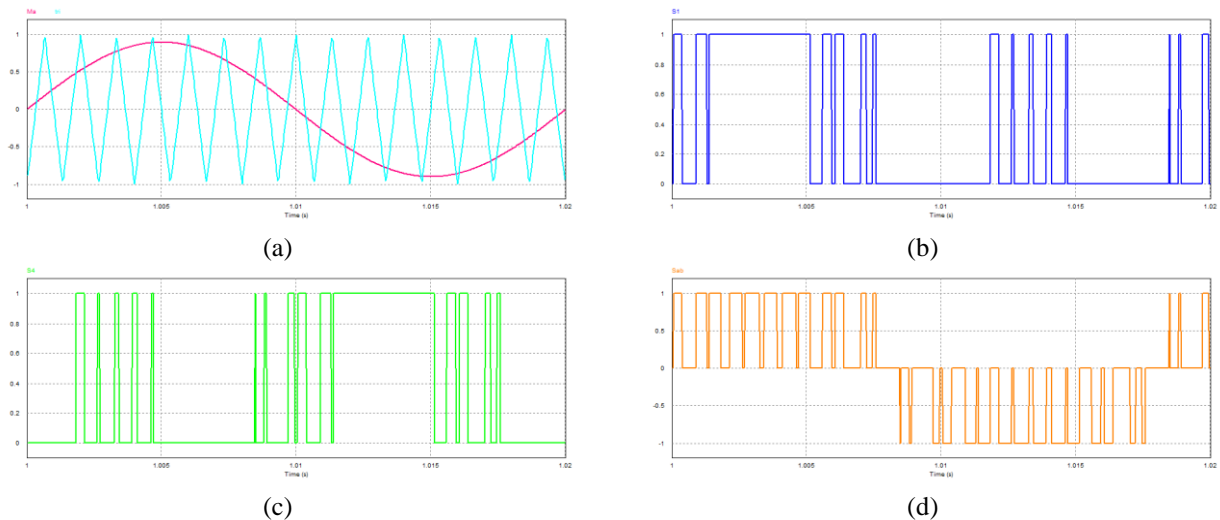
La simulación del circuito del ICT y el sub-circuito correspondiente a la modulación SPWM para esta topología, ver Anexo D.7. Al igual que en el caso monofásico, la modulación SPWM se logra a través de la implementación del sistema digital de la Fig. D.7 (b). Los valores de los componentes en los circuitos a simular se encuentran en la Tabla 5.7.

**Tabla 5.7 – Parámetros Componentes en el Circuito del ICT**

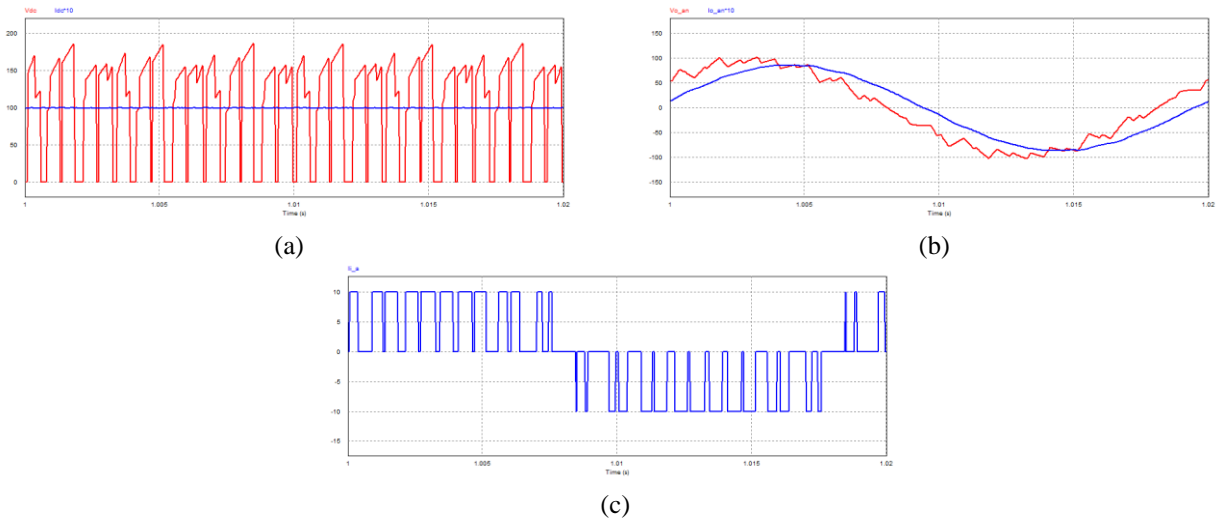
Parámetro	Valor
$I_{dc}$	10 [A]
$R_o$	10 [ $\Omega$ ]
$L_o$	15 [mH]
$C_o$	100 [ $\mu$ F]

En la Fig. 5.37 se puede observar las curvas correspondientes a la modulación SPWM donde se puede observar la frecuencia de la triangular definida como  $fn_{tr} = 15$  [Hz]. A partir de esta modulación se obtienen las conmutaciones de los switches del convertidor y la función de conmutación  $S_{ab}$  también presentes en la Fig. 5.37.

Las curvas características de esta topología se observan en la Fig. 5.38 correspondientes a la forma de onda de la corriente  $I_{ia}$  de naturaleza PWM antes de pasar por el arreglo de filtros capacitivos, el voltaje y corriente alterno de salida (en la carga) y el voltaje y corriente continuo de entrada. Es importante notar que la presencia del condensador en el lado a.c se utiliza para filtrar la corriente  $I_{oa}$ .

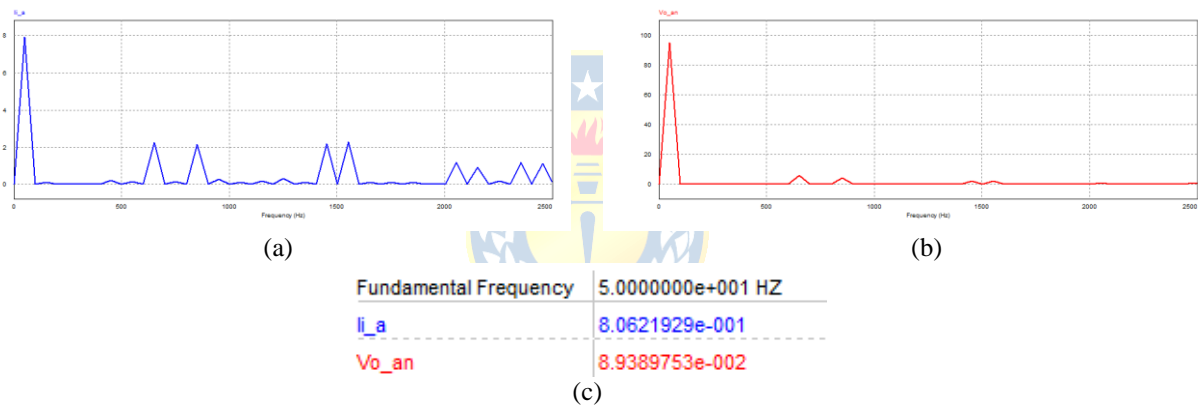
**Fig. 5.37 – Modulación SPWM del ICT en PSIM®**

(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1$ ; (c) Conmutación switch  $S_4$ ; (d) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$



**Fig. 5.38 – Formas de onda en S.S en el ICT en PSIM®**

(a) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 10$ ; (b) Voltaje  $V_{oan}$  y Corriente  $I_{oan} \cdot 10$ ; (c) Corriente  $I_{ia}$



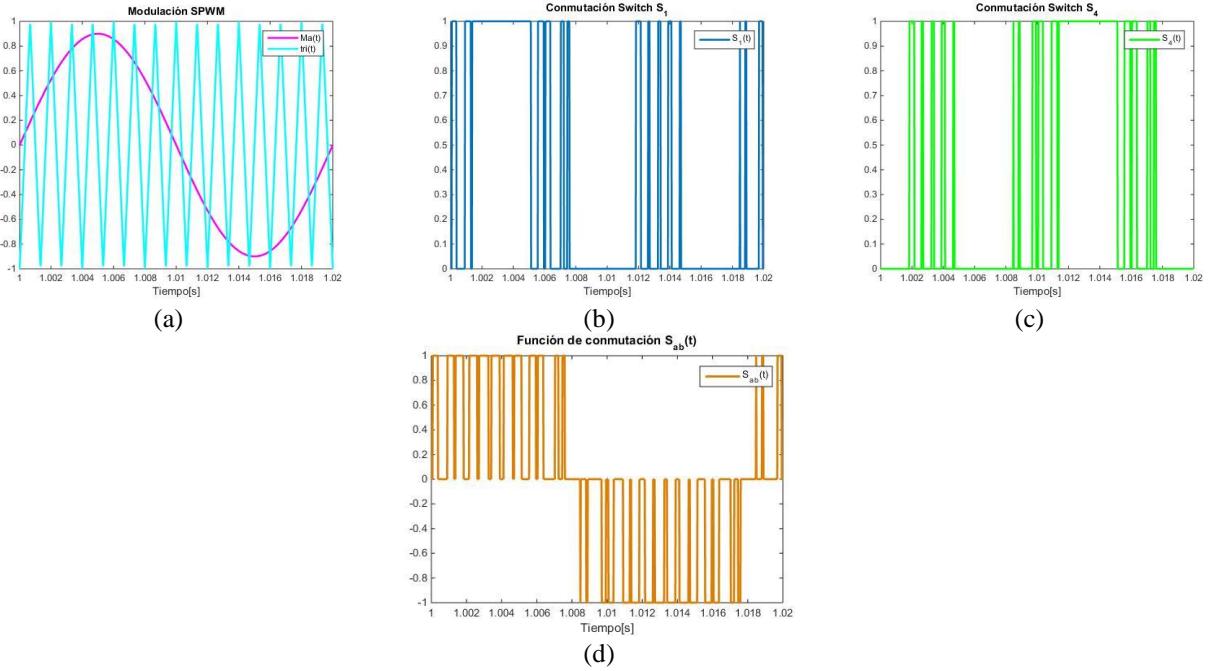
**Fig. 5.39 – FFT y THD en el ICT en PSIM®**

(a) FFT Corriente  $I_{ia}$ ; (b) FFT Voltaje  $V_{oan}$ ; (c) THD Corriente  $I_{ia}$  y Voltaje  $V_{oan}$

A continuación se muestran las simulaciones realizadas en *Simulink*®. Los parámetros de entrada al sistema corresponden a los de la modulación SPWM y son los de la Tabla 3.6.

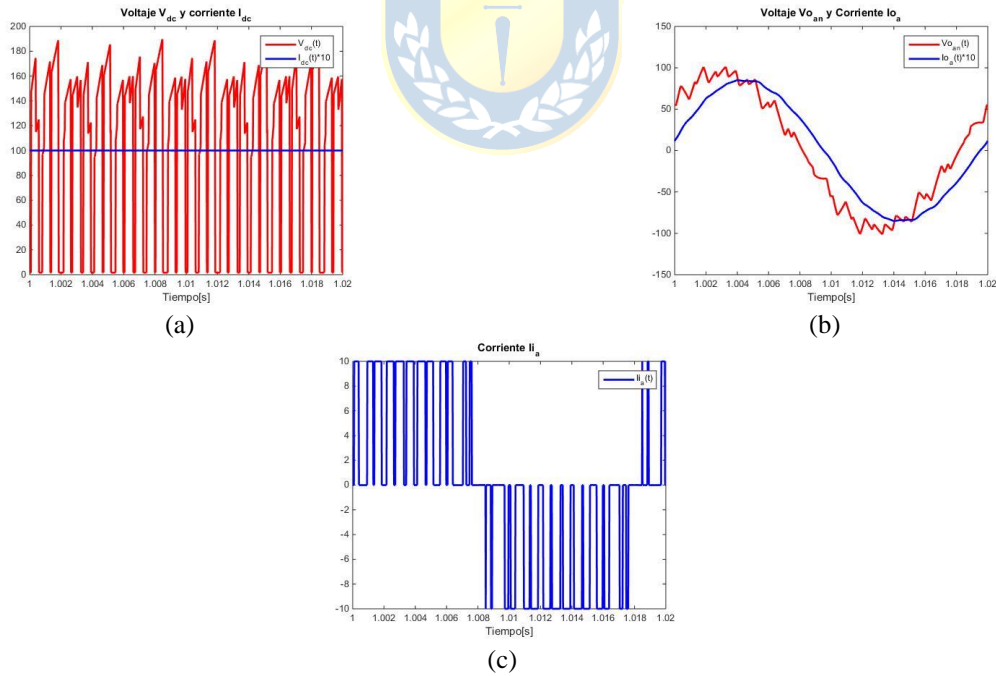
Dentro del subsistema SM\_IGBT, el subsistema correspondiente a la modulación SPWM se conserva igual al del caso IVT. Las curvas correspondientes a la modulación se muestran en la Fig. 5.40, se puede observar que se obtiene los mismo resultados para la modulación SPWM que en la simulación mediante *PSIM*®. En las Fig. 5.41 (a), Fig. 5.41 (b) y Fig. 5.41 (c) se muestran las curvas características de estas topología y, como era de esperar, se obtiene el mismo comportamiento con respecto a la simulación en *PSIM*®.





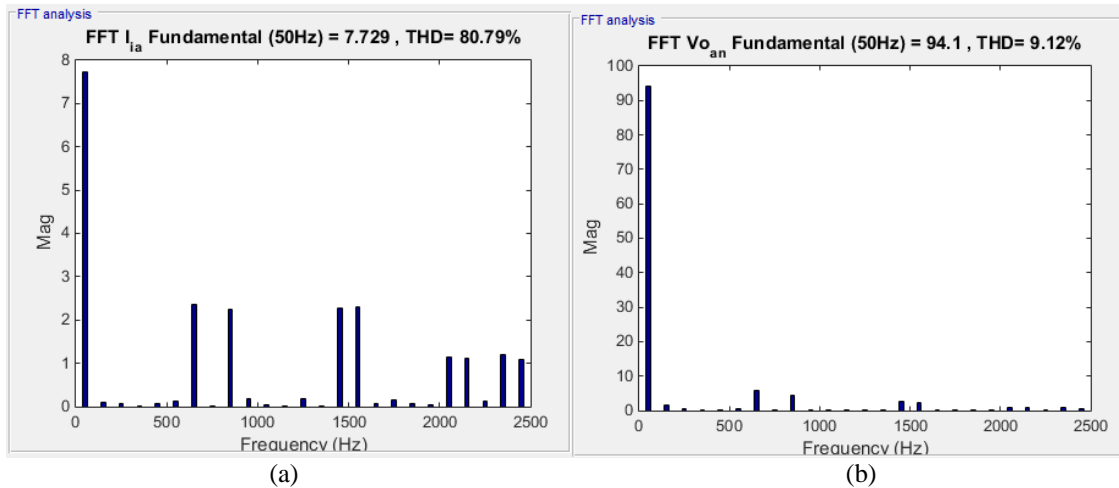
**Fig. 5.40 – Modulación SPWM ICT en Simulink®**

(a) Moduladora  $M_a$  y triangular  $tri(t)$ ; (b) Conmutación switch  $S_1$ ; (c) Conmutación switch  $S_4$ ; (d) Función de conmutación  $S_{ab}(t)$



**Fig. 5.41 – Formas de onda en S.S en el ICT en Simulink®**

(a) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 10$ ; (b) Voltaje  $V_{oan}$  y Corriente  $I_{oan} \cdot 10$ ; (c) Corriente  $I_{ia}$



**Fig. 5.42 – FFT Y THD en el ICT en Simulink®**

(a) FFT y THD Corriente  $I_{ia}$  ; (b) FFT y THD Voltaje  $V_{oan}$

#### D. Rectificador Fuente de Corriente Trifásico

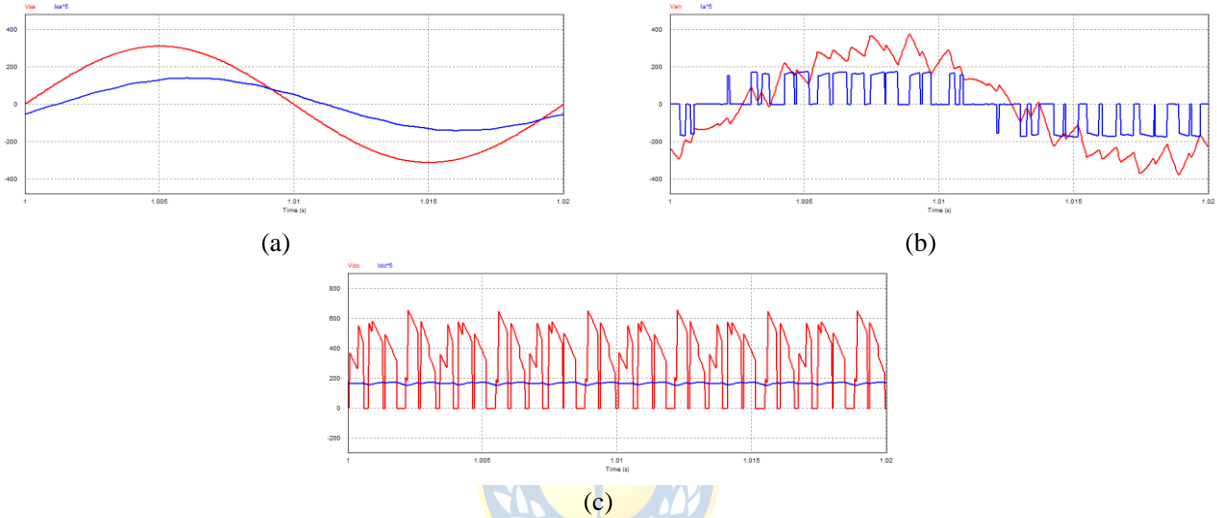
Finalmente, la última topología trifásica corresponde a la del RCT, ver Anexo D.8. La modulación SPWM es la misma utilizada para el ICM. Los parámetros utilizados para la modulación del RCT son los de la Tabla 3.7; el código C de los bloques C se pueden encontrar en el Anexo E.2. Mientras que los valores de los componentes utilizados en los circuitos se encuentra en la Tabla 5.8.

**Tabla 5.8 – Parámetros Componentes en el Circuito del RCT**

Parámetro	Valor
$V_s$	$220\sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t + \varphi)$ [V]
$R_s$	1 [ $\Omega$ ]
$L_s$	30 [mH]
$C_r$	50 [ $\mu$ F]
$R_{dc}$	10 [ $\Omega$ ]
$L_{dc}$	30 [mH]

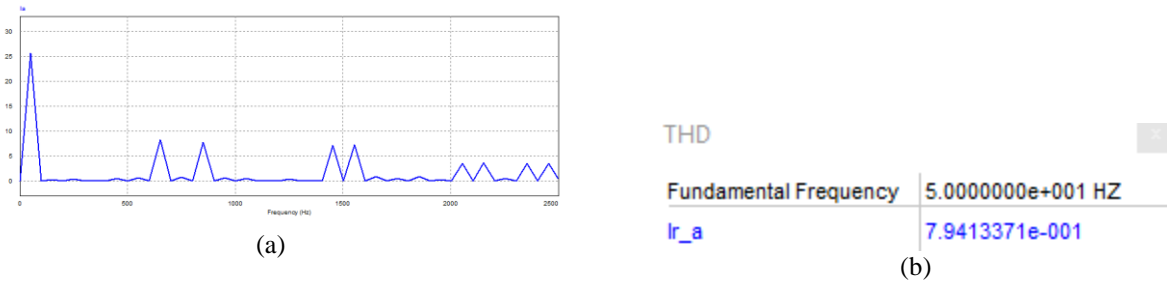
A partir de la modulación de la Fig. 5.37 se obtienen las conmutaciones de los switches del convertidor y a la función de conmutación  $S_{ab}$ .

Las curvas características de esta topología se observan en la Fig. 5.43. Se observa el voltaje y corriente de entrada, el voltaje y corriente de la fase a después del filtro capacitivo y el voltaje y corriente d.c a la salida del conversor. La naturaleza PWM de la corriente  $I_{ra}$  en el lado a.c exige el uso de un filtro inductivo- capacitivo para reducir la componente de *ripple* de la onda de corriente en la red alterna. Por otra parte, para la obtención de las curvas en el lado d.c se requiere del uso de un filtro inductivo cuya función es aplanar la corriente en la carga disminuyendo así la componente de ripple presenten en la señal de salida.



**Fig. 5.43 – Formas de onda en S.S en el RCT en PSIM®**

(a) Voltaje  $V_{sa}$  y Corriente  $I_{sa} \cdot 5$ ; (b) Voltaje  $V_{ran}$  y Corriente  $I_{ra} \cdot 5$ ; (c) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 5$



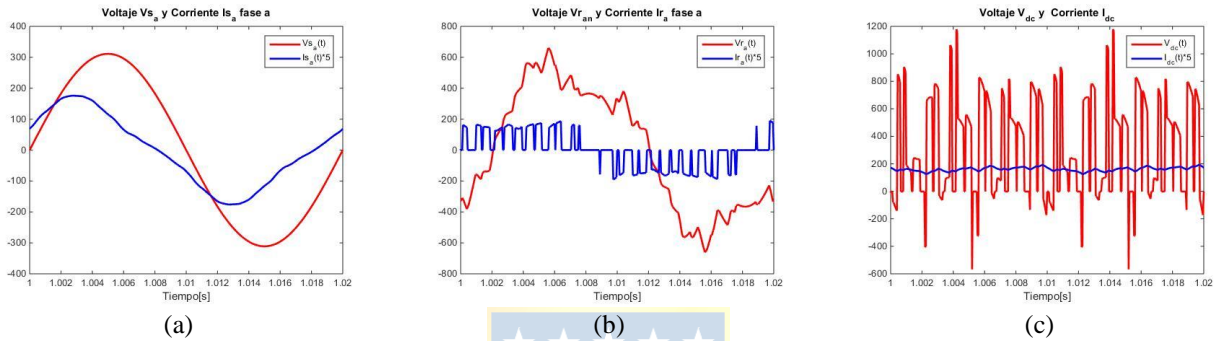
**Fig. 5.44 – FFT y THD Corriente  $I_{ra}$  en el RCT en PSIM®**

(a) FFT Corriente  $I_{ra}$  en el RCT; (b) THD Corriente  $I_{ra}$  en el RCT

A continuación, se presenta los resultados del modelo para el RCT en Simulink®. Al utilizar la misma modulación en el ICT, las curvas correspondientes a la modulación SPWM y sus respectivas curvas de switcheo y  $S_{ab}$  se repiten, ver Fig. 5.40 . Comparando las formas de ondas se observa que

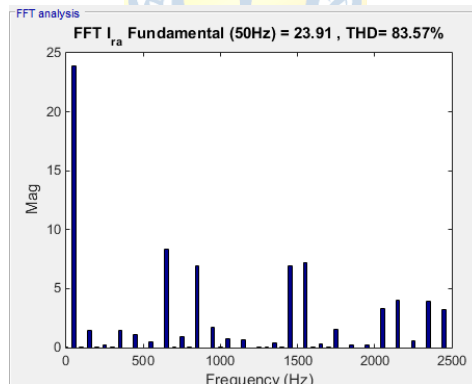
hasta el momento las respuestas de ambos softwares coinciden por lo que las curvas características de la topología RCT en *Simulink*<sup>®</sup> deberían responder de la misma forma que las obtenidas en *PSIM*<sup>®</sup>.

En la Fig. 5.45 se muestran las curvas características de estas topología y, como era de esperar, se obtiene el mismo comportamiento con respecto a la simulación en *PSIM*<sup>®</sup>. En las Fig. 5.46 se muestran la FFT y THD para la curva  $I_{ra}$ , se obtiene el mismo comportamiento con respecto a la simulación en *PSIM*<sup>®</sup>.



**Fig. 5.45 – Formas de onda en S.S en el RCT en Simulink<sup>®</sup>**

(a) Voltaje  $V_{sa}$  y Corriente  $I_{sa} \cdot 5$ ; (b) Voltaje  $V_{ran}$  y Corriente  $I_{ra} \cdot 5$ ; (c) Voltaje  $V_{dc}$  y Corriente  $I_{dc} \cdot 5$

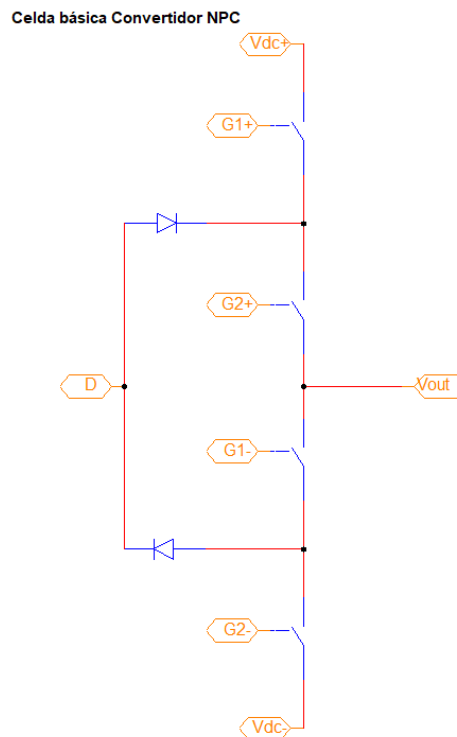


**Fig. 5.46 – FFT y THD Corriente  $I_{ra}$  en RCT en Simulink<sup>®</sup>**

## 5.2.4 Convertidores Estáticos de Potencia Multiniveles

### A. Convertidor Multinivel NPC

A continuación, se presenta la comparación entre la simulación obtenida mediante PSIM<sup>®</sup> y Simulink<sup>®</sup> para la topología de un inversor NPC trifásico. Cabe destacar que la simulación realizada en Simulink<sup>®</sup> se realizó mediante el uso de la biblioteca de la celda básica de un convertidor NPC, Fig. 5.47. La simulación en PSIM<sup>®</sup> para esta topología se puede revisar en el Anexo D.9.



**Fig. 5.47 – Sub-circuito celda básica convertidor NPC en PSIM<sup>®</sup>**

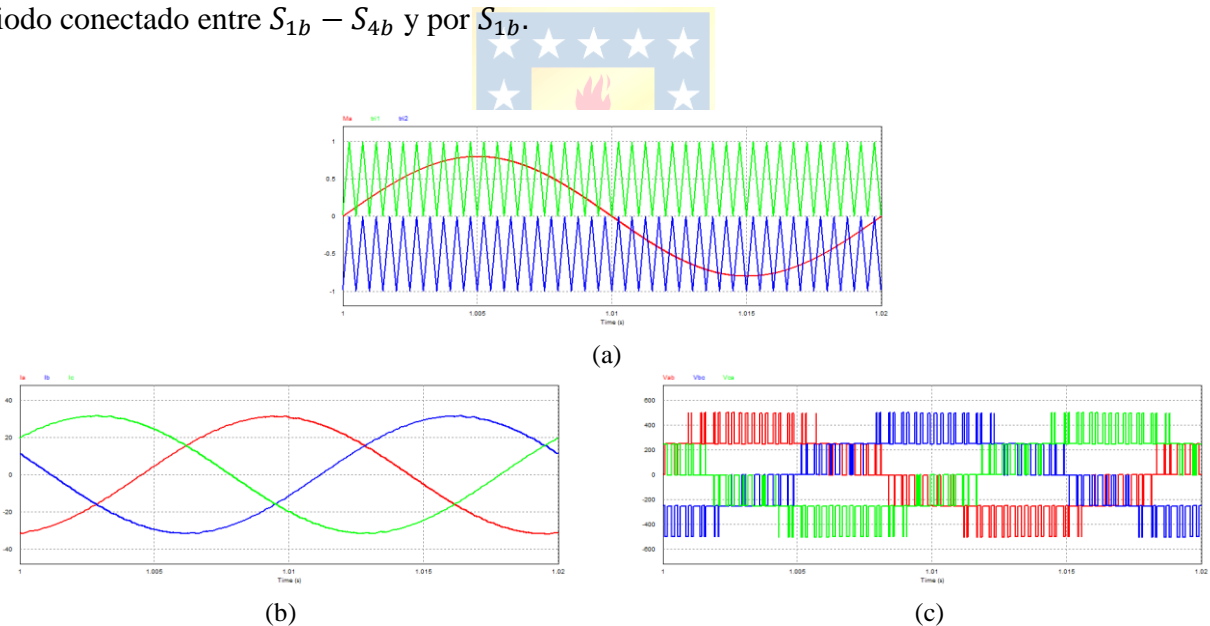
En la Fig. 5.48 (a) se observa la modulación SPWM para el inversor NPC trifásico de tres niveles. Se utilizó esta modulación para esta topología ya que con esta técnica lo que se busca es minimizar el contenido armónico de la tensión a la salida del inversor, también se puede regular la amplitud y frecuencia de salida; y en el caso que la topología lo requiera se puede lograr un equilibrio de las tensiones instantáneas de los capacitores. Las curvas características de esta topología se pueden ver en la en la Fig. 5.48 (b) y Fig. 5.48 (c) para las tres corrientes de salida de cada fase y los tres voltajes entre líneas de salida respectivamente. Los tres niveles de tensión se pueden ver más claramente en la Fig. 5.49 (a).

Para obtener las curvas de voltaje  $V_{ab}$  el NPC conecta dos diodos entre el punto medio de bus y el punto de conexión de los switches en serie  $S_{1a} - S_{4a}$  y  $S_{1b} - S_{4b}$ , cuya función es fijar la tensión de los switches en serie a  $V_{bus}/2$  habilitando un camino a la corriente de salida para lograr este valor de voltaje. De ahí su nombre “*diode clamp*” o diodo de anclaje.

Los valores del voltaje para cada nivel de salida se consiguen de la siguiente forma:

- $V_{bus}$  se debe encender  $S_{1a} - S_{4a}$  y apagando  $S_{1b} - S_{4b}$
- $V_{bus}/2$  se enciende  $S_{4a} - S_{1b}$  y se apagan  $S_{1a} - S_{4b}$
- Nivel cero de voltaje se encienden  $S_{1b} - S_{4b}$  y se apagan  $S_{1a} - S_{4a}$

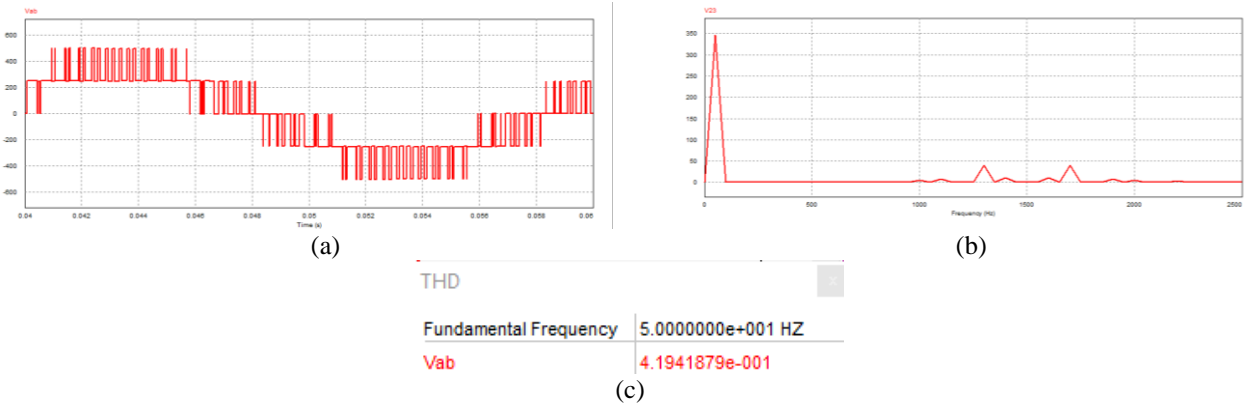
Cuando se tiene un nivel de tensión de  $V_{bus}/2$  a la salida, si la corriente es positiva esta circulara por el diodo conectado entre  $S_{1a} - S_{4a}$  y por  $S_{4a}$ , mientras que si es negativa circulara por el diodo conectado entre  $S_{1b} - S_{4b}$  y por  $S_{1b}$ .



**Fig. 5.48 – Modulación SPWM y Formas de onda del Inversor NPC trifásico de tres niveles en PSIM®**

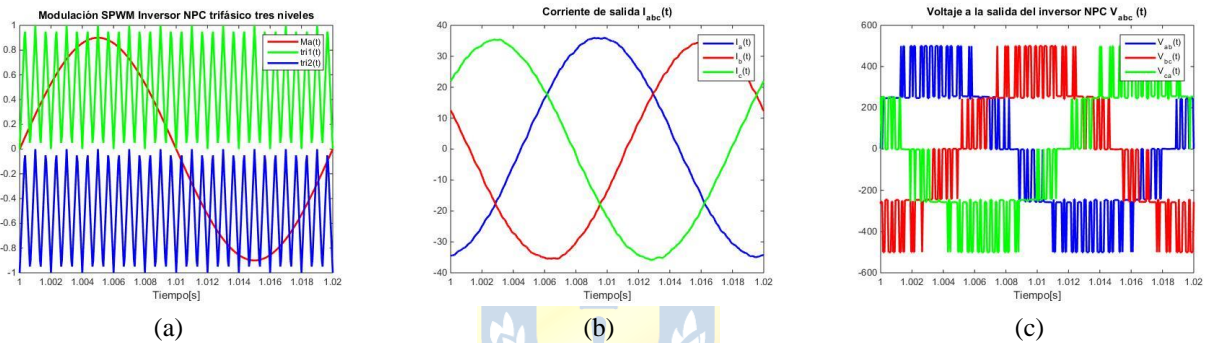
(a) Modulación SPWM; (b) Corriente de salida  $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$ ; (c) Voltajes de salida entre fases

$V_{ab}(t), V_{bc}(t), V_{ca}(t)$ .



**Fig. 5.49 – FFT y THD Voltaje  $V_{ab}(t)$  del Inversor NPC trifásico tres niveles en PSIM®**

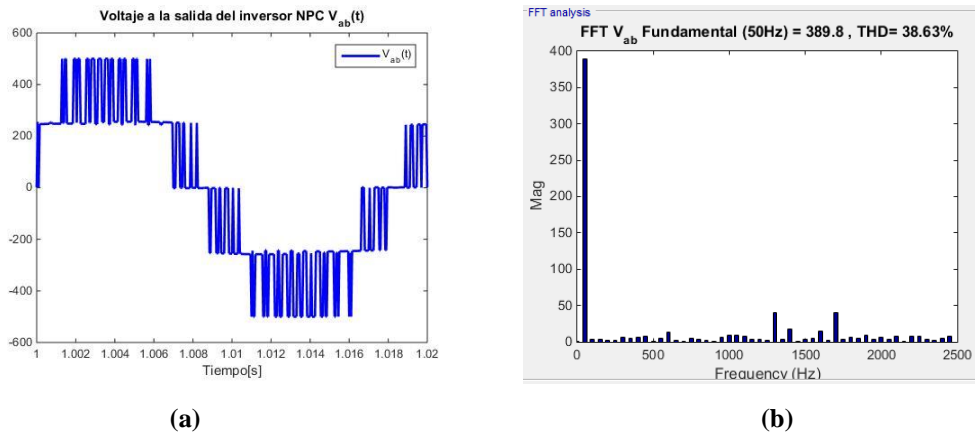
(a) Voltaje  $V_{ab}(t)$ ; (b) FFT y THD de  $V_{ab}(t)$



**Fig. 5.50 – Modulación SPWM y curvas características del Inversor NPC trifásico de tres niveles en**

**Simulink®**

(a) Modulación SPWM; (b) Corriente de salida  $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$ ; (c) Voltajes de salida entre fases  $V_{ab}(t), V_{bc}(t), V_{ca}(t)$ .



**Fig. 5.51 – Forma de onda  $V_{ab}$  y su respuesta en frecuencia del Inversor NPC trifásico tres niveles en**

**Simulink®.**

(a) Voltaje  $V_{ab}(t)$ ; (b) FFT y THD de  $V_{ab}(t)$

## Capítulo 6. Resultados de las Simulaciones en el Equipo OPAL – RT<sup>®</sup>

### 6.1. Introducción

El siguiente capítulo tiene como finalidad presentar y analizar las gráficas obtenidas mediante osciloscopio correspondientes a las simulaciones en tiempo real de los modelos anteriores. A su vez, se realizará la comparación entre simuladores a modo de comprobar una de las hipótesis de la tesis con respecto al uso de los simuladores *PSIM*<sup>®</sup> y *Mathcad*<sup>®</sup> como herramientas más accesibles para los usuarios y poner a prueba una de las hipótesis con respecto al uso de estos simuladores y sus respuestas.

### 6.2. Modelo Simplificado del Panel Solar Fotovoltaico

En la Fig. 6.1 se presentan las simulaciones obtenidas a partir de la simulación en RT – LAB<sup>®</sup> mientras que en la Fig. 6.2 se muestran las señales obtenidas al cargar el modelo de RT – LAB<sup>®</sup> en el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>. Al comparar dichas curvas con las obtenidas anteriormente mediante los otros *softwares* de simulación, estas coinciden con las simulaciones en tiempo real cumpliéndose así la hipótesis para la librería desarrollada para el modelo simplificado del panel solar obteniéndose modelos coincidentes.

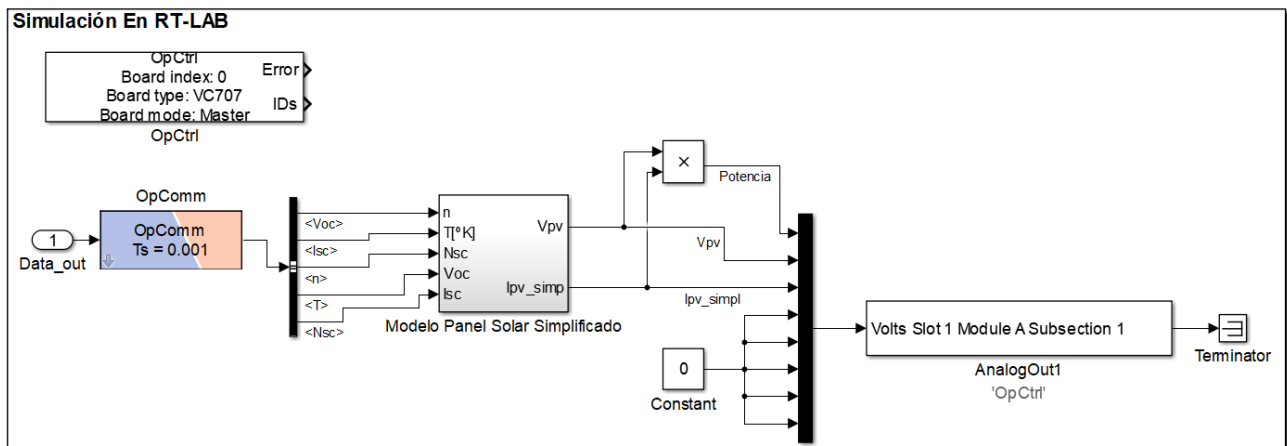
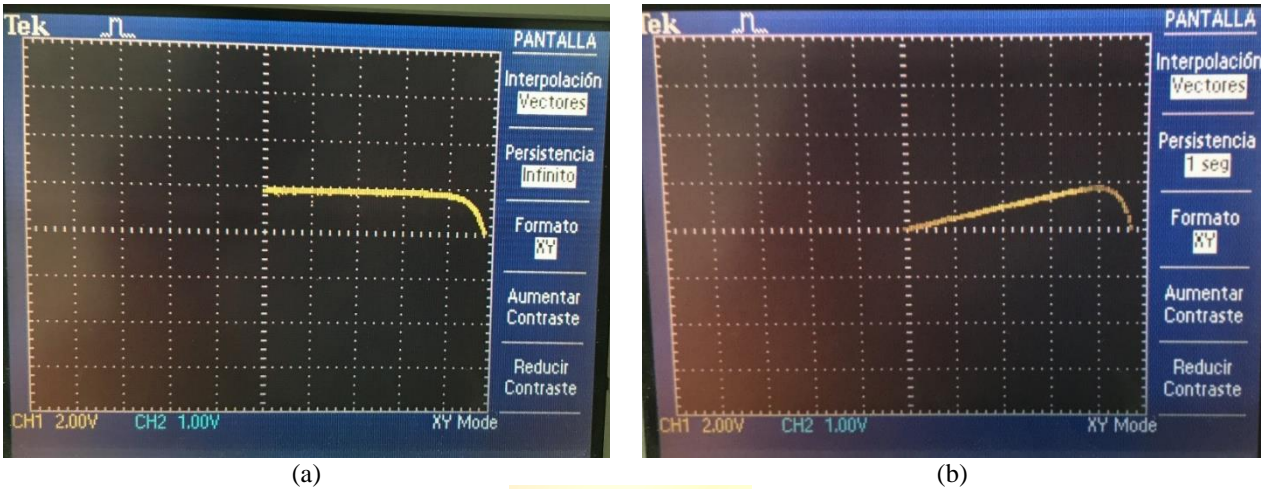


Fig. 6.1 – Simulación en Simulink<sup>®</sup> del Modelo Simplificado Panel Solar Fotovoltaico para el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>



**Tabla 6.1 – Valores de ganancia simulación Modelo simplificado panel solar**

Señal	Valor de ganancia
$I_{pv}$	1
$V_{pv}$	0.4
Potencia	0.053



**Fig. 6.2 – Curvas Modelo Simplificado Panel Solar FVG 60-156 OPAL – RT®**

(a) Curva de corriente v/s voltaje; (b) Curva de Potencia

## 6.3. Convertidores Estáticos de Potencia Monofásicos

### 6.3.1 IVM

A continuación se presentan los resultados obtenidos al realizar la simulación en tiempo real en el equipo OPAL – RT®. En la Fig. 6.3 se puede observar la simulación en RT – LAB®, previamente realizada en Simulink®.

Como se mencionó en el capítulo 2, RT – LAB® trabaja en base a subsistemas. En la Fig. 6.3 (a) se puede observar que el modelo para el IVM, y para las todas las topologías en estudio, consta de dos subsistemas, el SC\_GUI correspondiente a la interfaz gráfica del modelo y la cual será modificada en tiempo real al momento de cargarlo al equipo, ver Fig. 6.3 (b); y el subsistema SM\_IVM el cual corresponde al modelo del convertidor en estudio, Fig. 6.3 (c).

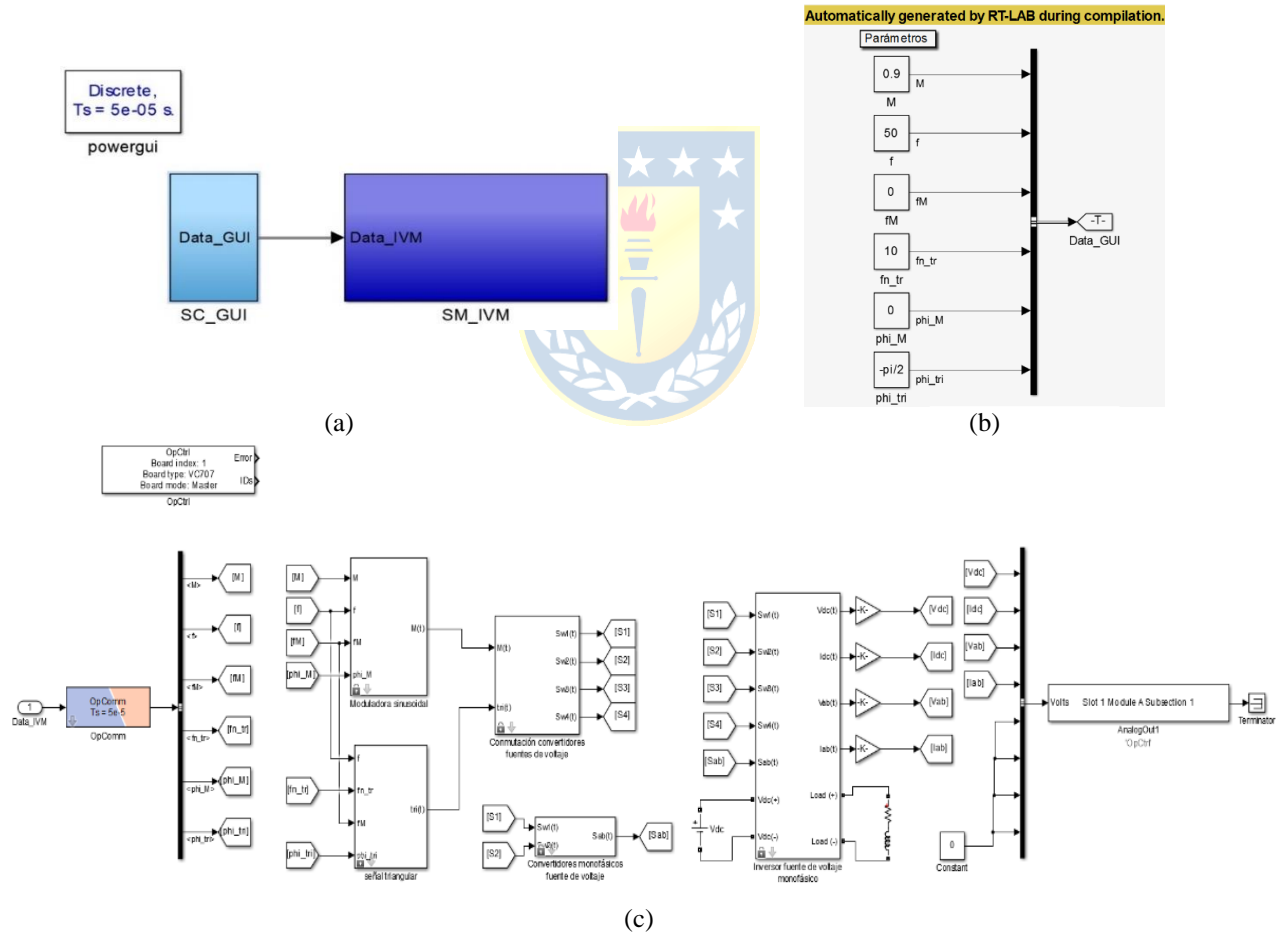
Una vez que los modelos son cargados al equipo OPAL – RT®, las señales de salidas serán visualizadas y adquiridas a través del osciloscopio Tektronix Tbs1104, 100 [MHz], 4 canales.. Este osciloscopio tiene un rango de  $\pm 16$  [V] por lo que en el modelo en Simulink® se deben agregar una

ganancia, cuyo valor dependerán del rango de la señal de salida, antes del bloque *AnalogOut* de la librería de *RT – LAB*<sup>®</sup>.

En la Fig. 6.4 se observa la modulación del IVM junto a sus señales de conmutación y función de conmutación  $S_{ab}$  mientras que en la Fig. 6.5 se puede ver las formas de ondas características del IVM. Al analizar estas formas de ondas se observa que se obtiene el comportamiento en tiempo real del sistema en estudio.

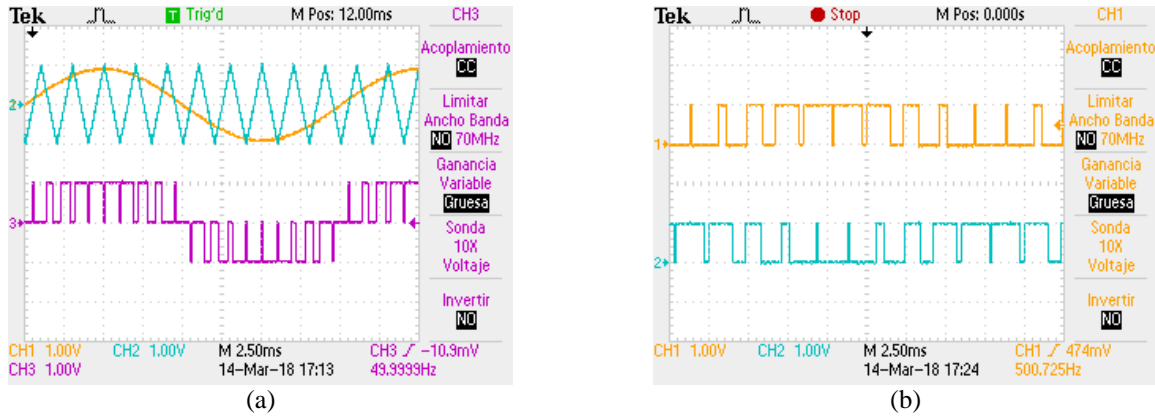
**Tabla 6.2 – Valores de ganancia simulación IVM**

Señal	Valor de ganancia
$V_{dc}, V_{ab}$	0.032
$I_{dc}, I_{ab}$	0.356



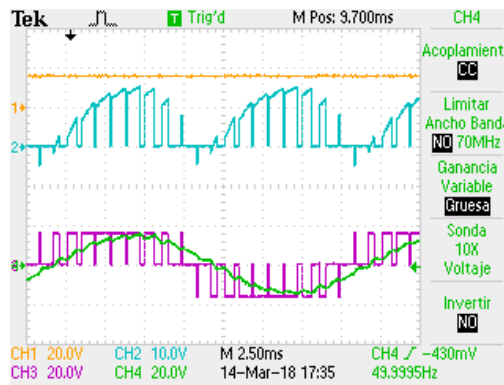
**Fig. 6.3 – Simulación en Simulink<sup>®</sup> del IVM para el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>**

(a) Simulación para RT – LAB<sup>®</sup>; (b) Sub-sistema SC\_GUI; (c) Sub-sistema SM\_IVM



**Fig. 6.4 – Modulación IVM en OPAL – RT®**

(a) Modulación SPWM, Ch1 y Ch2. Función de conmutación  $S_{ab}(t)$ , Ch3; (b) Conmutación switch  $S_1$ , Ch1. Conmutación switch  $S_2$ , Ch2.



**Fig. 6.5 – Formas de onda del IVM en la OPAL – RT®.**

Ch1:  $V_{dc}$ , Ch2:  $I_{dc}$ , Ch3:  $V_{ab}$ , Ch4:  $I_{ab}$

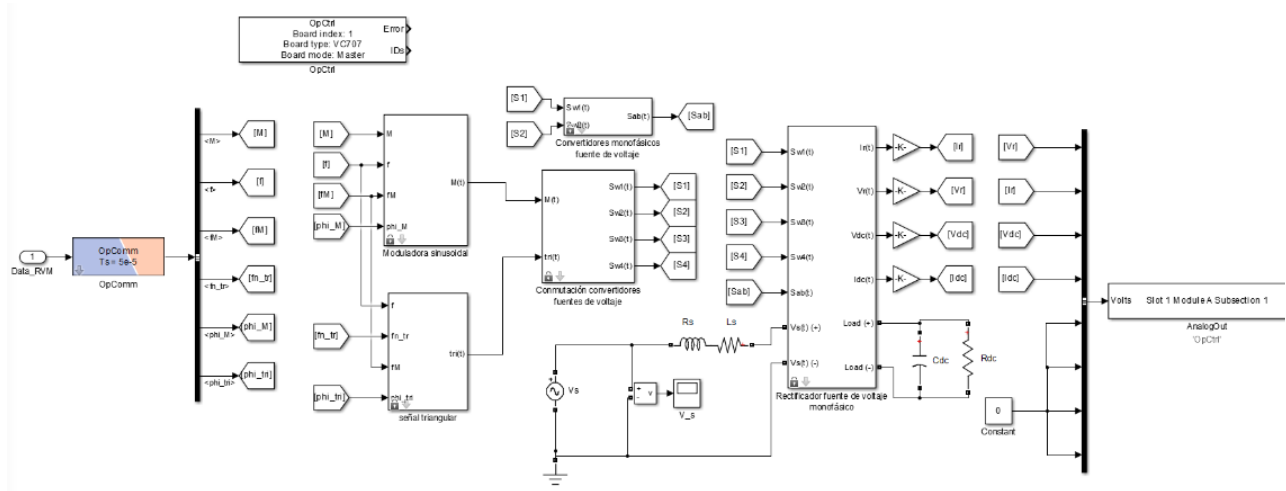
### 6.3.2 RVM

En la Fig. 6.7 se puede observar la simulación en RT – LAB®, previamente realizada en Simulink®. Al igual que en el caso anterior se mantiene el mismo esquema de trabajo en cuanto a subsistemas.

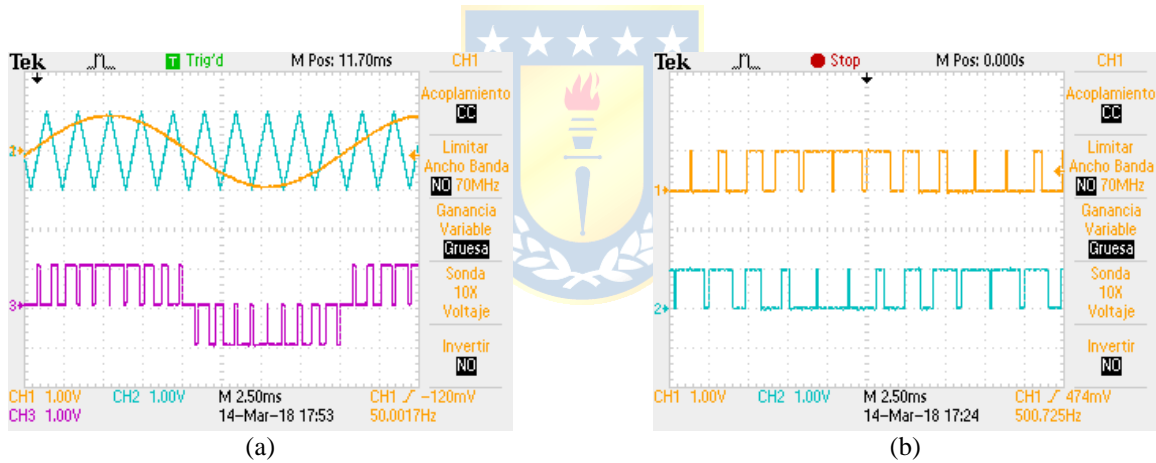
En la Fig. 6.8 se observa la modulación del RVM junto a sus señales de conmutación y función de conmutación  $S_{ab}$  mientras que en la Fig. 6.9 se puede ver las formas de ondas características del RVM donde es posible observar que el modelo se comporta igual a los simulados en los softwares usados anteriormente.

**Tabla 6.3 – Valores de ganancia simulación RVM**

Señal	Valor de ganancia
$V_r, I_r, V_{dc}, I_{dc}$	0.05

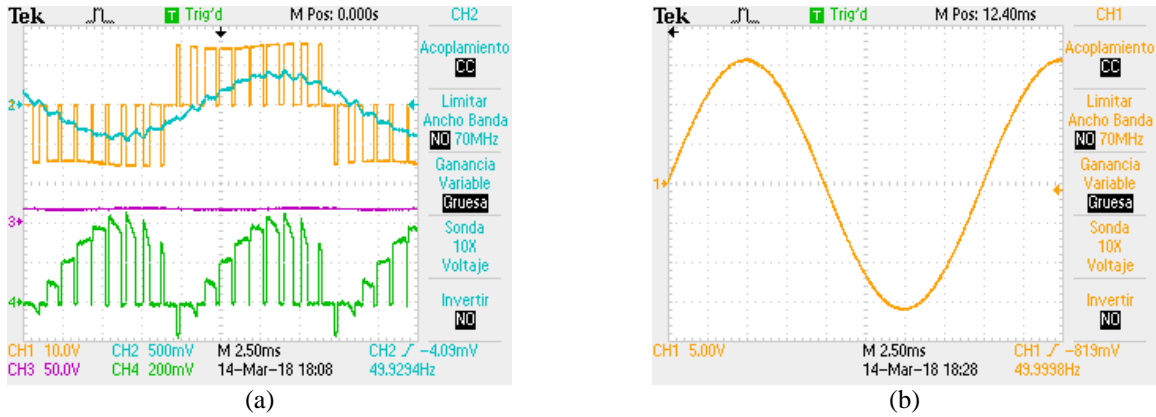


**Fig. 6.6 – Simulación en Simulink® del RVM para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM\_RVM**



**Fig. 6.7 – Modulación RVM en OPAL – RT®**

(a) Modulación SPWM, Ch1 y Ch2. Función de conmutación  $S_{ab}(t)$ , Ch3; (b) Conmutación switch  $S_1$ , Ch1. Conmutación switch  $S_2$ , Ch2.



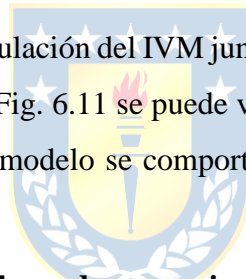
**Fig. 6.8 – Formas de onda del RVM en la OPAL – RT®**

(a) Ch1: $V_r$ , Ch2:  $I_r$ , Ch3: $V_{dc}$ , Ch4: $I_{dc}$ ; (b) Ch1:  $V_s$

### 6.3.3 ICM

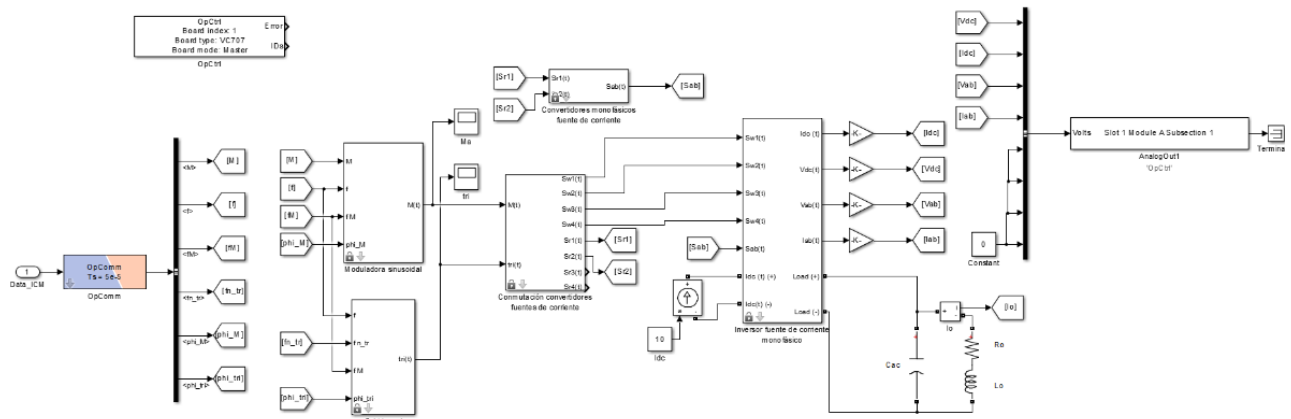
En la Fig. 6.9 se puede observar la simulación en RT – LAB®, previamente realizada en Simulink®.

En la Fig. 6.10 se observa la modulación del IVM junto a sus señales de conmutación y función de conmutación  $S_{ab}$  mientras que en la Fig. 6.11 se puede ver las formas de ondas características del ICM donde es posible observar que el modelo se comporta igual a los simulados en los softwares usados anteriormente.

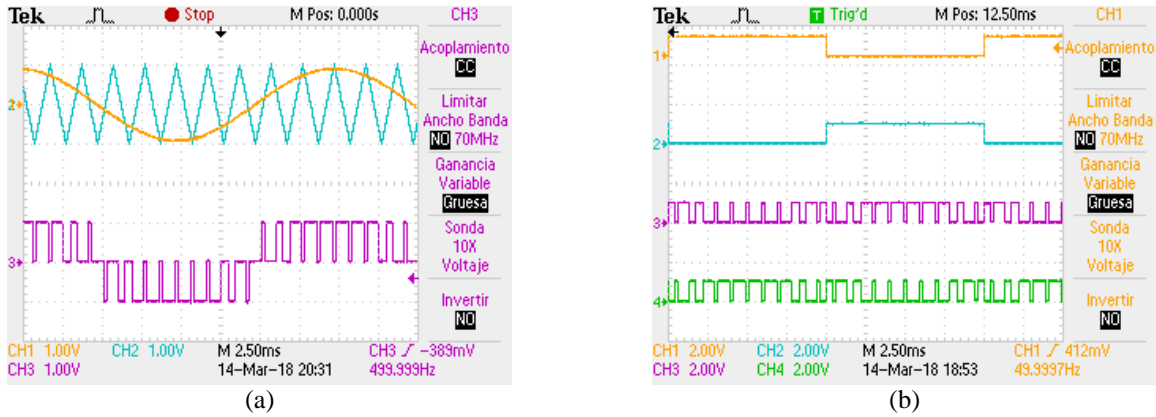


**Tabla 6.4 – Valores de ganancia simulación ICM**

Señal	Valor de ganancia
$V_{dc}, I_{dc}, V_{ab}, I_{ab}, I_o$	0.08

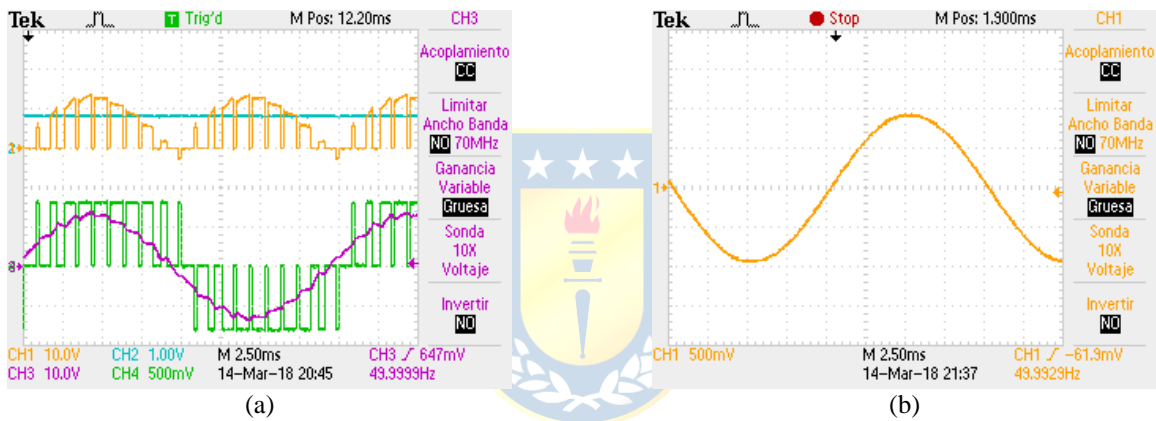


**Fig. 6.9 – Simulación en Simulink® del ICM para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM\_ICM**



**Fig. 6.10 – Modulación ICM en OPAL – RT®**

(a) Modulación SPWM, Ch1 y Ch2. Función de conmutación  $S_{ab}(t)$ , Ch3; (b) Conmutación switch  $S_1$ , Ch1. Conmutación switch  $S_2$ , Ch2. Conmutación switch  $S_3$ , Ch3. Conmutación switch  $S_4$ , Ch4.



**Fig. 6.11 – Formas de onda del ICM en la OPAL – RT®**

(a) Ch1:  $V_{dc}$ , Ch2:  $I_{dc}$ , Ch3:  $V_{ab}$ , Ch4:  $I_{ab}$ ; (b) Ch1:  $I_o$

### 6.3.4 RCM

En la Fig. 6.12 se puede observar la simulación en RT – LAB®, previamente realizada en Simulink®.

En la Fig. 6.13 se observa la modulación del IVM junto a sus señales de conmutación y función de conmutación  $S_{ab}$  mientras que en la Fig. 6.14 se puede ver las formas de ondas características del RCM donde es posible observar que el modelo se comporta igual a los simulados en los softwares usados anteriormente.

**Tabla 6.5 – Valores de ganancia simulación RCM**

Señal	Valor de ganancia
$V_r, I_r, V_{dc}, I_{dc}, V_s, I_s$	0.04

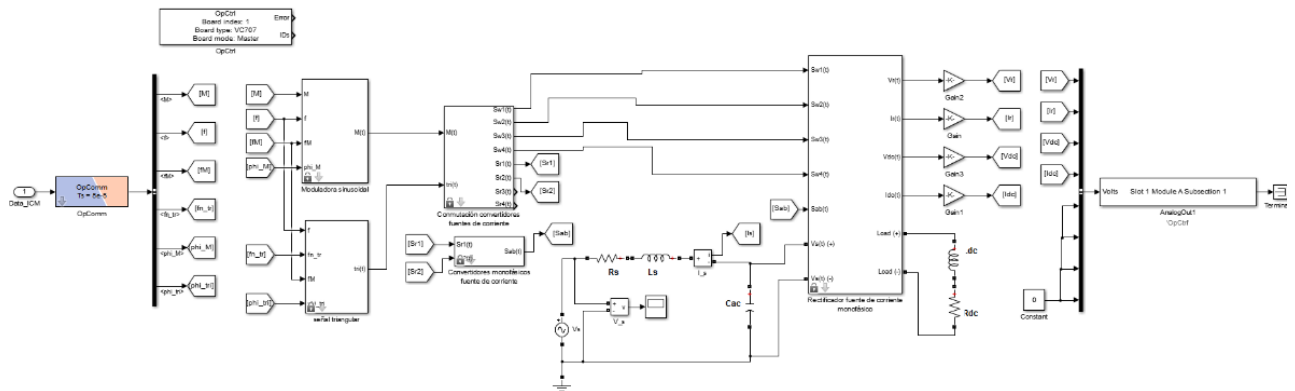


Fig. 6.12 – Simulación en *Simulink*<sup>®</sup> del RCM para el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>, Sub-sistema SM\_RCM

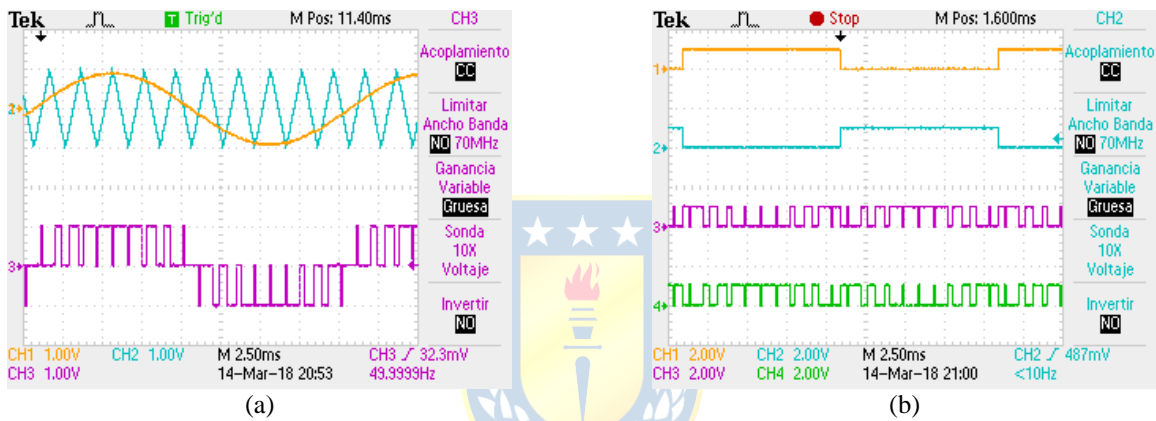


Fig. 6.13 – Modulación RCM en OPAL – RT<sup>®</sup>

(a) Modulación SPWM, Ch1 y Ch2. Función de conmutación  $S_{ab}(t)$ , Ch3; (b) Conmutación switch  $S_1$ , Ch1. Conmutación switch  $S_2$ , Ch2. Conmutación switch  $S_3$ , Ch3. Conmutación switch  $S_4$ , Ch4.

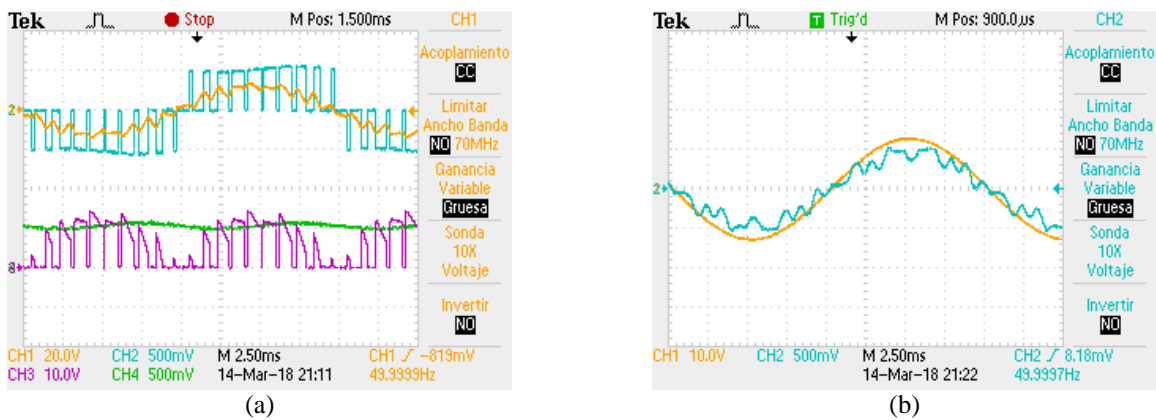


Fig. 6.14 – Formas de onda del RCM en la OPAL – RT<sup>®</sup>

(a) Ch1:  $V_r$ , Ch2:  $I_r$ , Ch3:  $V_{dc}$ , Ch4:  $I_{dc}$ ; (b) Ch1:  $V_s$ , Ch2:  $I_s$

## 6.4. Convertidores Estáticos de Potencia Trifásicos

### 6.4.1 IVT

A continuación se presentan los resultados obtenidos al realizar la simulación en tiempo real en el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>. En la Fig. 6.15 se puede observar la simulación en RT – LAB<sup>®</sup>, previamente realizada en Simulink<sup>®</sup>.

Al igual que en los casos monofásicos, RT – LAB<sup>®</sup> trabaja en base a subsistemas. En las topologías trifásicas se vuelve a repetir el uso del subsistema SC\_GUI correspondiente a la interfaz gráfica del modelo y la cual será modificada en tiempo real al momento de cargarlo al equipo, ver Fig. 6.15; y el subsistema SM\_IVT el cual corresponde al modelo del convertidor en estudio, Fig. 6.16 Para simplificar los modelos trifásicos en la simulación realizada en Simulink<sup>®</sup>, se agrupo la modulación SPWM en un subsistema, Fig. 6.16 (b)

En la Fig. 6.17 se observa la modulación del IVT junto a sus señales de conmutación y función de conmutación  $S_{ab}$  mientras que en la Fig. 6.18 se puede ver las formas de ondas características del IVT. Al analizar estas formas de ondas se observa que se obtiene el comportamiento en tiempo real del sistema en estudio.

Tabla 6.6 – Valores de ganancia simulación IVT

Señal	Valor de ganancia
$V_{oan}, V_{dc}, V_{lab}$	0.032
$I_{oan}, I_{dc}$	0.64

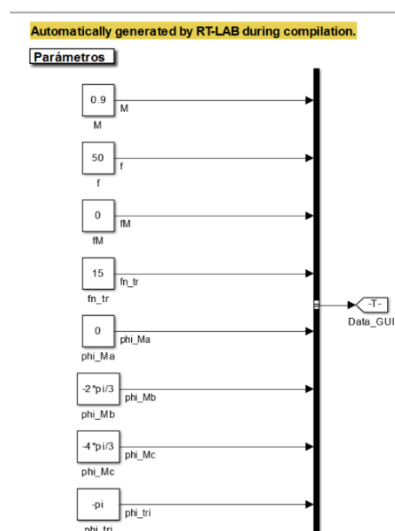
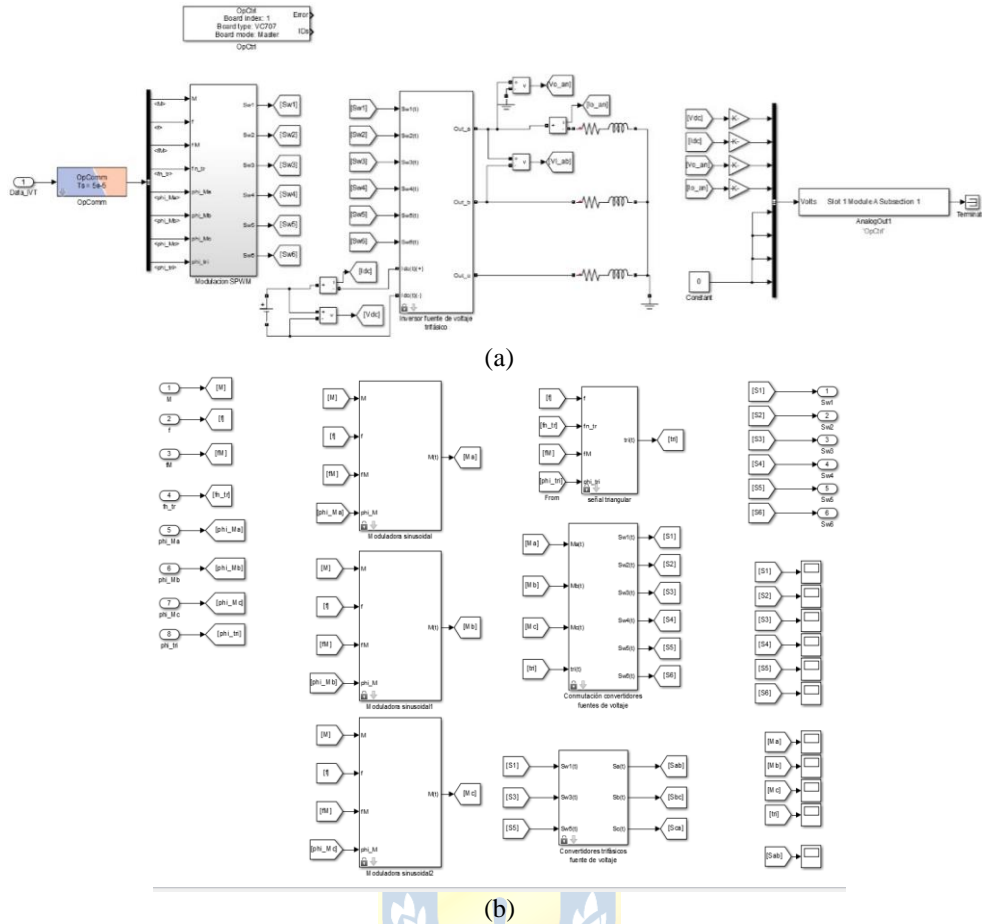
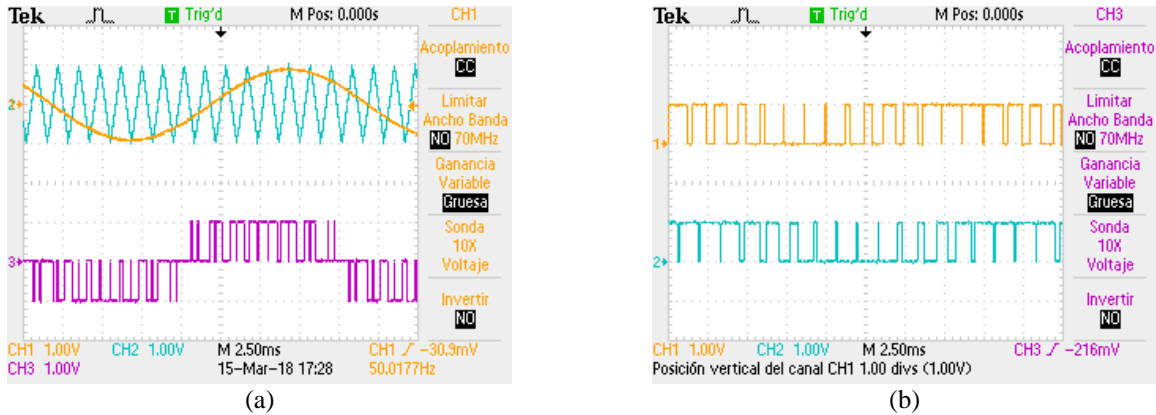


Fig. 6.15 – Simulación en Simulink<sup>®</sup> del IVT para el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>, Sub-sistema SC\_GUI



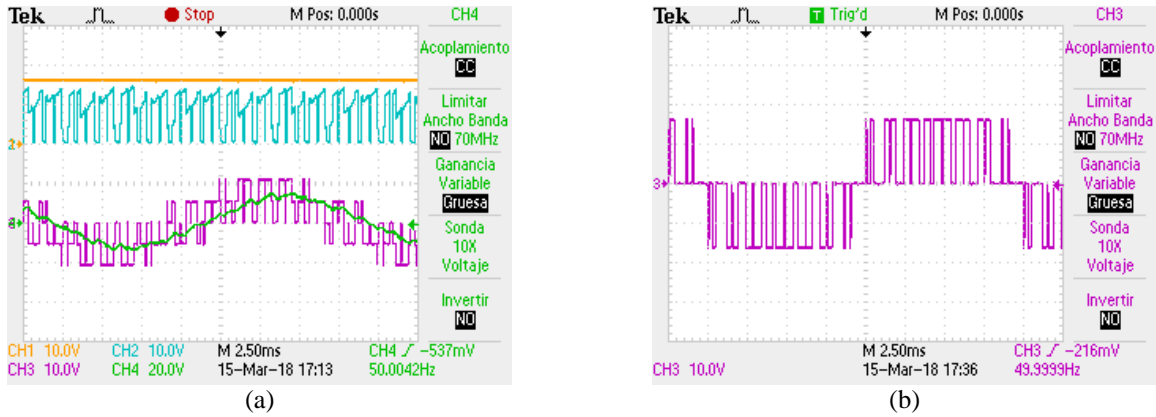


**Fig. 6.16 – Simulación en *Simulink*<sup>®</sup> del IVT para el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>**  
**(a)Sub-sistema SM\_IVT; (b) Sub-sistema Modulación SPWM IVT**



**Fig. 6.17 – Modulación IVT en OPAL – RT<sup>®</sup>**

**(a)** Modulación SPWM, Ch1 y Ch2. Función de conmutación  $S_{ab}(t)$ , Ch3; **(b)** Conmutación switch  $S_1$ , Ch1. Conmutación switch  $S_3$ , Ch2.



**Fig. 6.18 – Formas de onda del IVT en la OPAL – RT®.**  
 (a) Ch1:  $V_{dc}$ , Ch2:  $I_{dc}$ , Ch3:  $V_{oa}$ , Ch4:  $I_{oa}$ ; (b) Ch1:  $V_{ab}$

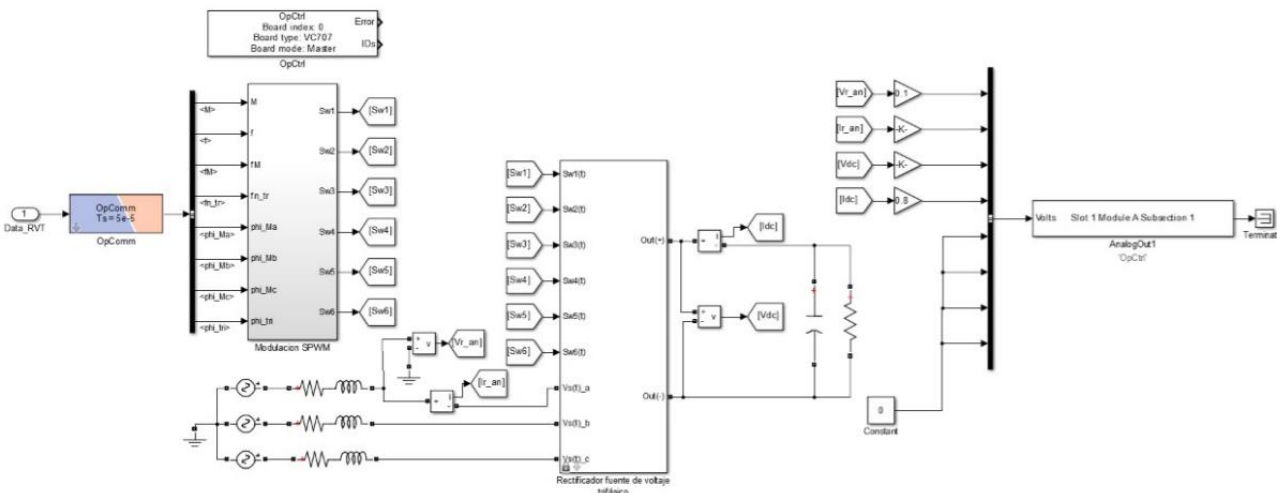
**6.4.2 RVT**

En la Fig. 6.19 se puede ver el subsistema SM\_RVT el cual corresponde al modelo del convertidor en estudio. La modulación SPWM es la misma utilizada en el caso IVT por lo cual sus formas de ondas se repiten.

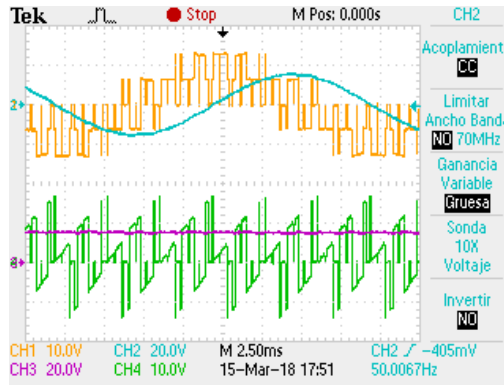
En la Fig. 6.20 se observan las formas de ondas características del RVT. Al analizar estas formas de ondas se observa que se obtiene el comportamiento en tiempo real del sistema en estudio.

**Tabla 6.7 – Valores de ganancia simulación RVT**

Señal	Valor de ganancia
$V_{ran}$	0.1
$I_{ran}$	0.64
$V_{dc}$	0.08
$I_{dc}$	0.8



**Fig. 6.19 – Simulación en Simulink® del RVT para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM\_RVT**



**Fig. 6.20 – Formas de onda del RVT en la OPAL – RT®.**

Ch1:  $V_{ran}$ , Ch2:  $I_{ra}$ , Ch3:  $V_{dc}$ , Ch4:  $I_{dc}$

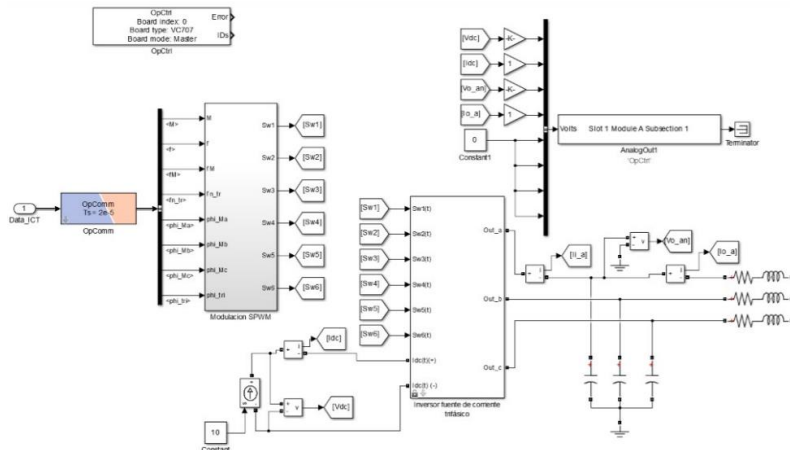
### 6.4.3 ICT

En la Fig. 6.21 se puede ver el subsistema SM\_ICT el cual corresponde al modelo del convertidor en estudio.

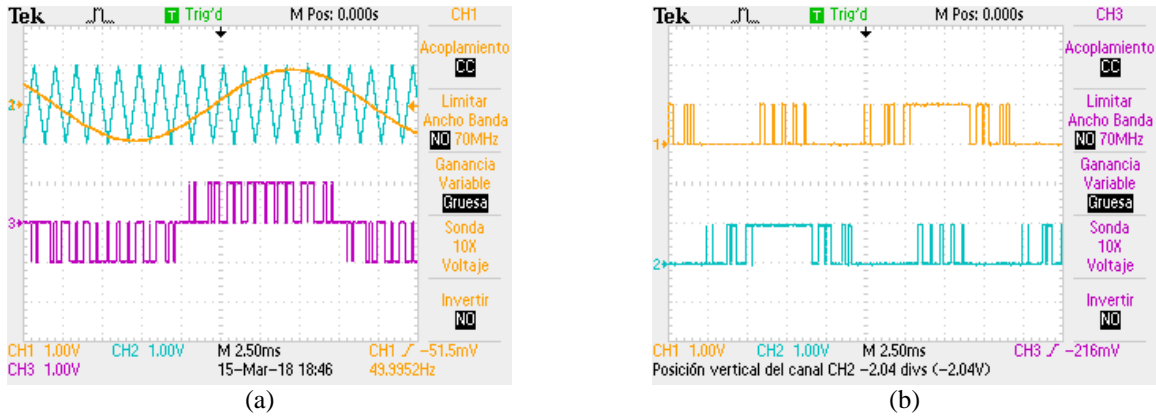
En la Fig. 6.22 se observa la modulación del ICT junto a sus señales de conmutación y función de conmutación  $S_{ab}$  mientras que en la Fig. 6.23 se puede ver las formas de ondas características del ICT. Al analizar estas formas de ondas se observa que se obtiene el comportamiento en tiempo real del sistema en estudio.

**Tabla 6.8 – Valores de ganancia simulación ICT**

Señal	Valor de ganancia
$V_{dc}$	0.08
$I_{dc}, I_{oan}, I_{ia}$	1
$V_{oan}$	0.107
$I_{dc}$	0.8

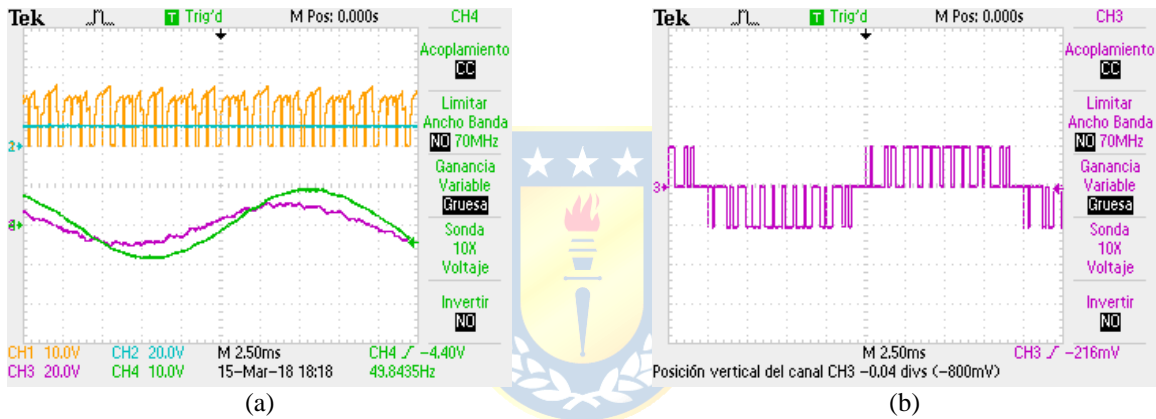


**Fig. 6.21 – Simulación en Simulink® del ICT para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM\_ICT**



**Fig. 6.22 – Modulación ICT en OPAL – RT®**

(a) Modulación SPWM, Ch1 y Ch2. Función de conmutación  $S_{ab}(t)$ , Ch3; (b) Conmutación switch  $S_1$ , Ch1. Conmutación switch  $S_4$ , Ch2.



**Fig. 6.23 – Formas de onda del ICT en la OPAL – RT®.**

(a) Ch1:  $V_{dc}$ , Ch2:  $I_{dc}$ , Ch3:  $V_{oan}$ , Ch4:  $I_{oa}$ ; (b) Ch1:  $I_{ia}$

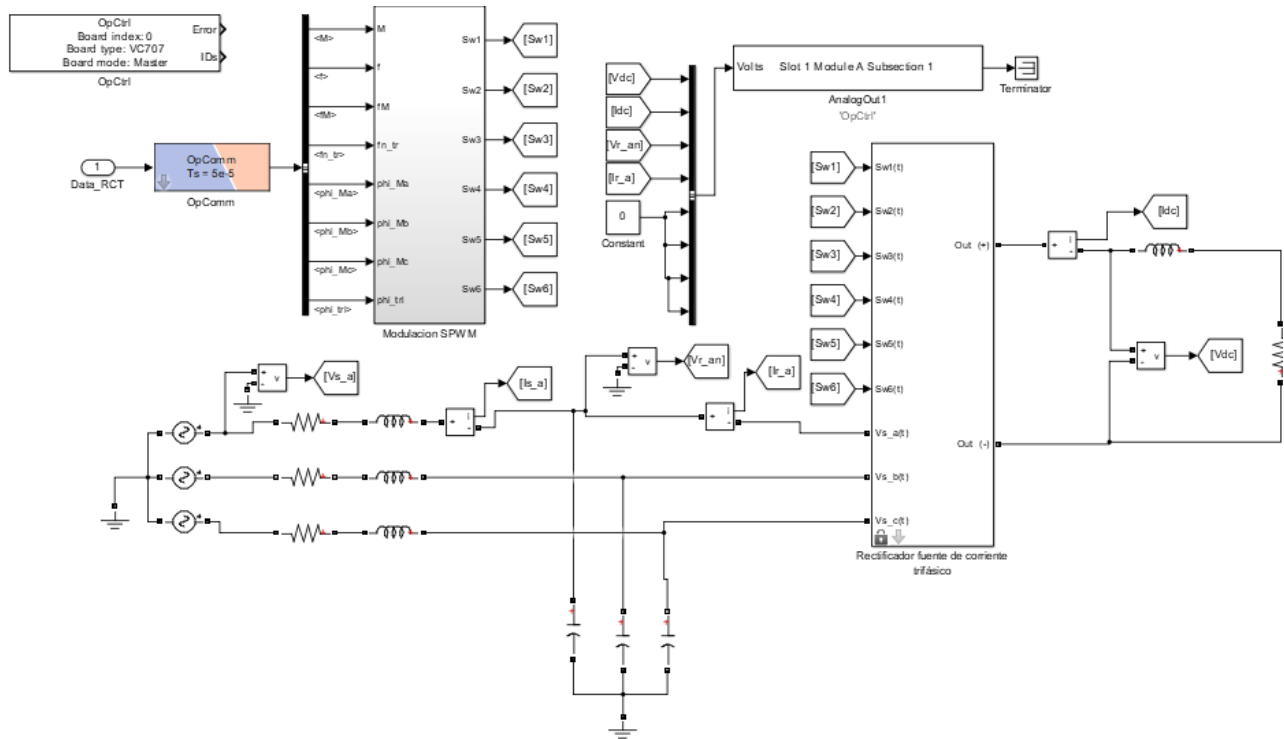
### 6.4.4 RCT

En la Fig. 6.24 se puede ver el subsistema SM\_RCT el cual corresponde al modelo del convertidor en estudio. La modulación SPWM es la misma utilizada en el caso ICT por lo cual sus formas de ondas se repiten.

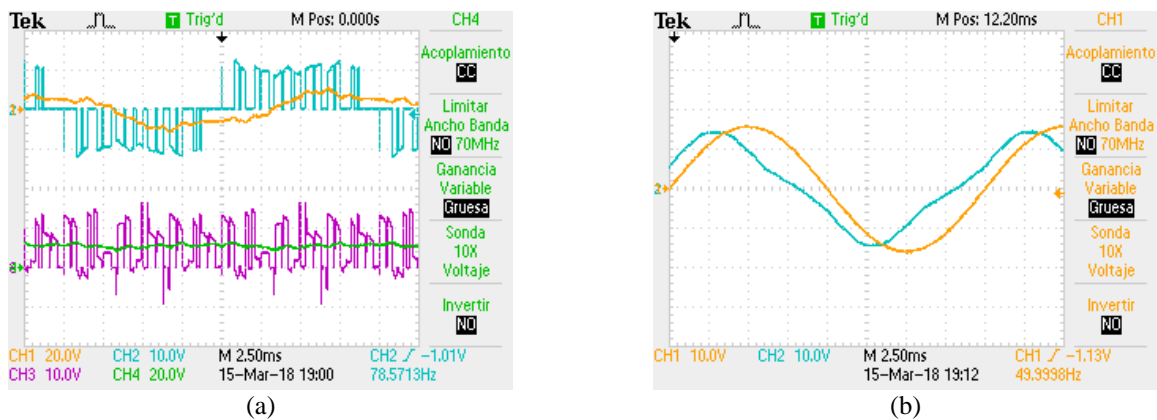
En la Fig. 6.25 se observan las formas de ondas características del RVT. Al analizar estas formas de ondas se observa que se obtiene el comportamiento en tiempo real del sistema en estudio. Los valores de ganancias a las salidas del osciloscopio se encuentran en la Tabla 6.9.

**Tabla 6.9 – Valores de ganancia simulación RCT**

Señal	Valor de ganancia
$V_s$	0.05
$I_s$	0.4
$V_{ran}, V_{dc}$	0.016
$I_{ra}, I_{dc}$	0.32



**Fig. 6.24 – Simulación en Simulink® del RCT para el equipo OPAL – RT®, Sub-sistema SM\_RCT**



**Fig. 6.25 – Formas de onda del RCT en la OPAL – RT®.**

(a) Ch1: $V_{ran}$ , Ch2:  $I_{ra}$ , Ch3: $V_{dc}$ , Ch4: $I_{dc}$ ; (b) Ch1: $V_s$ , Ch2: $I_s$

## 6.5. Convertidores Estáticos de Potencia Multiniveles

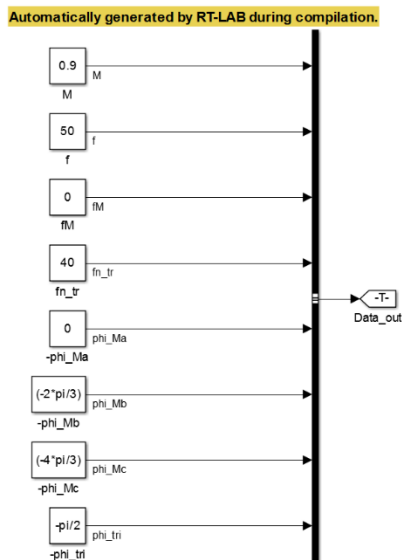
### 6.5.1 Inversor Trifásico NPC de tres niveles

A continuación se presentan los resultados obtenidos al realizar la simulación en tiempo real en el equipo OPAL – RT<sup>®</sup> para el inversor trifásico NPC de tres niveles. En la Fig. 6.26 (a) se puede observar el SC\_GUI correspondiente a la interfaz gráfica del modelo y la cual será modificada en tiempo real al momento de cargarlo al equipo, mientras que en la Fig. 6.26 (b) se muestra el subsistema SM\_NPC el cual corresponde al modelo del convertidor en estudio. Los valores de ganancias a las salidas del osciloscopio se encuentran en la Tabla 6.10.

En la Fig. 6.27 se observa la modulación del NPC donde se puede visualizar la moduladora y sus dos triangulares desfasadas que dan paso a la generación de las señales del convertidor. En la Fig. 6.28 se puede ver las corrientes trifásicas del convertidor NPC y sus voltajes trifásicos, en la Fig. 6.29 se puede ver claramente los tres niveles de salida en el voltaje  $V_{ab}$  logrando que la simulación en tiempo real realizada se comporta según la teoría de esta topología.

**Tabla 6.10 – Valores de ganancia simulación NPC**

Señal	Valor de ganancia
$V_{dc}, V_{ab}$	0.032
$I_{dc}, I_{ab}$	0.356



(a)

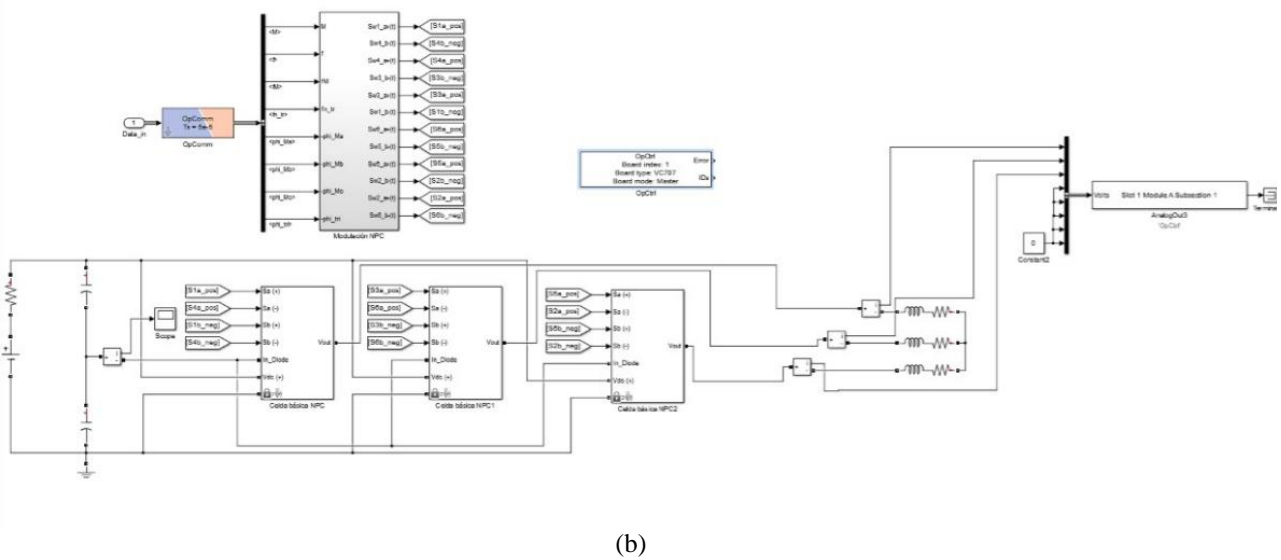


Fig. 6.26 – Simulación en *Simulink*<sup>®</sup> del IVM para el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>

(a) Sub-sistema SC\_GUI; (b) Sub-sistema SM\_IVM

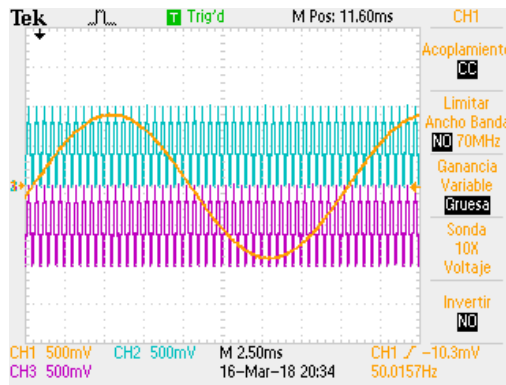
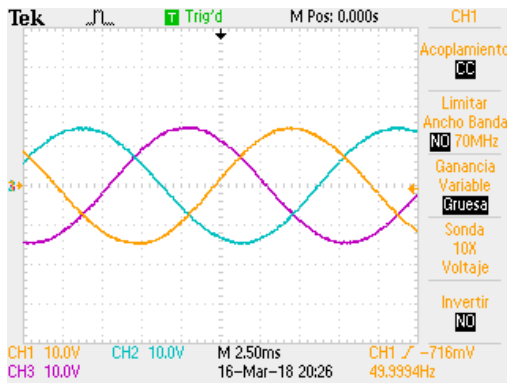
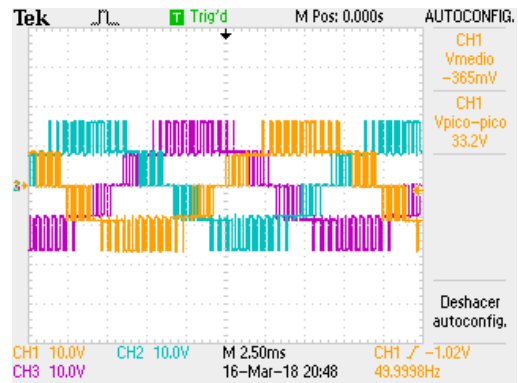


Fig. 6.27 – Modulación SPWM del Inversor NPC trifásico tres niveles en la OPAL – RT<sup>®</sup>.

Ch1:  $M_a$ , Ch2:  $tri_1$ , Ch3:  $tri_2$



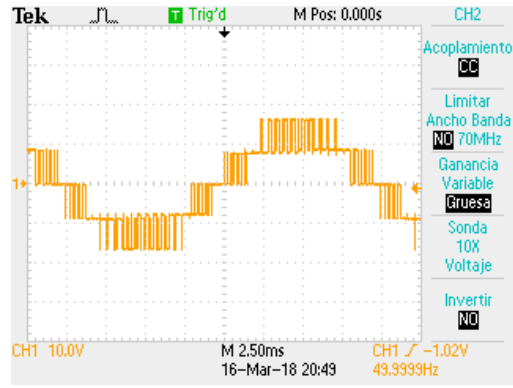
(a)



(b)

Fig. 6.28 – Formas de onda del Inversor NPC trifásico tres niveles en la OPAL – RT<sup>®</sup>.

(a) Corriente trifásica Ch1:  $I_a$ , Ch2:  $I_b$ , Ch3:  $I_c$ ; (b) Voltajes trifásico Ch1:  $V_{ab}$ , Ch2:  $V_{bc}$ , Ch3:  $V_{ca}$



**Fig. 6.29 – Formas de onda del Inversor NPC trifásico tres niveles en la OPAL – RT®.**

Ch1:  $V_{ab}$





## Capítulo 7. Conclusiones

---

### 7.1. Sumario

El objetivo principal de este trabajo era realizar un *set* de librerías para llevar a cabo simulaciones en tiempo real en el equipo OPAL – RT<sup>®</sup>. Estas librerías estaban enfocadas principalmente en topologías de convertidores estáticos; monofásica, trifásicas y multiniveles, junto con librerías de paneles solares fotovoltaicos específicamente se simuló la librería para el modelo simplificado del panel solar propuesto por [3].

Para realizar una simulación en el equipo OPAL RT se debe construir el modelo en Simulink<sup>®</sup>. Una vez simulado el modelo este se configura y enlaza con RT – LAB<sup>®</sup>, *software* del equipo OPAL – RT<sup>®</sup>. Se construye y compila el modelo, se carga a la tarjeta de la serie OP5600. Finalmente, se ejecuta la simulación la cual mediante la interfaz del subsistema SM\_GUI presente en el modelo simulado en Simulink<sup>®</sup> se puede variar los parámetros del sistema, especificados por el usuario, en tiempo real.

Una ventaja de simular en este equipo es que no se necesario estar trabajando conectado directamente a él para verificar el funcionamiento del modelo en estudio, basta que este funcione en Simulink<sup>®</sup>. para luego ser configurado y cargado mediante RT – LAB<sup>®</sup> al equipo- por lo que los resultados entregados en Simulink<sup>®</sup> son el primer acercamiento a la simulación en tiempo real.

A modo de comparar las respuestas entre software se realizaron las simulaciones de las topologías en estudio en los software *PSIM*<sup>®</sup> y *Mathcad*<sup>®</sup> con el fin de validar las respuestas de estos software versus el comportamiento real del sistema. Comparando las formas de onda, junto con las FFT y THD del sistema se obtiene los mismo comportamiento con respecto a la simulación en Simulink<sup>®</sup> lo cual conlleva a la validación de este último software como herramienta de simulación más al alcance del estudiante.

Cabe destacar que existe una diferencia en cuanto a los índices de distorsión armónica calculados mediante *PSIM*<sup>®</sup> y *Simulink*<sup>®</sup> esto se debe principalmente a que el software *PSIM*<sup>®</sup> considera todos los armónicos hasta los más cercanos a cero mientras que *Simulink*<sup>®</sup> los armónicos próximos a cero los desprecia en su cálculo y aproxima a cero.

En cuanto a las limitaciones de los modelos simulados es que la librería de las topologías de convertidores se consideró usar switches ideales en reemplazo a los semiconductores. En cuanto a la librería del modelo de panel solar, se utilizó el modelo matemático del modelo del panel solar simplificado.

## 7.2. Conclusiones

Los softwares *PSIM*<sup>®</sup> y *Mathcad*<sup>®</sup> son un primer acercamiento a lo que puede llegar a ser una simulación en tiempo real en el equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup> al realizar las simulaciones con las librerías desarrolladas para *Simulink*<sup>®</sup> bajo las mismas condiciones de operación.

Los resultados obtenidos en *Simulink*<sup>®</sup> dan paso a cargar los modelos mediante *RT – LAB*<sup>®</sup> al equipo para finalmente realizar las simulaciones en tiempo real y estudiar el comportamiento del sistema bajo condiciones variables en el tiempo sin la necesidad de implementar el set-up de cada sistema sólo limitado por el paso de simulación que depende de la complejidad del circuito.

Finalmente, realizar la simulación de un sistema eléctrico y/o del área de la electrónica de potencia mediante el equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup> se considera una ventaja versus el estudio del comportamiento del sistema mediante la implementación de un set-up y/o realizar pruebas en terreno debido a la facilidad en el uso, los costos y retrasos asociados y los riesgos en recursos humanos que esto implica.

## 7.3. Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se propone la generación de librerías utilizando semiconductores no ideales, de forma de obtener en la simulación un comportamiento mucho más cercano de lo que pasa en la vida real. También está el uso de estas librerías en futuras simulaciones que contemplen el análisis y operación de convertidores bajo lazos de control.

Otra propuesta de trabajo futuro corresponde al aumento en el número de librerías de los sistemas de electrónica de potencia para el equipo *OPAL – RT*<sup>®</sup>.

Finalmente, se proponer como trabajo futuro el análisis y simulación de un sistema que contemple la interacción entre el modelo del panel solar, convertidor estático y carga el cual permita evaluar la operación del panel en el MPPT variando su algoritmo de programación

## Bibliografía

- [1] E. Rodrigues, R. Melício, V. Mendes, J. Catalao. “Simulation of a Solar Cell considering Single-Diode Equivalent Circuit Model”, *RE&PQJ*, vol. 1, no. 9, May 2011.
- [2] J. Aller, J. Viola, F. Quizhpi, J. Restrepo, A. Ginart and A Salazar. “Explicit model of PV cells considering variations in temperature and solar irradiance”, *2016 IEEE ANDESCON, Arequipa, 2016*, pp.1-4.
- [3] M. Rashid, "Power Electronics Handbook", Chapter 15, pp. 357. Edición por publicar.
- [4] S. K. Singh, B. P. Padhy, S. Chakrabarti, S. N. Singh, A. Kolwalkar and S. M. Kelapure, "Development of dynamic test cases in OPAL-RT real-time power system simulator," *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, Guwahati, 2014, pp. 1-6.
- [5] P. Vela, “Operación Sub-óptima de Generación Eléctrica en Base a Paneles Solares”, Memoria de título, Ing. Civil Electrónico, Depto. De Ing. Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, Marzo 2017.
- [6] G. Castro, “Simulación de Convertidores Estáticos de Potencia en Tiempo Real con el Equipo OPAL-RT”, Memoria de título, Ing. Civil Eléctrico, Depto. De Ing. Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, Noviembre 2016.
- [7] Israel A. Inzunza, “Análisis y desempeño de celdas solares en topología”, Memoria de título, Ing. Civil Electrónico, Depto. De Ing. Eléctrica, Universidad de Concepción, Chile, Diciembre 2015.
- [8] *eHS User Guide*, 2016 OPAL – RT<sup>®</sup> Technologies Inc.
- [9] *RT-LAB Getting Started – Introduction*, OPAL – RT<sup>®</sup> Technologies
- [10] *RT-LAB Getting Started – Software*, OPAL – RT<sup>®</sup> Technologies
- [11] *OP101: Getting Started. Module 2B: Modeling Concepts in Simulink*, RT – LAB<sup>®</sup> Solution for Real-Time Applications.
- [12] O. A. Sábada, L. M. Palomo, P. S. Gúrpide, E.G. Villabona, "Equipos de Ensayos de Convertidores Multiniveles de 3 Niveles", *2005 ResearchGate*
- [13] J. Guzman, "Modelado y control de un inversor monofásico de tres niveles tipo NPC", *s.f*, University of Southampton, Dina Shona Laila, Suleiman Sharkh.
- [14] Apuntes curso Convertidores Estáticos Multiniveles, José Espinoza, 2017, Universidad de Concepción.

## Anexo A. Datasheet

### A.1. Datasheet Panel Solar FVG 60-156

**YellowLine**  
TOP PERFORMANCE

# FVG 60-156

## 6" POLYCRYSTALLINE



**Silicon-wafer Polycrystalline photovoltaic module with power peak from 230 W to 250 W**

#### APPLICATIONS



Residential, industrial, commercial and agricultural



PV parks



Architectural integration (CSTB pass innovation)

#### FEATURES



Excellent performances even during low solar radiation (cloudiness, morning or evening)



4 mm solar-grade tempered prismatic glass



Heavy load mechanical resistance: TÜV certified (5.400 Pa tested against snow and 2.400 Pa test against wind)



Strict and continuous quality controls during all the production phases up to shipment



High efficiency level up to 15.10%



Custom-made modules even in "All Black" version



Positive tolerance on power peak of individual module



#### ITALIAN WARRANTY

**10 years commercial warranty - 25 years performance warranty**

##### Commercial

- Standard 10 years on materials and manufacturing defects
- Integrative insurance policy on request

##### Performance

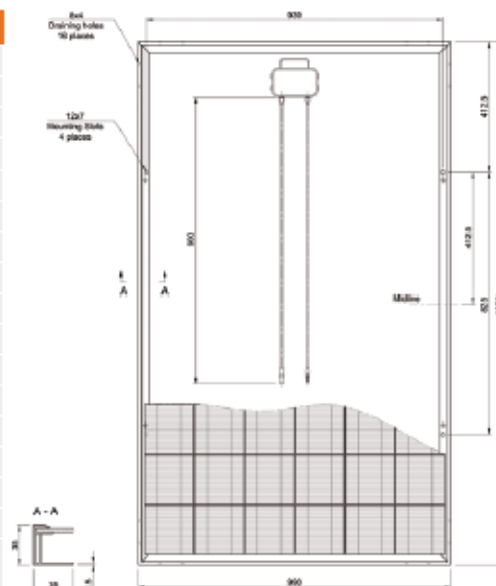
- Power not less than 90% of power peak during the first 10 years
- Power not less than 80% of power peak during the subsequent 15 years



## ELECTRICAL FEATURES

Type	Model	xxx Rated Power [W]				STC
		230	240	245	250	
FVG 60-156	FVGxxxP-MC*					
Module Efficiency	$\eta_m$ (%)	14.08	14.70	14.90	15.10	
Cell Efficiency	$\eta_c$ (%)	15.80	16.50	16.70	16.90	
Power Peak	$P_m$ (W)	230	240	245	250	
Maximum Power Voltage	$V_m$ (V)	30.30	30.50	30.50	30.50	
Maximum Power Current	$I_m$ (A)	7.60	7.88	8.05	8.20	
Open Circuit Voltage	$V_{oc}$ (V)	37.20	37.60	37.60	37.60	
Short Circuit Current	$I_{sc}$ (A)	8.14	8.28	8.60	8.80	
Maximum System Voltage	(VDC)	1000				
Power Output Tolerance	(W)	0 / + 5				
Max-Series Fuse	(A)	20				
Operating/Storage Temp.	(°C)	- 40 ~ + 85				
Dielectric Insulation Voltage	(VDC)	3000 max				
Code	MFP	50236	50238	50239	50240	

STC: Irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>, module temperature 25 °C, AM=1.5  
Power measurement tolerance: ± 3%



## NOCT

	$P_m$ (W)	169	176	179	182
Typical Power at NOCT	$P_m$ (W)				
Maximum Power Voltage	$V_m$ (V)	27.20	27.40	27.70	27.90
Maximum Power Current	$I_m$ (A)	6.22	6.45	6.53	6.60
Open Circuit Voltage	$V_{oc}$ (V)	34.00	34.40	34.45	34.50
Short Circuit Current	$I_{sc}$ (A)	6.71	6.84	6.98	7.10

NOCT: Irradiance 800 W/m<sup>2</sup>, ambient temperature 20 °C, wind speed 1 m/s  
Power measurement tolerance: ± 3%

## JUNCTION BOX

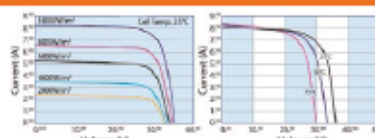


6 by-pass diodes  
CIXI REHNE PHOTOVOLTAIC  
PV -RH 701  
IP67 MC4 connectors  
900 mm cable length

## TEMPERATURE CHARACTERISTICS - STC

NOCT - Nominal Operating Cell Temperature	(°C)	45 ± 2
$P_m$ Temperature Coefficient	(%/°C)	- 0.44
$V_{oc}$ Temperature Coefficient	(%/°C)	- 0.33
$I_{sc}$ Temperature Coefficient	(%/°C)	0.055

## CURVE CURRENT - VOLTAGE



## MECHANICAL FEATURES

Cell Size	(mm)	156 x 156
Number of cells		60 cells - polycrystalline silicon
Module Dimensions	(mm)	1650 x 990 x 35
Module Weight	(kg)	21.50
Front Glass		4 mm tempered glass
Frame		anodized aluminum alloy
Junction box		6 by-pass diodes
Connectors		IP65 type MC4
Output Cables	(mm)	900

## PACKING FEATURES

Carton Dimensions	(mm)	1700 x 1050 x h85
Pallet Dimensions	(mm)	1700 x 1100 x h2000
Pallet Weight	(kg)	1090
1 Carton		2 modules
1 Pallet		22 cartons (44 modules)
Container Loading Capacity 20	(ft)	264 modules (6 pallets)
Container Loading Capacity 40	(ft)	572 modules (13 pallets)

\*xxx suffix indicates Rated Power [W]

## Anexo B. Códigos en Softwares Simuladores

---

### B.1. Código Mathcad® Modelos Paneles Solares Fotovoltaicos

#### Memoria de Cálculo Modelos para Panel Solar Fotovoltaico

Parámetros de simulación

$$n_f := 2048 \cdot 10 \quad t_f := 0.02 \quad n := 1 \dots n_f \quad t := 0, \frac{t_f}{n_f} \dots t_f$$

Parámetros Panel Solar FVG60-245MC

$$I_{sc0} := 8.48 \quad \text{Corriente de corto circuito [A]}$$

$$V_{oc} := 37.75 \quad \text{Voltaje circuito abierto [V]}$$

$$C_t := 0.0015 \quad \text{Coef. de temperatura}$$

$$V_{mpp} := 30.8 \quad \text{Voltaje máximo}$$

$$I_{mpp} := 7.97 \quad \text{Corriente máxima}$$

$$R_s := 0.001 \quad \text{Resistencia en serie}$$

$$R_{sh} := 1000 \quad \text{Resistencia Shunt}$$

$$A_w := 1.12 \quad \text{Factor de idealidad}$$

$$k_s := 0 \quad \text{Coef. de irradiación sobre temperatura}$$



Parámetros STC

$$E_g := 1.12 \quad \text{Energía gap silicio}$$

$$q := 1.6 \cdot 10^{-19} \quad \text{Carga electrón}$$

$$k := 1.3806 \cdot 10^{-23} \quad \text{Constante de Boltzmann}$$

$$S_0 := 1000 \quad \text{Radiación}$$

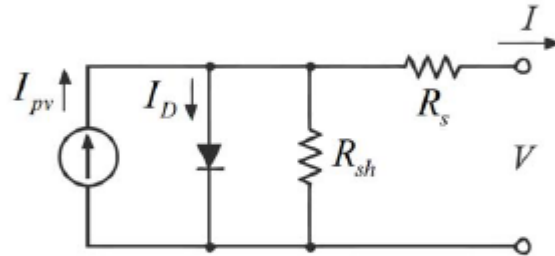
$$T_{ref} := 298.15 \quad \text{Temperatura}$$

Se define:

$$FF := \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc0}} = 0.767 \quad \text{Factor de llenado}$$

- $N_s := 60$       Celdas en serie  
 $n_s := 1 \cdot N_s$     Paneles en serie  
 $N_p := 1$         Celdas en paralelo  
 $n_p := 1 \cdot N_p$     Paneles en paralelo  
 $i_{s0} := 3.25 \cdot 10^{-9} \cdot N_p$  Corriente de saturación típica para diodos de silicio

### Modelo SMD Panel Solar Fotovoltaico



#### Condiciones iniciales

$$i := 1 \quad i_1 := 1$$

#### Given

$$\begin{aligned}
 i = & I_{sc0} \frac{S}{S_0} + C_f (T + k_s \cdot S - T_{ref}) - i_{s0} \cdot \left( \frac{T + k_s \cdot S}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T + k_s \cdot S} \right) \right] \dots \\
 & + i \cdot \left[ \exp \left[ \frac{q}{A \cdot k \cdot (T + k_s \cdot S)} \cdot \left( \frac{1}{n_s} \cdot V_{pv} + i \cdot R_s \right) \right] - 1 \right] - \left( \frac{1}{n_s} \cdot V_{pv} + i \cdot R_s \right) \cdot \frac{1}{R_{sh}}
 \end{aligned}$$

$$i_f(V_{pv}, S, T) := \text{Find}(i) \quad \text{Corriente de salida del panel}$$

#### Valores para las gráficas

$$V_{pvf} := 40$$

$$V_{pv} := 0, \frac{V_{pvf}}{n_f} \dots V_{pvf} \quad \text{Voltaje}$$

$$\overset{\text{W/m}^2}{S} := 1000 \quad \text{Irradiación}$$

$$\overset{\text{K}}{T} := 25 + 273.15 \quad \text{Temperatura en grados Kelvin}$$



**Cálculo de la Potencia**

$$P_{pv}(V_{pv}, S, T) := i_f(V_{pv}, S, T) \cdot V_{pv}$$

**Modelo simplificado del panel solar**

$$V_{Tc} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q}$$

$$i_{simp} = i_{sc} \cdot \left( 1 - \exp \left( - \frac{V_{pv} - V_{oc}}{V_{Tc}} \right) \right)$$

**B.2. Código para agregar una librería a Simulink®**

```
%Función blkStruct
function blkStruct = slblocks % Esta función especifica que librería se
% desea cargar en el buscador de biblioteca de simulink
Browser.Library = 'Convertidores_Estaticos2';
% Nombre del archivo la Librería que tiene enlazado mediante
% devolución de llamada OpenFcn los archivos
% Modulación_SPWM, Función_de_Comutación, NPC y
% Topologías_convertidore
Browser.Name = 'Convertidores Estaticos';
% Nombre de la Librería

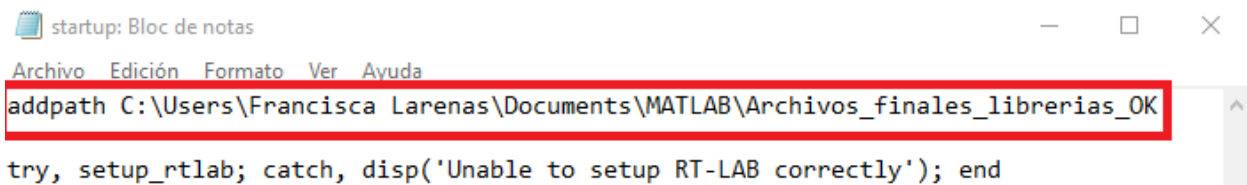
Browser(2).Library = 'Modelo_PV_simpl';
% Nombre del archivo la Librería que tiene enlazado mediante
% devolución de llamada OpenFcn los archivos Modelo_PV_simpl
Browser(2).Name = 'Modelos Paneles Solares';
% Nombre de la Librería

blkStruct.Browser = Browser;
```

**B.3. Agregar librería automáticamente a Simulink®**

Los pasos a seguir para cargar automáticamente la biblioteca creada *Simulink®* al abrir *Matlab®* son:

1. Abrir bloc de notas en modo administrador y editar el archivo *startup.m* ubicado en la carpeta de instalación de *Matlab®*, ver la Fig. B.1



```
startup: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
addpath C:\Users\Francisca Larenas\Documents\MATLAB\Archivos_finales_librerias_OK
try, setup_rtlab; catch, disp('Unable to setup RT-LAB correctly'); end
```

**Fig. B.1 – Modificación archivo *startup.m***



## Anexo C. Ecuaciones Topologías Convertidores Estáticos de Potencia.

---

### C.1. IVM

La conmutación de los switches para el IVM está dada por:

$$S_1(t) = 1 \Leftrightarrow m_a(t) > tri(t) \vee S_1(t) = 0 \Leftrightarrow m_a(t) < tri(t) \quad (C.1)$$

$$S_3(t) = 0 \Leftrightarrow S_1 = 1 \vee S_3(t) = 1 \Leftrightarrow S_1(t) = 0 \quad (C.2)$$

$$S_2(t) = 1 \Leftrightarrow -m_a(t) > tri(t) \vee S_2(t) = 0 \Leftrightarrow -m_a(t) < tri(t) \quad (C.3)$$

$$S_4(t) = 0 \Leftrightarrow S_2 = 1 \vee S_4(t) = 1 \Leftrightarrow S_2(t) = 0 \quad (C.4)$$

Por otra parte, los voltajes de cada pierna con respecto al neutro se pueden escribir como,

$$V_{an}(t) = S_1(t) \cdot V_{dc}(t) \quad (C.5)$$

$$V_{bn}(t) = S_2(t) \cdot V_{dc}(t) \quad (C.6)$$

Luego, el voltaje a la salida del inversor,  $V_{ab}(t)$ , queda dado por la ecuación (C.7).

$$V_{ab}(t) = V_{an}(t) - V_{bn}(t) \quad (C.7)$$

$$V_{ab}(t) = (S_1(t) - S_2(t)) \cdot V_{dc}(t) \quad (C.8)$$

### C.2. ICM

Ecuaciones auxiliares modulación SPWM ICM

Auxiliar 1, ecuaciones (C.9) y (C.10).

$$S_a(t) = 1 \Leftrightarrow m_a(t) > tri(t) \vee S_a(t) = 0 \Leftrightarrow m_a(t) < tri(t) \quad (C.9)$$

$$S_c(t) = 0 \Leftrightarrow S_a = 1 \vee S_c(t) = 1 \Leftrightarrow S_a(t) = 0 \quad (C.10)$$

Auxiliar 2, ecuaciones (C.11) y (C.12).

$$S_b(t) = 0 \leftrightarrow m_a(t) > -tri(t) \vee S_b(t) = 1 \leftrightarrow m_a(t) < -tri(t) \quad (\text{C.11})$$

$$S_d(t) = 0 \leftrightarrow S_b = 1 \vee S_d(t) = 1 \leftrightarrow S_b(t) = 0 \quad (\text{C.12})$$

Finalmente, la modulación SPWM para esta topología queda dada por las ecuaciones (C.13) y (C.14) para la pierna 1; (C.15) y (C.16) para la pierna 2.

Pierna 1:

$$S_1(t) = S_a(t) \cdot S_d(t) \quad (\text{C.13})$$

$$S_3(t) = S_b(t) \cdot S_c(t) \quad (\text{C.14})$$

Pierna 2:

$$S_4(t) = S_1(t) \quad (\text{C.15})$$

$$S_2(t) = S_3(t) \quad (\text{C.16})$$

### C.3. RCM

Ecuaciones auxiliares modulación SPWM

Auxiliar 1, ecuaciones (C.17) y (C.18).

$$S_a(t) = 1 \leftrightarrow m_a(t) > tri(t) \vee S_a(t) = 0 \leftrightarrow m_a(t) < tri(t) \quad (\text{C.17})$$

$$S_c(t) = 0 \leftrightarrow S_a = 1 \vee S_c(t) = 1 \leftrightarrow S_a(t) = 0 \quad (\text{C.18})$$

Auxiliar 2, ecuaciones (C.19) y (C.20)

$$S_b(t) = 0 \leftrightarrow m_a(t) > -tri(t) \vee S_b(t) = 1 \leftrightarrow m_a(t) < -tri(t) \quad (\text{C.19})$$

$$S_d(t) = 0 \leftrightarrow S_b = 1 \vee S_d(t) = 1 \leftrightarrow S_b(t) = 0 \quad (\text{C.20})$$

Finalmente, la modulación SPWM para esta topología queda dada por las ecuaciones (C.21) y (C.22) para la pierna 1; (C.23) y (C.24) para la pierna 2.

Pierna 1:

$$S_1(t) = S_a(t) \cdot S_d(t) \quad (\text{C.21})$$

$$S_3(t) = S_b(t) \cdot S_c(t) \quad (\text{C.22})$$

Pierna 2:

$$S_4(t) = S_1(t) \quad (\text{C.23})$$

$$S_2(t) = S_3(t) \quad (\text{C.24})$$

## C.4. IVT

Conmutación de los switches para el IVT

$$S_1(t) = 1 \Leftrightarrow m_a(t) > tri(t) \wedge S_1(t) = 0 \Leftrightarrow m_a(t) < tri(t) \quad (\text{C.25})$$

$$S_4(t) = 0 \Leftrightarrow m_a(t) > tri(t) \wedge S_4(t) = 1 \Leftrightarrow m_a(t) < tri(t) \quad (\text{C.26})$$

$$S_3(t) = 1 \Leftrightarrow m_b(t) > tri(t) \wedge S_3(t) = 0 \Leftrightarrow m_b(t) < tri(t) \quad (\text{C.27})$$

$$S_6(t) = 0 \Leftrightarrow m_b(t) > tri(t) \wedge S_6(t) = 1 \Leftrightarrow m_b(t) < tri(t) \quad (\text{C.28})$$

$$S_5(t) = 1 \Leftrightarrow m_c(t) > tri(t) \wedge S_5(t) = 0 \Leftrightarrow m_c(t) < tri(t) \quad (\text{C.29})$$

$$S_2(t) = 0 \Leftrightarrow m_c(t) > tri(t) \wedge S_2(t) = 1 \Leftrightarrow m_c(t) < tri(t) \quad (\text{C.30})$$

## C.5. ICT

Funciones auxiliares para la conmutación de los switches del ICT

$$m_{ax}(t, M) = (m_a(t, M) - m_b(t, M)) \cdot (\sqrt{3})^{-1} \quad (\text{C.31})$$

$$S_x(t) = 1 \Leftrightarrow m_{ax}(t, M) > tri(t) \wedge S_x(t) = 0 \Leftrightarrow m_{ax}(t, M) < tri(t) \quad (\text{C.32})$$

$$S_{xn}(t) = 0 \Leftrightarrow S_x(t) = 1 \wedge S_{xn}(t) = 1 \Leftrightarrow S_x(t) = 0 \quad (\text{C.33})$$

$$m_{bx}(t, M) = (m_b(t, M) - m_c(t, M)) \cdot (\sqrt{3})^{-1} \quad (\text{C.34})$$

$$S_y(t) = 1 \Leftrightarrow m_{bx}(t, M) > tri(t) \wedge S_y(t) = 0 \Leftrightarrow m_{bx}(t, M) < tri(t) \quad (\text{C.35})$$

$$S_{yn}(t) = 0 \Leftrightarrow S_y(t) = 1 \wedge S_{yn}(t) = 1 \Leftrightarrow S_y(t) = 0 \quad (\text{C.36})$$

$$m_{cx}(t, M) = (m_c(t, M) - m_a(t, M)) \cdot (\sqrt{3})^{-1} \quad (\text{C.37})$$

$$S_z(t) = 1 \Leftrightarrow m_{cx}(t, M) > tri(t) \wedge S_z(t) = 0 \Leftrightarrow m_{cx}(t, M) < tri(t) \quad (\text{C.38})$$

$$S_{zn}(t) = 0 \Leftrightarrow S_z(t) = 1 \wedge S_{zn}(t) = 1 \Leftrightarrow S_z(t) = 0 \quad (\text{C.39})$$

A partir de las ecuaciones anteriores se logra obtener la correcta conmutación para el ICT, pierna 1 ecuaciones (C.40), (C.41); pierna 2, ecuaciones (C.42), (C.43) y pierna 3, ecuaciones (C.44) y (C.45).

$$S_1(t) = S_x(t) \cdot S_{zn}(t) \quad (\text{C.40})$$

$$S_4(t) = S_z(t) \cdot S_{xn}(t) \quad (\text{C.41})$$

$$S_3(t) = S_y(t) \cdot S_{xn}(t) \quad (\text{C.42})$$

$$S_6(t) = S_x(t) \cdot S_{yn}(t) \quad (\text{C.43})$$

$$S_5(t) = S_z(t) \cdot S_{yn}(t) \quad (\text{C.44})$$

$$S_2(t) = S_y(t) \cdot S_{zn}(t) \quad (\text{C.45})$$

## Anexo D. Simulaciones en *PSIM*<sup>®</sup>

### D.1. IVM

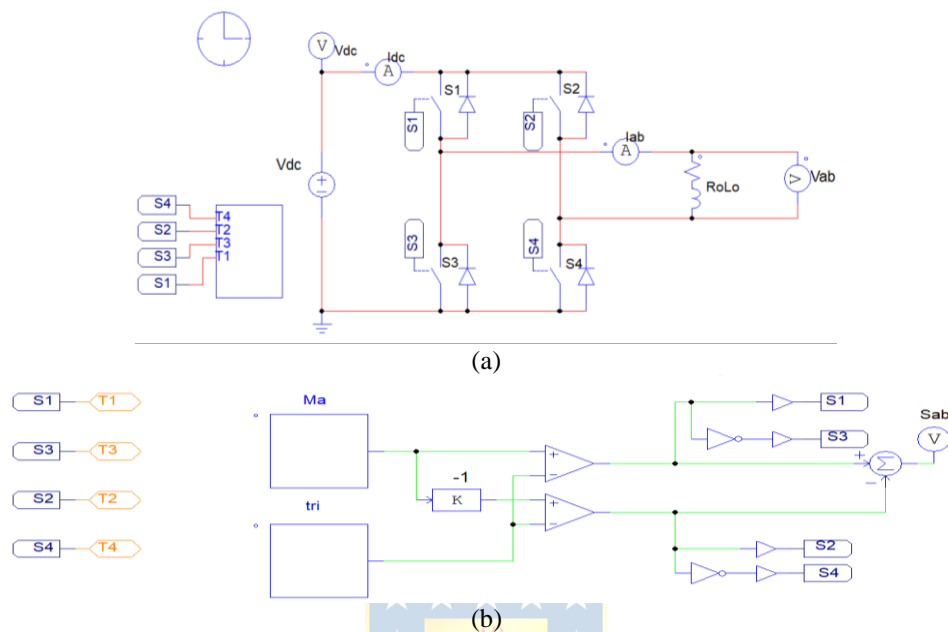


Fig. D.1 – Simulación en *PSIM*<sup>®</sup> del IVM

(a) Circuito IVM; (b) Sub-circuito Modulación SPWM del IVM

### D.2. RVM

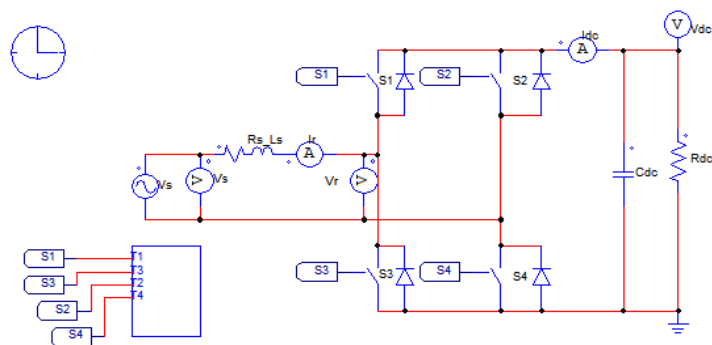
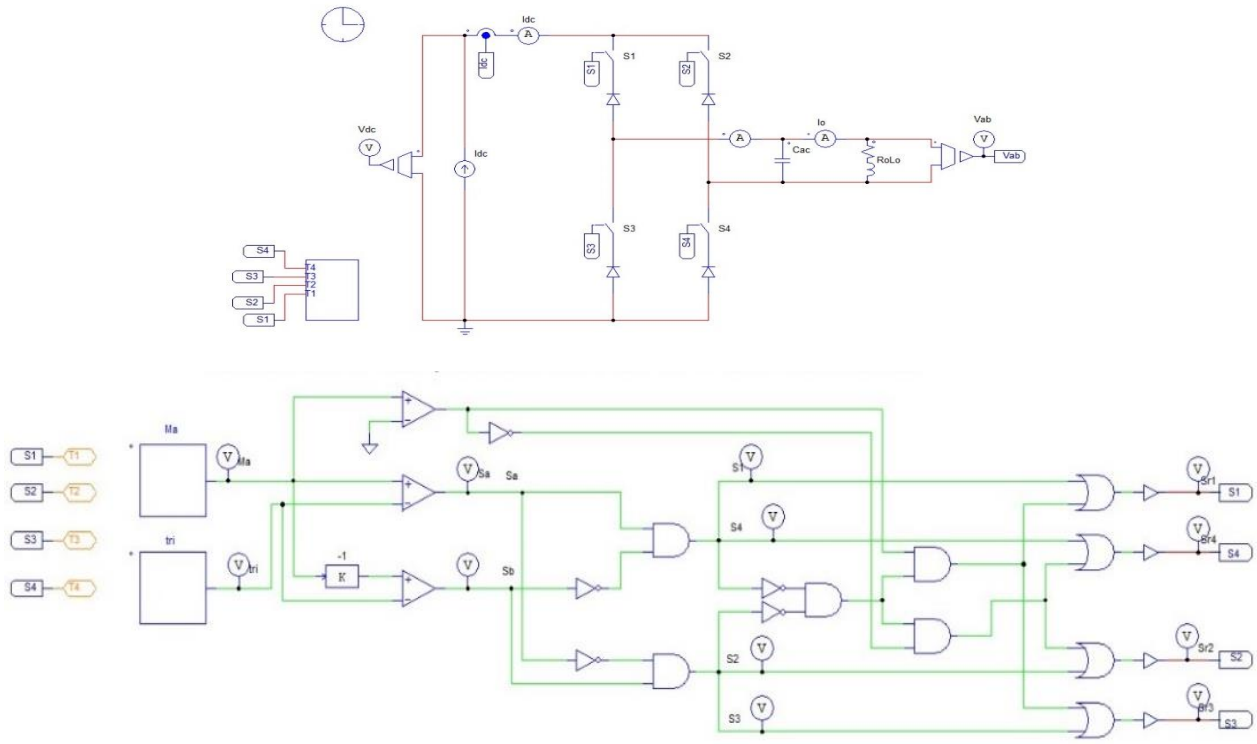


Fig. D.2 – Simulación en *PSIM*<sup>®</sup> del RVM

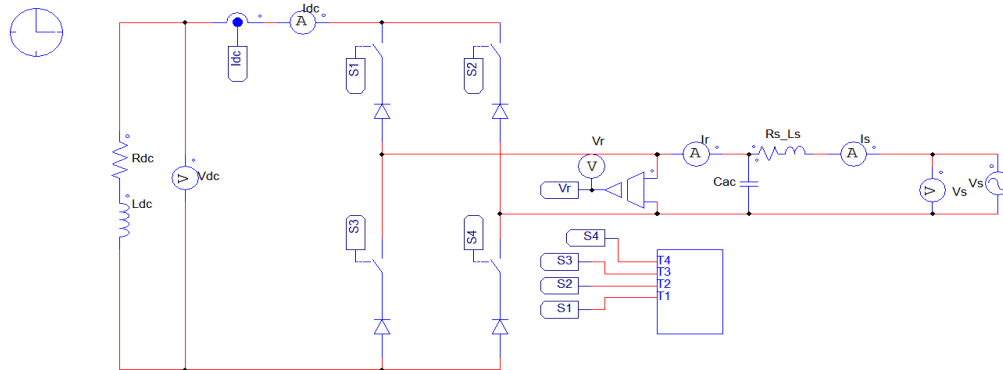
### D.3. ICM



**Fig. D.3 – Simulación en PSIM® del ICM**

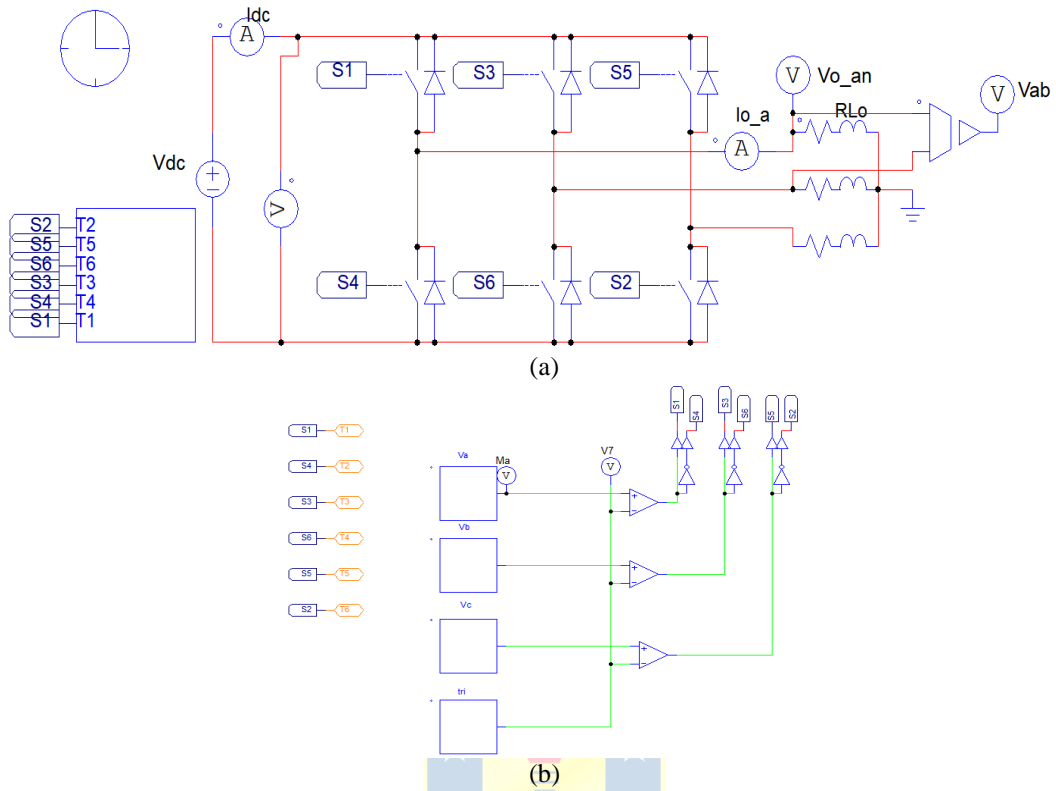
(a) Circuito ICM; (b) Sub-circuito Modulación SPWM del ICM

### D.4. RCM



**Fig. D.4 – Simulación en PSIM® del RCM**

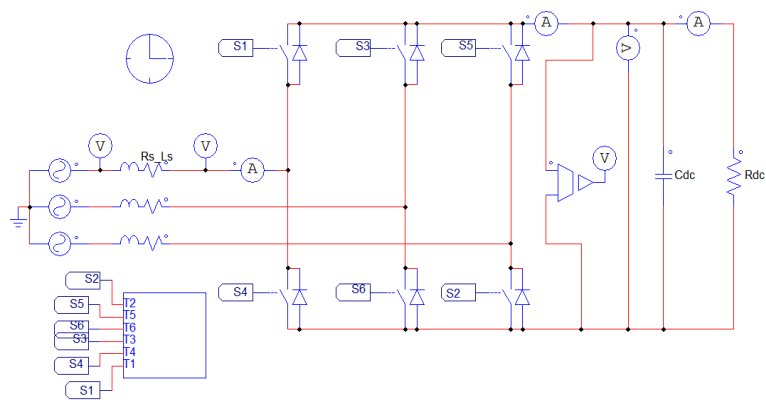
### D.5. IVT



**Fig. D.5 – Simulación en PSIM® del IVT**

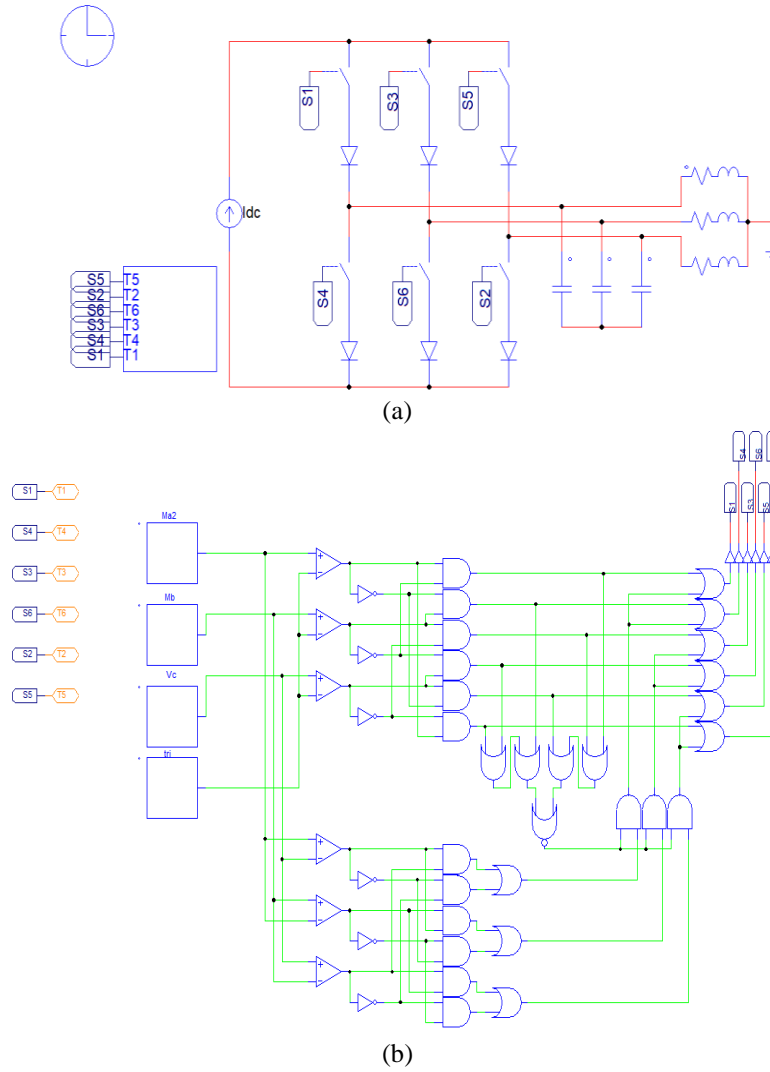
(a) Circuito IVT; (b) Sub-circuito Modulación SPWM del IVT

### D.6. RVT



**Fig. D.6 – Simulación en PSIM® del RVT**

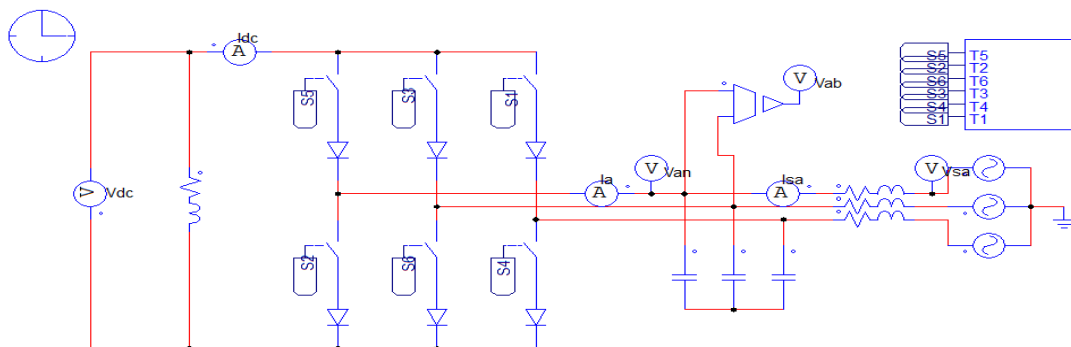
### D.7. ICT



**Fig. D.7 – Simulación en PSIM® del ICT**

(a) Circuito ICT; (b) Sub-circuito Modulación SPWM del ICT

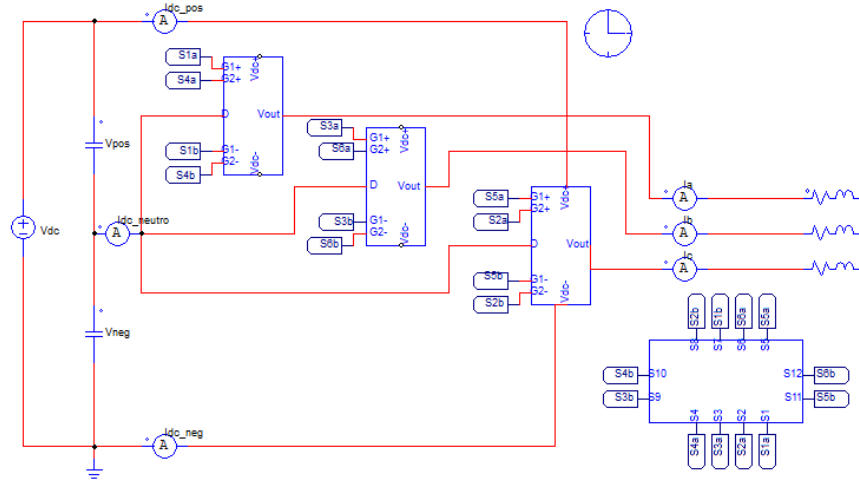
### D.8. RCT



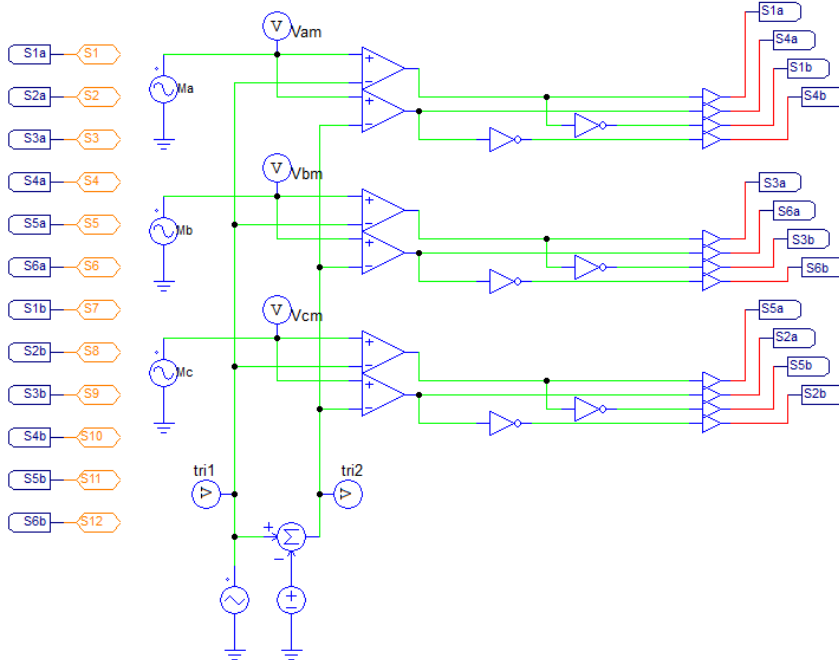
**Fig. D.8 – Simulación en PSIM® del RCT**



## D.9. NPC trifásico tres niveles



(a)



(b)

**Fig. D.9 – Simulación en PSIM® del NPC trifásico tres niveles**

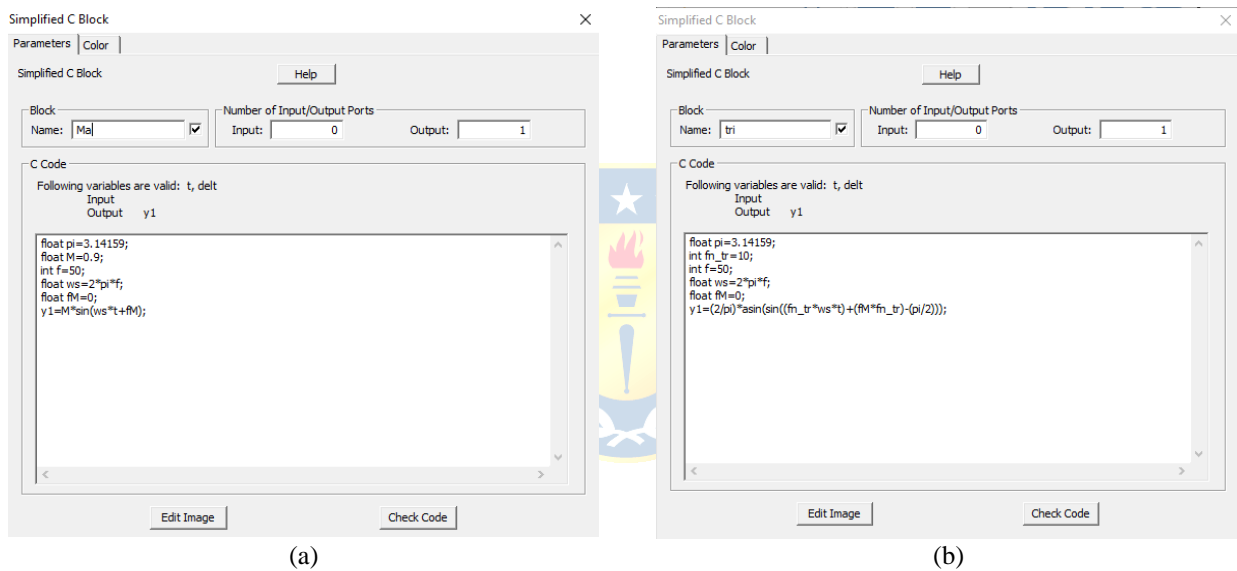
(a) Circuito NPC trifásico tres niveles; (b) Sub-circuito Modulación SPWM del NPC trifásico tres niveles

## Anexo E. Programación Bloques C de *PSIM*<sup>®</sup>

### E.1. Programación Bloque C de *PSIM*<sup>®</sup> para un convertidor monofásico.

A continuación, se muestra el código en C para la programación del bloque C en la librería de *PSIM*<sup>®</sup> para obtener la modulador  $M_a(t)$  y la triangular  $tri(t)$ , ver Fig. E.1(a) y Fig. E.1(b) respectivamente.

Para el resto de los convertidores monofásicos se utilizó el mismo método, modificando los parámetros en la programación según sea el caso.



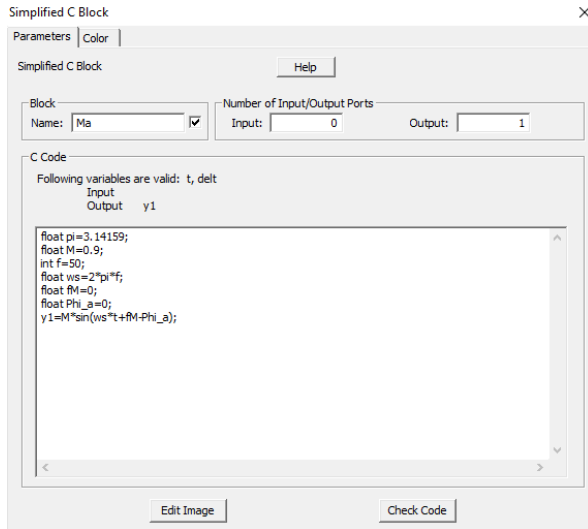
**Fig. E.1 – Programación del Bloque C en *PSIM*<sup>®</sup> para convertidor monofásico**

(a) Programación Bloque C para la Moduladora  $M_a(t)$ ; (b) Programación Bloque C para Triangular  $tri(t)$

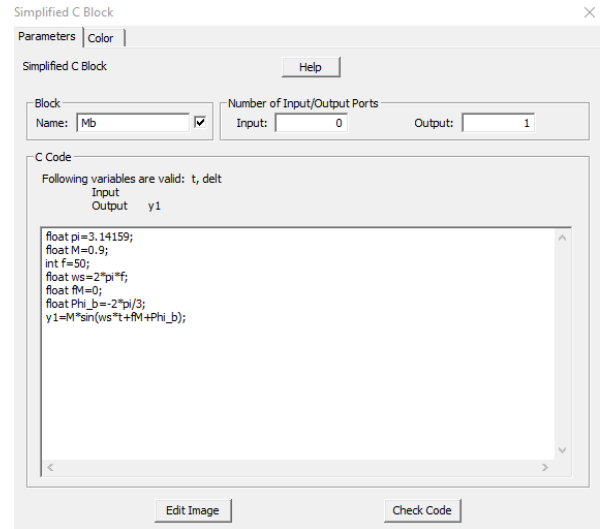
### E.2. Programación Bloque C de *PSIM*<sup>®</sup> para un convertidor trifásico.

A continuación muestra el código en C para la programación del bloque C en la librería de *PSIM*<sup>®</sup> para obtener la modulador  $M_a(t)$ ,  $M_b(t)$ ,  $M_c(t)$  y la triangular  $tri(t)$ , ver Fig. E.2(a), Fig. E.2(b), Fig. E.2(c) y Fig. E.2(d) respectivamente.

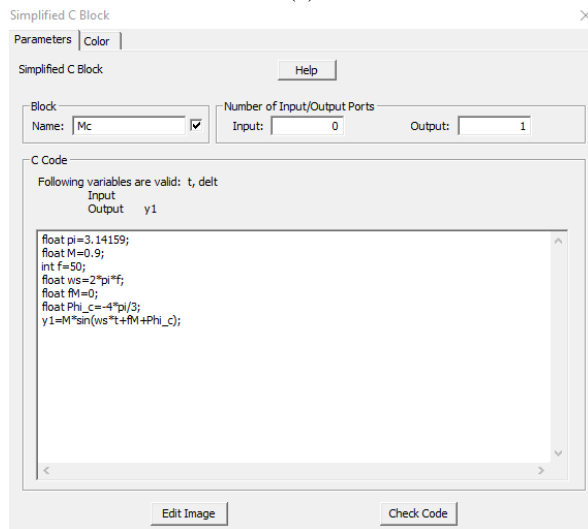
Para el resto de los convertidores trifásicos se utilizó el mismo método, modificando los parámetros en la programación según sea el caso.



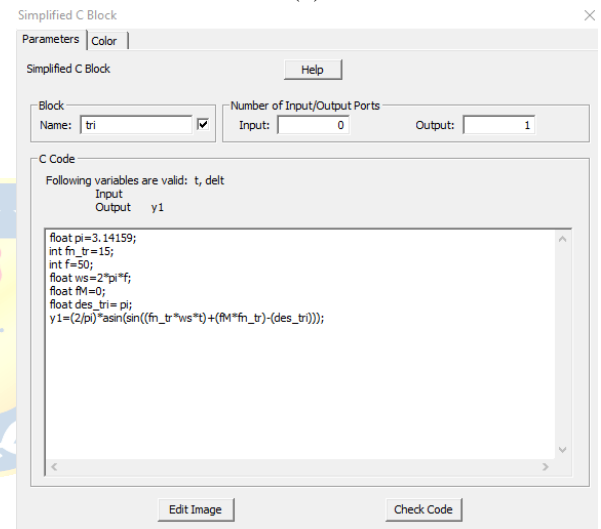
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fig. E.2 – Programación del Bloque C en PSIM® para convertidor trifásico**

(a) Programación Bloque C para la Moduladora  $M_a(t)$ ; (b) Programación Bloque C para la Moduladora  $M_b(t)$ ; (c) Programación Bloque C para la Moduladora  $M_c(t)$ ; (d) Programación Bloque C para Triangular  $tri(t)$