

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:
Dr. Leonardo M. Palma F.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Análisis, diseño y simulación de rectificador modular con
PFC basado en transformador en conexión Scott-T para la
alimentación de electrolizadores PEM de alta potencia

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante
Dr. Leonardo Manuel Palma Fanjul

Análisis, diseño y simulación de rectificador modular con PFC basado en transformador en conexión Scott-T para la alimentación de electrolizadores PEM de alta potencia

Javier Ignacio Tapia Retamal

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Noviembre 2025

Resumen

En este trabajo de Memoria de Título se aborda el análisis, diseño y simulación de una topología de rectificación modular con corrección del factor de potencia, basada en transformadores en conexión Scott-T, destinada a la alimentación de electrolizadores de membrana de electrolito polimérico de alta potencia. La investigación se enmarca en el contexto de la producción de hidrógeno verde, donde la eficiencia energética y la calidad del suministro eléctrico resultan determinantes para el desempeño del proceso de electrólisis. Por esta razón, el trabajo integra una revisión teórica sobre la producción de hidrógeno y las tecnologías de electrólisis, junto con un estudio de topologías de rectificación aplicadas a electrolizadores.

Con base en estos antecedentes, se propone una configuración modular compuesta por transformadores de entrada en conexión Scott-T, puentes rectificadores y convertidores elevadores entrelazados. La topología es modelada en MATLAB/Simulink y analizada bajo distintos escenarios de operación: condiciones nominales, variación de carga, desbalance de fases y aumento en la inductancia de fuga de los transformadores. Esta evaluación permite determinar el comportamiento del sistema y su capacidad para mantener un desempeño estable frente a perturbaciones propias de un sistema eléctrico. Los resultados obtenidos muestran que el sistema mantiene un factor de potencia cercano a la unidad y una distorsión armónica total de corrientes de entrada inferior al 1% en todos los escenarios analizados, cumpliendo con los límites establecidos por la normativa vigente. Asimismo, la eficiencia de la topología se encuentra entre 86% y 89%, con un rizo de salida controlado y sin afectación significativa en la estabilidad del sistema. Estos valores permiten validar el diseño propuesto y su comportamiento frente a variaciones en las condiciones de operación.

En conjunto, la topología propuesta demuestra ser una solución técnicamente viable para la alimentación de electrolizadores de membrana de electrolito polimérico de alta potencia, cumpliendo con los principales estándares de calidad de energía y alineándose con los requerimientos de los sistemas destinados a la producción de hidrógeno verde.

Abstract

This thesis addresses the analysis, design, and simulation of a modular rectification topology with power factor correction, based on Scott-T connected transformers, intended for powering high-power polymer electrolyte membrane electrolyzers. The research is framed within the context of green hydrogen production, where energy efficiency and power quality are crucial for the performance of the electrolysis process. For this reason, the work integrates a theoretical review of hydrogen production and electrolysis technologies, along with a study of rectification topologies applied to electrolyzers.

Based on this background, a modular configuration is proposed, composed of Scott-T connected input transformers, rectifier bridges, and interconnected step-up converters. The topology is modeled in MATLAB/Simulink and analyzed under different operating scenarios: nominal conditions, load variation, phase imbalance, and increased transformer leakage inductance. This evaluation allows us to determine the behavior of the system and its ability to maintain stable performance in the face of disturbances inherent to an electrical system. The results obtained show that the system maintains a power factor close to unity and a total harmonic distortion of input currents of less than 1% in all analyzed scenarios, complying with the limits established by current regulations. Furthermore, the topology's efficiency is between 86% and 89%, with controlled output ripple and no significant impact on system stability. These values validate the proposed design and its performance under varying operating conditions.

Overall, the proposed topology proves to be a technically viable solution for powering high-power polymer electrolyte membrane electrolyzers, meeting the main power quality standards and aligning with the requirements of systems designed for green hydrogen production.



A ti, mamá: aunque ya no estés, sigues siendo parte de cada uno de mis logros.

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos, en primer lugar, a todas las personas que a lo largo de los años han formado parte del 709, quienes en sus distintas etapas se han convertido en una verdadera familia para mí. Su compañía, cariño y apoyo constante han hecho mucho más llevaderos los años de universidad. Paula, Gabriel, Joaquina y Martín, gracias por todo lo compartido. Y, por supuesto, a mi hermano Jhon, con quien hace varios años soñamos con dejar nuestra ciudad para iniciar la vida universitaria, un sueño que finalmente pudimos cumplir juntos. Gracias por acompañarme siempre en esta aventura.

A mis amigos de la universidad, gracias por brindarme no solo horas de estudio y dedicación, sino también momentos de alegría, motivación y compañerismo que hicieron de esta etapa una experiencia inolvidable. Mención especial a Tomás, quien ha estado conmigo desde el primer día, siendo un gran compañero y, sobre todo, un gran amigo.

Extiendo también mi gratitud a todas aquellas personas que, aunque no menciono de manera explícita, me han acompañado de diferentes formas, aportando su ayuda, ánimo y confianza durante estos años de formación.

Finalmente, agradezco a todos los profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica por los conocimientos y experiencias entregadas a lo largo de mi carrera. En especial, al profesor Leonardo Palma, quien se desempeña como profesor patrocinante de esta memoria, brindando su orientación y apoyo en la culminación de este trabajo.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
NOMENCLATURA	XIII
ABREVIACIONES	XIV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	2
1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES	2
1.4. TEMARIO Y METODOLOGÍA	2
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. INTRODUCCIÓN	4
2.2. CLASIFICACIÓN POR COLORES DEL HIDRÓGENO	4
2.2.1 <i>Introducción</i>	4
2.2.2 <i>Hidrógeno negro – marrón</i>	4
2.2.3 <i>Hidrógeno gris</i>	4
2.2.4 <i>Hidrógeno azul</i>	5
2.2.5 <i>Hidrógeno turquesa</i>	5
2.2.6 <i>Hidrógeno rosado</i>	5
2.2.7 <i>Hidrógeno púrpura</i>	5
2.2.8 <i>Hidrógeno rojo</i>	5
2.2.9 <i>Hidrógeno verde</i>	6
2.2.10 <i>Hidrógeno amarillo</i>	6
2.2.11 <i>Hidrógeno blanco</i>	6
2.2.12 <i>Costos según el color del hidrógeno</i>	7
2.3. ELECTRÓLISIS PARA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE	7
2.3.1 <i>Introducción</i>	7
2.3.2 <i>Alkaline water electrolysis</i>	8
2.3.3 <i>Polymer Electrolyte Membrane water electrolysis</i>	8
2.3.4 <i>Solid Oxide Water Electrolysis Cell</i>	9
2.4. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE UN CONVERTIDOR CA-CC	11
2.4.1 <i>Introducción</i>	11
2.4.2 <i>Factor de potencia</i>	11
2.4.3 <i>Factor de rizo</i>	12
2.4.4 <i>THD</i>	13
2.4.5 <i>Eficiencia</i>	14
2.5. TOPOLOGÍAS COMUNES DE CONVERTIDORES CA-CC PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE	15
2.5.1 <i>Introducción</i>	15
2.5.2 <i>Rectificador de tiristores de 6 pulsos (6-TR)</i>	15
2.5.3 <i>Rectificador de tiristores de 12 pulsos (12-TR)</i>	15
2.5.4 <i>Rectificador de diodos de 12 pulsos con chopper multifásico (12-DRMC)</i>	16
2.5.5 <i>Rectificador de tiristores de 12 pulsos con filtro de potencia shunt activo (12-TRASPF)</i>	17
2.5.6 <i>Rectificador frontal activo (AFER)</i>	17
2.6. CONEXIÓN SCOTT-T	21

2.7.	CONVERTIDOR ELEVADOR CON PFC.....	23
2.8.	CIRCUITO EQUIVALENTE DEL ELECTROLIZADOR TIPO PEM.....	25
3.	TOPOLOGÍA DE RECTIFICACIÓN PROPUESTA.....	27
3.1.	INTRODUCCIÓN	27
3.2.	TOPOLOGÍA PROPUESTA	27
3.3.	PARÁMETROS DE ELECTROLIZADOR TIPO PEM	28
3.4.	IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK	31
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
4.1.	INTRODUCCIÓN	33
4.2.	CONDICIONES NOMINALES.....	33
4.2.1	<i>Formas de onda en conexión Scott-T.....</i>	<i>33</i>
4.2.2	<i>Formas de onda en el electrolizador.....</i>	<i>35</i>
4.2.3	<i>Factor de potencia</i>	<i>36</i>
4.2.4	<i>Factor de rizo.....</i>	<i>37</i>
4.2.5	<i>THD.....</i>	<i>38</i>
4.2.6	<i>Eficiencia.....</i>	<i>39</i>
4.3.	CONDICIONES DE CARGA PARCIAL.....	40
4.3.1	<i>Formas de onda en el electrolizador.....</i>	<i>40</i>
4.3.2	<i>Factor de potencia</i>	<i>42</i>
4.3.3	<i>Factor de rizo.....</i>	<i>43</i>
4.3.4	<i>THD.....</i>	<i>44</i>
4.3.5	<i>Eficiencia.....</i>	<i>45</i>
4.4.	CONDICIONES DE DESBALANCE DE FASES	47
4.4.1	<i>Formas de onda en el electrolizador.....</i>	<i>47</i>
4.4.2	<i>Factor de potencia</i>	<i>48</i>
4.4.3	<i>Factor de rizo.....</i>	<i>49</i>
4.4.4	<i>THD.....</i>	<i>50</i>
4.4.5	<i>Eficiencia.....</i>	<i>51</i>
4.5.	CONEXIÓN SCOTT-T CON INDUCTANCIA DE FUGA MÁS ALTA	52
4.5.1	<i>Formas de onda en la conexión Scott-T.....</i>	<i>52</i>
4.5.2	<i>Formas de onda en el electrolizador.....</i>	<i>53</i>
4.5.3	<i>Factor de potencia</i>	<i>54</i>
4.5.4	<i>Factor de rizo.....</i>	<i>56</i>
4.5.5	<i>THD.....</i>	<i>57</i>
4.5.6	<i>Eficiencia.....</i>	<i>57</i>
4.6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
5.	CONCLUSIONES.....	60
5.1.	SUMARIO	60
5.2.	CONCLUSIONES	60
5.3.	TRABAJO FUTURO	61
	REFERENCIAS	62
A.	ANEXO A	65
B.	ANEXO B.....	66
C.	ANEXO C	69

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Comparación entre los colores del hidrógeno en términos de costos y emisiones de carbono. Adaptado desde [7].	7
Tabla 2.2: Comparación entre electrólisis de agua alcalina (ALK), membrana de intercambio de protones (PEM) y de celdas de óxido sólido (SOEC). Datos recopilados desde [9], [12], [13].	11
Tabla 2.3: Resumen comparativo de topologías analizadas en [22].	20
Tabla 2.4: Análisis de costos de las topologías. Adaptado desde [21].	21
Tabla 2.5: Comparación entre las topologías. Superior (++); satisfactorio (+); neutral (Δ); insatisfactorio (-). Adaptado desde [20].	21
Tabla 3.1: Parámetros del sistema propuesto.	28
Tabla 3.2: Datos del electrolizador PEM VMF-20M. Extraído desde [30].	28
Tabla 3.3: Parámetros para la simulación del electrolizador PEM.	29
Tabla 4.1: Resumen de parámetros bajo condición nominal.	40
Tabla 4.2: Resumen de parámetros bajo variación de carga.	46
Tabla 4.3: Resumen de parámetros bajo condiciones de desbalance de fases.	51
Tabla 4.4: Resumen de parámetros para caso de inductancia de dispersión alta.	58
Tabla A.1: Especificaciones del sistema analizado en [22].	65
Tabla A.2: Resumen comparativo de topologías analizadas en [22], considerando filtros pasivos.	65
Tabla B.1: Parámetros de los controladores PI utilizados en Simulink.	68

Lista de Figuras

Figura 2.1: Resumen de los distintos tipos de hidrógeno. Extraído desde [8].	6
Figura 2.2: Diagrama del principio de funcionamiento del electrolizador alcalino (ALK). Extraído desde [12].	8
Figura 2.3: Diagrama del principio de funcionamiento del electrolizador PEM. Extraído desde [12].	9
Figura 2.4: Diagrama del principio de funcionamiento del electrolizador SOEC. Extraído desde [12].	10
Figura 2.5: Representación de la potencia compleja. Adaptado desde [14].	12
Figura 2.6: Señal de salida con rizo frente a salida ideal. Extraída desde [16].	12
Figura 2.7: Voltaje de salida con rizo con definición del voltaje de rizo pico a pico. Extraída desde [17].	13
Figura 2.8: Diagrama de rectificador de tiristores de 6 pulsos. Extraído desde [19].	15
Figura 2.9: Puente rectificador de tiristores de doce pulsos (12-TR). Extraído desde [19].	16
Figura 2.10: Diagrama de circuito de un rectificador de diodos de 12 pulsos con chopper multifásico (12-DRMC). Extraído desde [20].	16
Figura 2.11: Diagrama de circuito de un sistema híbrido con rectificador de tiristores de 12 pulsos y filtro de potencia shunt activo (12-TRASPF). Extraído desde [20].	17
Figura 2.12: Diagrama de circuito de un rectificador frontal activo (AFER). Extraído desde [20].	18
Figura 2.13: Diagrama de la conexión del transformador Scott-T. Extraída desde [23].	22
Figura 2.14: Fasores en conexión Scott-T. (a) Voltajes de entrada; (b) Voltajes en los devanados primarios de la conexión Scott-T; (c) Voltajes secundarios bifásicos. Extraída desde [23].	23
Figura 2.15: Convertidor monofásico con circuito elevador. Extraído desde [25].	24
Figura 2.16: Sistema de control PFC. Extraído desde [25].	24
Figura 2.17: Circuito eléctrico equivalente del electrolizador tipo PEM. Extraído desde [26].	26
Figura 3.1: Propuesta de topología rectificadora con conexión Scott-T y PFC.	27
Figura 3.2: Curva de polarización electrolizador PEM estudiada en [31].	29
Figura 3.3: Curvas de polarización electrolizador PEM. a) Curva de polarización extraída desde [31]. b) Curva de polarización con parámetros propuestos.	30
Figura 3.4: Curva voltaje v/s corriente de electrolizador PEM propuesto.	30
Figura 3.5: Esquema de la topología propuesta en Simulink.	31
Figura 3.6: Esquema de control de la topología propuesta en Simulink.	32

Figura 4.1: Señales de voltajes en los secundarios de la conexión Scott-T bajo condiciones nominales. Transformador 1 en verde, y transformador 2 en rojo.	34
Figura 4.2: Espectro armónico de la señal de voltaje del secundario del transformador 1 de la conexión Scott-T bajo condiciones nominales.	34
Figura 4.3: Voltaje, corriente y potencia en la carga para condición nominal.	35
Figura 4.4: Voltajes y corrientes de fase bajo condición nominal.	36
Figura 4.5: Potencia activa, reactiva y aparente trifásica para condición nominal.	37
Figura 4.6: Acercamiento de las señales de voltaje y corriente en la carga bajo condición nominal.	38
Figura 4.7: Corrientes de fase bajo condición nominal.	38
Figura 4.8: Espectro armónico de la corriente de la fase A.	39
Figura 4.9: Voltaje, corriente y potencia en la carga para variación al 75%, 50% y 25%.	41
Figura 4.10: Potencia activa, reactiva y aparente de la red para variación de carga al 75%, 50% y 25%.	42
Figura 4.11: Voltajes y corrientes de fase para una reducción al 25% de la carga nominal.	43
Figura 4.12: Acercamiento de las señales de voltaje (azul) y corriente (rojo) en el electrolizador al reducir la carga al 25% de la nominal.	44
Figura 4.13: Corrientes de fase al reducir la carga al 25% de la nominal.	45
Figura 4.14: Variación de la eficiencia con respecto a la carga.	45
Figura 4.15: Voltaje, corriente y potencia en la carga para condiciones de desbalance de fases.	47
Figura 4.16: Voltajes (azul) y corrientes (rojo) de fase de la red para condiciones de desbalance de fases.	48
Figura 4.17: Potencia activa, reactiva y aparente de la red bajo condiciones de desbalance de fases.	49
Figura 4.18: Acercamiento de las señales de voltaje (azul) y corriente (rojo) en condiciones de desbalance de fases.	50
Figura 4.19: Corrientes de fase de la red bajo condiciones de desbalance de fases.	50
Figura 4.20: Señales de voltajes en los secundarios de la conexión Scott-T al aumentar la inductancia de fuga. Transformador 1 en verde, y transformador 2 en rojo.	52
Figura 4.21: Espectro armónico de la señal de voltaje del secundario del transformador 1 de la conexión Scott-T al aumentar la inductancia de fuga.	53
Figura 4.22: Voltaje, corriente y potencia en el electrolizador con inductancia de dispersión alta de la conexión Scott-T.	54

Figura 4.23: Voltajes (azul) y corrientes (rojo) de fase de la red, para una inductancia de dispersión alta de la conexión Scott-T.....	55
Figura 4.24: Potencia activa, reactiva y aparente con una inductancia de fuga más alta en la conexión Scott-T.....	56
Figura 4.25: Acercamiento de las señales de voltaje (azul) y corriente (rojo) en el electrolizador, considerando una inductancia de fuga más alta en la conexión Scott-T.....	56
Figura 4.26: Corrientes de fase, considerando inductancia de fuga más alta en conexión Scott-T. ...	57
Figura A.1: Diagrama de bloques para calcular factor de rizo.....	65
Figura B.1: Topología propuesta implementada en Simulink.....	66
Figura B.2: Sistema de control de la topología propuesta.....	66
Figura B.3: Configuración y parámetros de la conexión Scott-T en Simulink.	67
Figura B.4: Parámetros del puente universal en Simulink, configurado como puente de diodos monofásico. Válido para los dos puentes en la topología.	67
Figura B.5: Parámetros de los IGBTs utilizados en la simulación de Simulink. Válido para los 10 IGBTs presentes en la topología.	68
Figura B.6: Parámetros de los diodos utilizados en la simulación de Simulink. Válido para los 10 diodos presentes en la topología.....	68
Figura C.1: Espectro armónico de la señal de voltaje del secundario del transformador 2 de la conexión Scott-T bajo condiciones nominales.	69
Figura C.2: Voltajes y corrientes de fase para una reducción al 75% de la carga nominal.	69
Figura C.3: Voltajes y corrientes de fase para una reducción al 50% de la carga nominal.	70
Figura C.4: Acercamiento de las señales de voltaje (azul) y corriente (rojo) en el electrolizador al reducir la carga al 75% de la nominal.	70
Figura C.5: Acercamiento de las señales de voltaje (azul) y corriente (rojo) en el electrolizador al reducir la carga al 50% de la nominal.	71
Figura C.6: Corrientes de fase al reducir la carga al 75% de la nominal.	71
Figura C.7: Corrientes de fase al reducir la carga al 50% de la nominal.	72
Figura C.8: Nuevos parámetros de la conexión Scott-T para análisis de caso con inductancia de dispersión alta.....	72
Figura C.9: Espectro armónico de la señal de voltaje del secundario del transformador 2 de la conexión Scott-T al aumentar la inductancia de fuga.	72

Nomenclatura

A	: Amperio
CO ₂	: Dióxido de carbono
FP	: Factor de potencia
H ₂	: Hidrógeno
P	: Potencia activa
Q	: Potencia reactiva
S	: Potencia aparente
S	: Potencia compleja
S	: Segundos
V	: Volt
VA	: Voltamperio
Var	: Voltamperio reactivo
W	: Watt
mΩ	: Miliohmio
μH	: Microhenrio
μF	: Microfaradio
η	: Eficiencia



Abreviaciones

12-DRMC	: Rectificador de diodos de 12 pulsos con chopper multifásico
12-TR	: Rectificador de tiristores de 12 pulsos
12-TRASPF	: Rectificador de tiristores de 12 pulsos con filtro de potencia shunt activo
6-TR	: Rectificador de tiristores de 6 pulsos
AFER	: Rectificador frontal activo
ALK	: Alkaline Electrolysis (Electrólisis Alcalina)
CAPEX	: Capital Expenditure (Gastos de Inversión)
CA	: Corriente Alterna
CC	: Corriente Continua
CCS	: Carbon Capture and Storage (Captura y Almacenamiento de Carbono)
GDL	: Gas Diffusion Layer (Capa de Difusión de Gas)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
LCOH	: Levelized Cost of Hydrogen (Costo Nivelado del Hidrógeno)
MOSFET	: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
OPEX	: Operational Expenditure (Gastos operacionales)
PFC	: Power Factor Correction (Corrección del Factor de Potencia)
PEM	: Proton Exchange Membrane / Polymer Electrolyte Membrane
PTL	: Porous Transport Layer (Capa de Transporte Poroso)
PWM	: Pulse Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulso)
rms	: Root Mean Square (Valor Cuadrático Medio)
SMR	: Steam Methane Reforming (Reformado de Metano con Vapor)
SOEC	: Solid Oxide Electrolysis Cell (Celda de Electrólisis de Óxido Sólido)
THD	: Total Harmonic Distortion (Distorsión Armónica Total)

1. Introducción

1.1. Introducción

El aumento del uso de combustibles fósiles y otros procesos industriales a partir del siglo XIX ha generado un gran incremento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera durante el siglo XX y lo que va del siglo XXI, lo cual se ha traducido en un aumento en la temperatura global del planeta y cambios en el clima mundial [1]. Por lo anterior, se ha convertido en un desafío para la humanidad el reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con el propósito de intentar revertir sus efectos en el clima global.

Bajo esta tónica, en 2015 se adopta el Acuerdo de París, el cual tiene como objetivo limitar el calentamiento mundial a menos de 2°C, preferiblemente a 1.5°C, en comparación con los niveles preindustriales [2]. Chile ratifica este Acuerdo en el año 2017 y se ha puesto como meta lograr la carbono neutralidad a más tardar al año 2050, lo que además lo ha convertido en uno de los líderes regionales en la lucha contra el cambio climático, impulsando políticas de descarbonización y energías renovables [3], [4].

En este contexto, el hidrógeno verde se perfila como un complemento estratégico de las energías renovables, ya que se puede obtener a partir de ellas, lo que lo convierte en un gas verdaderamente sostenible al no generar emisiones contaminantes durante su obtención y uso, por otro lado, tiene como gran fortaleza la versatilidad, pues puede usarse como combustible para una movilidad sin emisiones, como medio de almacenamiento de energía y en procesos industriales como la producción de amoníaco y refinación del petróleo, ayudando así a reducir las emisiones de carbono y a descarbonizar sectores clave [5].

No obstante, para que el hidrógeno verde cumpla efectivamente su rol estratégico en la transición energética, resulta indispensable abordar los desafíos tecnológicos asociados a su producción. Uno de los más relevantes es la eficiencia en el proceso de electrólisis, en particular en los electrolizadores de membrana de electrolito polimérico (PEM), cuya operación requiere un suministro eléctrico estable y de calidad.

Sobre esta base, el presente trabajo se centra en el estudio de una topología de rectificación para electrolizadores PEM alimentados desde la red eléctrica, basada en transformadores en conexión Scott-T con etapa de corrección del factor de potencia, la cual se presenta y evalúa más adelante.

1.2. Objetivos

1.2.1 *Objetivo General*

Estudiar el funcionamiento y realizar el diseño de un rectificador con corrección del factor de potencia basado en transformador en conexión Scott-T, orientado al suministro eficiente y de alta calidad energética para electrolizadores PEM de alta potencia.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Estudiar el principio de funcionamiento y operación del transformador en conexión Scott-T, evaluando su capacidad de aplicación para sistemas de rectificación en contextos de alta potencia.
- Diseñar un rectificador modular, considerando la conexión del transformador Scott-T, la etapa rectificadora con PFC y la carga representada por electrolizadores PEM de alta potencia.
- Simular el sistema propuesto en un entorno computacional, modelando la interacción entre la red AC, el transformador Scott-T, el rectificador y la carga, para validar su comportamiento.
- Evaluar el desempeño eléctrico del sistema, considerando parámetros como eficiencia, factor de potencia, distorsión armónica y estabilidad de tensión de salida.

1.3. Alcances y Limitaciones

- El estudio se enfoca en aplicaciones de suministro eléctrico para electrolizadores PEM de alta potencia, en el rango de cientos de [kW] o superior, como parte de sistemas de producción de hidrógeno verde.
- Se considera el uso de transformadores en conexión Scott-T como etapa de adaptación entre una red trifásica y sistemas rectificadores en dos fases equilibradas.
- El sistema se evalúa mediante las herramientas de simulación MATLAB/Simulink.
- El análisis de eficiencia considera las principales pérdidas de la topología rectificadora, incluyendo las resistencias en devanados y pérdidas magnéticas del núcleo de los transformadores en conexión Scott-T, así como las caídas de conducción y los efectos de conmutación en los dispositivos semiconductores, considerando también que se expresa mediante el cociente entre la potencia activa de entrada y la potencia promedio en la carga.

1.4. Temario y Metodología

El documento se estructura en cinco capítulos principales, cada uno de los cuales aborda una

etapa específica del trabajo desarrollado contribuyendo al cumplimiento de los objetivos planteados.

En el capítulo 1 se presenta el contexto de la investigación, los objetivos generales y específicos, los alcances y limitaciones del estudio.

El capítulo 2 aborda los fundamentos conceptuales relacionados con el hidrógeno verde, procesos de electrólisis, parámetros de desempeño eléctrico y topologías comunes de conversión CA–CC, además de la conexión Scott-T, y el modelo equivalente del electrolizador PEM.

En el capítulo 3 se describe la configuración de la topología propuesta, los parámetros de diseño adoptados y su implementación en MATLAB/Simulink.

El capítulo 4 presenta los resultados obtenidos en simulación bajo diferentes condiciones de operación (nominal, carga parcial, desbalance de fases e inductancia de fuga elevada), evaluando parámetros de desempeño eléctrico.

Finalmente, en el capítulo 5 se sintetizan los principales hallazgos del trabajo, se contrastan con los objetivos planteados y se sugieren posibles líneas de investigación futura.

La metodología utilizada combina la revisión bibliográfica con el modelado computacional del sistema en MATLAB/Simulink, permitiendo evaluar el desempeño eléctrico de la topología propuesta en diferentes escenarios.



2. Marco teórico

2.1. Introducción

Este capítulo aborda los fundamentos teóricos del estudio: clasificación del hidrógeno, tecnologías para procesos de electrólisis, parámetros de desempeño eléctrico y las principales topologías de conversión CA-CC, además de incluir la descripción de la conexión Scott-T, convertidores elevadores con PFC y el modelo equivalente para electrolizadores PEM.

2.2. Clasificación por colores del hidrógeno

2.2.1 Introducción

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro y altamente inflamable en condiciones normales. Se trata del elemento químico más ligero y, al mismo tiempo, el más abundante en el universo. En la naturaleza se encuentra mayormente en forma de moléculas diatómicas (H_2) y constituye un componente esencial de numerosos compuestos, como el agua y los hidrocarburos [5]. En el ámbito energético e industrial, el hidrógeno puede clasificarse mediante una codificación por colores, la cual depende de la tecnología y las fuentes utilizadas en su producción, tal como se detalla a continuación.

2.2.2 *Hidrógeno negro – marrón*

El hidrógeno negro y el hidrógeno marrón se obtienen a partir de la gasificación del carbón, diferenciándose únicamente en el tipo de carbón utilizado. El primero se produce a partir de carbón bituminoso, mientras que el segundo proviene de lignito. Aunque este método es uno de los más económicos debido a los bajos costos del carbón, también es el que genera mayor impacto ambiental. Esto debido a que la combustión del carbón libera grandes cantidades de gases de efecto invernadero, lo que contribuye significativamente a la contaminación del aire y al calentamiento global [6], [7].

2.2.3 *Hidrógeno gris*

El hidrógeno gris es el más común en la industria y se produce principalmente mediante el reformado con vapor de metano (SMR), a partir de gas natural y otros hidrocarburos con metano. Este proceso genera hidrógeno al calentar la mezcla con vapor, y puede incluir reacciones adicionales para mejorar su pureza, como la water-gas shift. Su principal ventaja es el bajo costo y la infraestructura existente, sin embargo, es altamente contaminante [6], [7].

2.2.4 *Hidrógeno azul*

El hidrógeno azul se produce a partir de gas natural, pero a diferencia del hidrógeno gris, en este caso se capturan y almacenan las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) generadas durante el proceso, mediante tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS). Gracias a esto, se considera una alternativa de bajas emisiones de carbono. Aunque presenta un costo de producción más elevado que otros métodos, su menor impacto ambiental lo convierte en una opción más sostenible [6], [7].

2.2.5 *Hidrógeno turquesa*

El hidrógeno turquesa se obtiene mediante pirólisis del metano (CH_4) usando plasma térmico, lo que permite producir hidrógeno de alta pureza sin generar CO_2 , ya que el carbono queda en estado sólido. Este proceso requiere menos energía que métodos como el reformado con vapor o la electrólisis, y puede aprovechar la infraestructura existente de gas natural. Además, genera como subproducto carbono negro, un material de alto valor que se utiliza en diversas aplicaciones industriales [6], [7].

2.2.6 *Hidrógeno rosado*

El hidrógeno rosado se produce mediante electrólisis del agua utilizando energía proveniente de centrales nucleares. Esta alternativa no genera emisiones directas de gases contaminantes, ya que el subproducto principal es vapor de agua. Sin embargo, su uso conlleva consideraciones ambientales importantes, como el calentamiento de cuerpos de agua cercanos y la gestión de residuos radiactivos, los cuales son altamente tóxicos y de muy difícil descomposición [6], [7].

2.2.7 *Hidrógeno púrpura*

El hidrógeno púrpura se produce mediante procesos de electrólisis y termólisis del agua, utilizando tanto electricidad como calor generado en plantas nucleares. A diferencia del hidrógeno rosado, este proceso sí aprovecha el calor nuclear, lo que permite una mayor eficiencia energética en la producción [6], [7].

2.2.8 *Hidrógeno rojo*

El hidrógeno rojo se produce exclusivamente mediante la termólisis del agua, aprovechando únicamente el calor generado por la energía nuclear, sin intervención eléctrica directa. A diferencia de otros tipos asociados a energía nuclear, este proceso requiere altas temperaturas, por lo que utiliza

reactores nucleares de nueva generación [6]. Algunos autores consideran que el hidrógeno rosado, púrpura y rojo puede considerarse el mismo [7].

2.2.9 Hidrógeno verde

El hidrógeno verde se produce mediante electrólisis del agua utilizando electricidad proveniente de fuentes renovables, como la solar, eólica o hidráulica. Es considerado la forma más limpia y sostenible de hidrógeno, ya que no genera emisiones contaminantes ni residuos peligrosos durante su producción. A pesar de que requiere una alta cantidad de energía, el uso de energías renovables compensa esta desventaja [6], [7].

2.2.10 Hidrógeno amarillo

El hidrógeno amarillo se obtiene mediante electrólisis a partir de electricidad proveniente de la red eléctrica. La huella de carbono asociada a su producción varía de forma considerable a lo largo del tiempo, ya que depende de la combinación de fuentes energéticas que alimentan la red en cada momento. Dicha red integra la electricidad generada por todas las tecnologías disponibles [7].

Algunos autores indican que el hidrógeno amarillo se produce únicamente mediante electrólisis a través de energía solar [6], aunque esta designación se está volviendo obsoleta [7].

2.2.11 Hidrógeno blanco

El hidrógeno blanco es aquel que se forma de manera natural a través de procesos geológicos y se encuentra almacenado en depósitos subterráneos. Se considera una fuente prometedora, ya que no requiere intervención humana para su formación ni genera emisiones contaminantes. Sin embargo, su extracción presenta desafíos importantes [6], [7].

En la Figura 2.1 se sintetiza la clasificación del hidrógeno según su fuente y proceso de producción, entregando una visión general de lo presentado anteriormente.



Figura 2.1: Resumen de los distintos tipos de hidrógeno. Extraído desde [8].

2.2.12 Costos según el color del hidrógeno

La comparación entre los distintos tipos de hidrógeno requiere analizar tanto sus costos de producción como las emisiones asociadas. En [7] se estudia esta diferencia considerando los insumos energéticos utilizados y las emisiones de CO₂ generadas en cada proceso. Para evaluar estos aspectos, los autores emplean el costo nivelado de hidrógeno (LCOH), que integra la inversión de capital (CAPEX) y los costos operativos (OPEX), expresados en USD/kgH₂.

En la Tabla 2.1 se resumen los resultados analizados en [7], donde tecnologías consolidadas como el reformado de metano exhiben bajos costos, pero elevadas emisiones, mientras que alternativas como la electrólisis con energías renovables alcanzan emisiones prácticamente nulas, aunque con costos más altos.

Es importante señalar que todos los precios reportados corresponden al período 2021-2022. Además, las emisiones del hidrógeno amarillo dependen de la ubicación geográfica y de la combinación energética correspondiente, mientras que el hidrógeno turquesa, como ya se ha señalado, genera como subproducto carbono sólido.

Tabla 2.1: Comparación entre los colores del hidrógeno en términos de costos y emisiones de carbono. Adaptado desde [7].

Color del hidrógeno	Costo [USD/kgH ₂]	Emisiones [kgCO ₂ /kgH ₂]
Negro – Marrón	1.2 – 2.0	20
Gris	0.67 – 1.31	8.5
Azul	0.99 – 2.05	1 – 2
Turquesa	2.0	—
Rosado – Púrpura – Rojo	2.18 – 5.92	0
Verde	2.28 – 7.39	0
Amarillo	6.06 – 8.81	—

2.3. Electrólisis para obtención de Hidrógeno Verde

2.3.1 Introducción

La electrólisis es un proceso fisicoquímico que utiliza energía eléctrica para iniciar una reacción química que da como resultado la separación de los elementos dentro de una molécula. Se tiene que la electrólisis del agua es uno de los métodos más eficaces para la producción de hidrógeno, ya que utiliza agua y produce sólo oxígeno puro como subproducto [9].

2.3.2 Alkaline water electrolysis

La electrólisis alcalina del agua (ALK) se basa en el principio de la división electroquímica del agua mediante el uso de electricidad, como se muestra en la Figura 2.2. Este proceso implica dos reacciones independientes en los electrodos: la reacción de evolución de hidrógeno en el cátodo y la reacción de evolución de oxígeno en el ánodo. En la etapa catódica, dos moles de solución alcalina se reducen para generar un mol de hidrógeno (H_2) y dos moles de iones hidroxilo (OH^-). El hidrógeno se libera desde la superficie del cátodo, mientras que los iones OH^- remanentes atraviesan un separador poroso hacia el ánodo, impulsados por el circuito eléctrico. En el ánodo, los iones hidroxilo se oxidan para formar una molécula de oxígeno (O_2) y una molécula de agua (H_2O) [10]. Las reacciones que ocurren en el ánodo y en el cátodo se presentan en las ecuaciones (2.1) y (2.2), respectivamente [11].

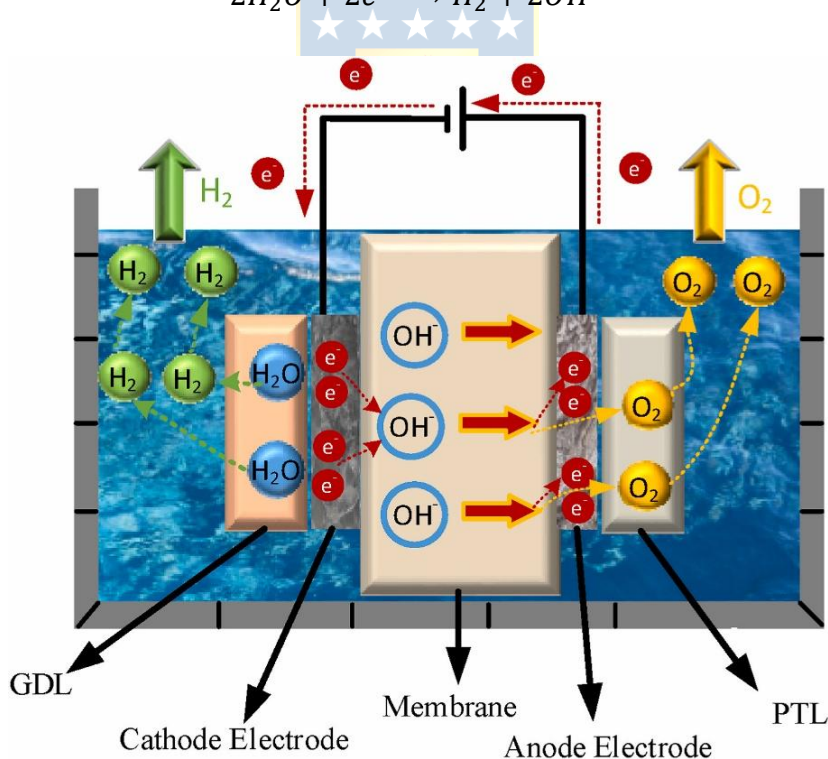


Figura 2.2: Diagrama del principio de funcionamiento del electrolizador alcalino (ALK). Extraído desde [12].

2.3.3 Polymer Electrolyte Membrane water electrolysis

La electrólisis de agua mediante membrana de electrolito polimérico o membrana de intercambio de protones (PEM) consiste en la separación electroquímica del agua en hidrógeno y

oxígeno, como se muestra en la Figura 2.3. En el ánodo, las moléculas de agua se descomponen en oxígeno (O_2), protones (H^+) y electrones (e^-). El oxígeno se libera desde la superficie anódica, mientras que los protones atraviesan la membrana conductora de protones hacia el cátodo y los electrones se dirigen al mismo destino a través de un circuito externo. Finalmente, en el cátodo, los protones y electrones se recombinan para formar gas hidrógeno (H_2) [10]. Las reacciones que ocurren en el ánodo y en el cátodo se presentan en las ecuaciones (2.3) y (2.4), respectivamente [11].

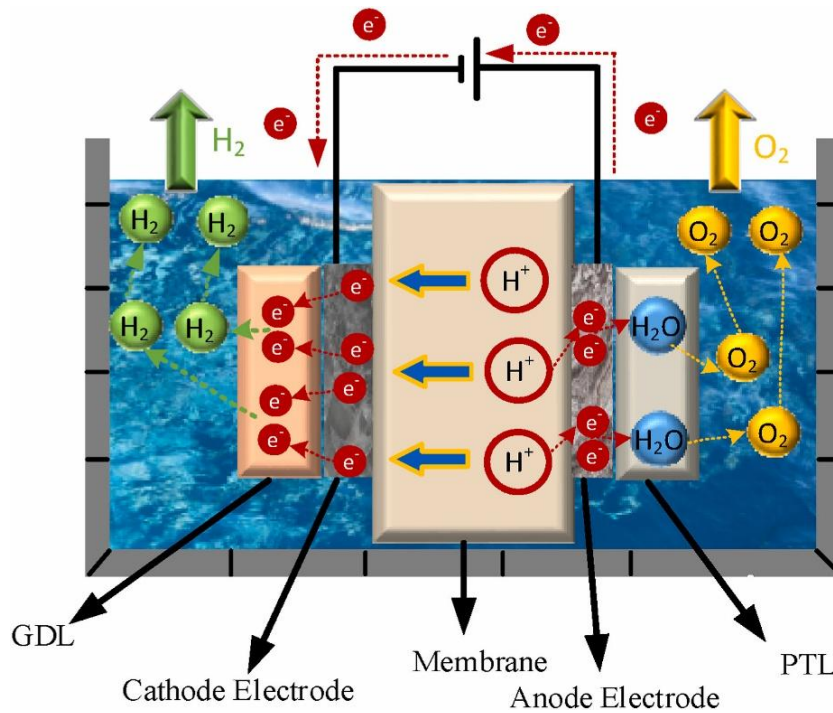


Figura 2.3: Diagrama del principio de funcionamiento del electrolizador PEM. Extraído desde [12].

2.3.4 Solid Oxide Water Electrolysis Cell

La electrólisis de agua mediante celdas de óxido sólido (SOEC) se lleva a cabo a altas temperaturas, utilizando vapor de agua como insumo para producir hidrógeno verde y oxígeno, como se muestra en la Figura 2.4. En el cátodo, el vapor de agua se reduce mediante la incorporación de dos electrones, generando hidrógeno (H_2) y iones óxido (O^{2-}). El hidrógeno se libera desde la superficie catódica, mientras que los iones óxido restantes atraviesan la membrana de intercambio iónico hacia el ánodo. En el ánodo, los iones óxido se oxidan para formar oxígeno (O_2) y liberar electrones. El oxígeno es expulsado desde la superficie anódica, y los electrones fluyen a través de un circuito

externo de regreso al cátodo, impulsados por la atracción positiva del mismo [10]. Las reacciones que ocurren en el ánodo y en el cátodo se presentan en las ecuaciones (2.5) y (2.6), respectivamente [11].

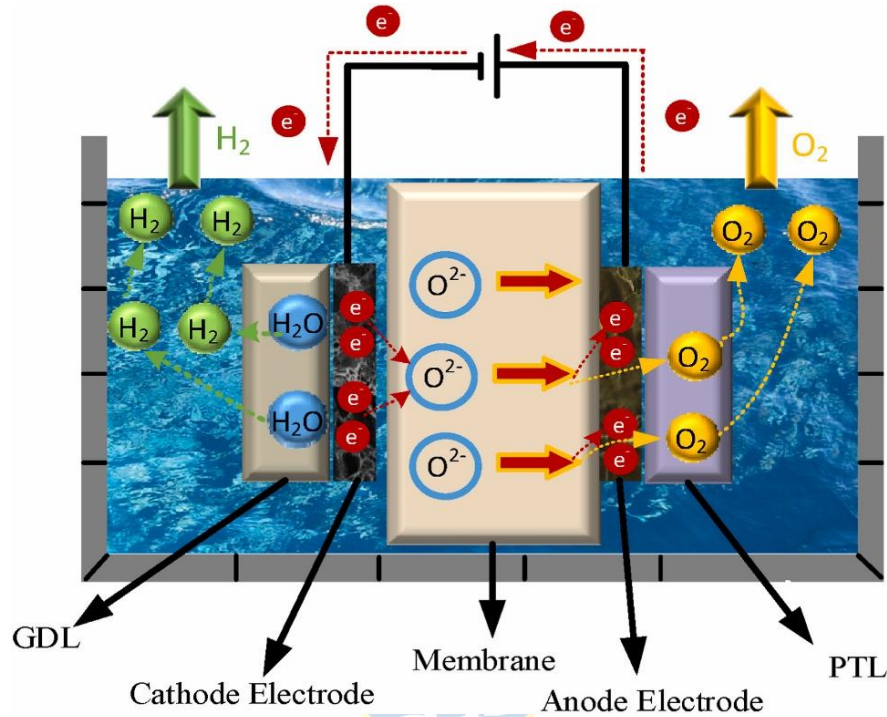


Figura 2.4: Diagrama del principio de funcionamiento del electrolizador SOEC. Extraído desde [12].

En la Tabla 2.2 se presentan algunas características técnicas de las tres tecnologías de electrolisis de agua antes mencionadas.

La electrólisis alcalina es la tecnología más consolidada a nivel industrial, destacando por su bajo costo y larga vida útil. Produce hidrógeno con un alto grado de pureza, aunque ligeramente inferior al alcanzado por otras tecnologías [12], [13].

La tecnología PEM opera a densidades de corriente más elevadas y permite obtener una pureza de hidrógeno superior. Su desarrollo ha avanzado considerablemente en el último tiempo, aunque los costos de inversión y la vida útil siguen siendo factores limitantes frente a la tecnología alcalina [9], [12].

En el caso de la electrólisis mediante celdas de óxido sólido, se alcanzan las mayores eficiencias energéticas debido a su funcionamiento a altas temperaturas, lo que mejora la cinética de las reacciones y reduce la energía eléctrica requerida para el proceso. Sin embargo, presenta una vida

útil más reducida y costos de inversión elevados, por lo que su implementación aún no se masifica a nivel industrial [9], [12].

Tabla 2.2: Comparación entre electrólisis de agua alcalina (ALK), membrana de intercambio de protones (PEM) y de celdas de óxido sólido (SOEC). Datos recopilados desde [9], [12], [13].

	ALK	PEM	SOEC
Temperatura de operación [°C]	60 – 80	50 – 80	600 – 1000
Densidad de corriente [A/cm ²]	0.2 – 0.4	0.6 – 2.0	0.3 – 1.0
Voltaje de celda [V]	1.8 – 2.4	1.8 – 2.2	0.95 – 1.3
Vida útil [h]	60000	>30000	20000
Pureza de hidrogeno [%]	99.3 – 99.9998	99.9 – 99.9999	99.9
Costo de inversión [USD/kW]	500 – 1700	800 – 1800	>2000
Eficiencia [%]	50 – 78	55 – 83	90

2.4. Parámetros de desempeño de un convertidor CA-CC

2.4.1 Introducción

Los parámetros de desempeño en un convertidor CA-CC permiten evaluar cómo se comporta el sistema eléctrico durante la conversión de energía, considerando tanto la calidad de la señal obtenida como el aprovechamiento de los recursos.

2.4.2 Factor de potencia

El factor de potencia (FP) es un parámetro definido como la razón entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S) de un sistema eléctrico [14], es decir, como se señala en la expresión (2.7).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.7)$$

En sistemas de corriente alterna sinusoidal, el factor de potencia también se expresa en función del ángulo de desfase entre las ondas de voltaje y corriente, tal como se indica en (2.8).

$$FP = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (2.8)$$

Donde θ_v es el ángulo fasorial de voltaje y θ_i es el ángulo fasorial de corriente. En relación con lo anterior, la representación de la potencia compleja (S) se ilustra mediante el triángulo de potencias de la Figura 2.5, en el cual se descompone en potencia activa (eje real) y potencia reactiva (eje imaginario), es decir, $S = P + jQ$.

De esta manera, el factor de potencia puede interpretarse geométricamente como se señala en (2.9). Notar que $S = |S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

$$FP = \cos(\theta_v - \theta_i) = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.9)$$

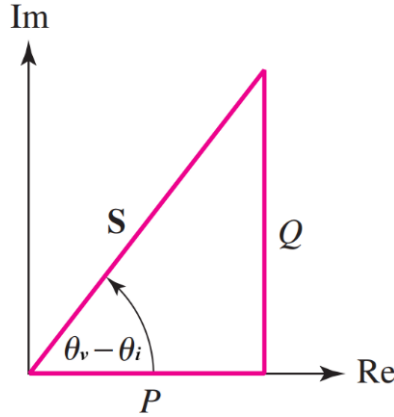


Figura 2.5: Representación de la potencia compleja. Adaptado desde [14].

Un valor de FP cercano a 1 indica que la mayor parte de la potencia aparente se encuentra asociada a la potencia activa, mientras que la potencia reactiva es mínima. En Chile, la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución [15] establece que el factor de potencia debe mantenerse dentro de un rango definido. Cuando la diferencia $\theta_v - \theta_i$ es positiva, es decir, la corriente atrasa al voltaje, se permite un valor mínimo de 0.93. En cambio, cuando la diferencia $\theta_v - \theta_i$ es negativa, es decir, la corriente adelanta al voltaje, el límite se fija en 0.95. De este modo, se garantiza que el sistema opere de manera eficiente, evitando excesos de potencia reactiva en cualquiera de las dos condiciones de desfase.

2.4.3 Factor de rizo

La salida en voltaje de un rectificador debiese ser idealmente una señal continua pura, sin embargo, en términos prácticos la salida presenta un rizo como se muestra en la Figura 2.6.

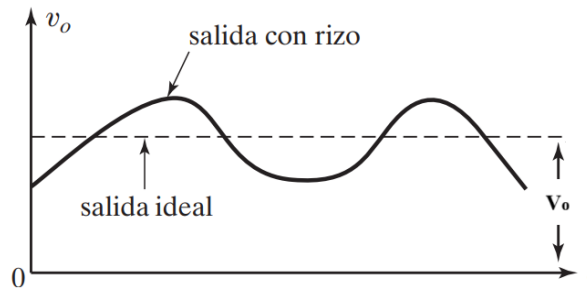


Figura 2.6: Señal de salida con rizo frente a salida ideal. Extraída desde [16].

La salida con rizo se compone de dos partes: una componente continua o valor promedio y una componente alterna asociada al rizo. El factor de rizo es un parámetro que cuantifica la magnitud de dicha ondulación presente en la señal rectificadora, de acuerdo con la expresión (2.10).

$$FR_V(\%) = \frac{V_{ca}}{V_o} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_o^2}}{V_o} \cdot 100 \quad (2.10)$$

En donde, $FR_V(\%)$ es el factor de rizo en porcentaje, V_{ca} es el valor eficaz (rms) de la componente alterna del voltaje de salida, V_o es el valor promedio del voltaje de salida y V_{rms} es el valor de la raíz media cuadrática (rms) del voltaje de salida (considerando la componente continua y alterna) [16].

Otros autores, simplifican la expresión anterior y utilizan la expresión (2.11), en donde $V_{r(p-p)}$ es el voltaje de rizo pico a pico y V_o es el valor promedio del voltaje de salida [17], como lo ilustra la Figura 2.7.

$$FR_V(\%) = \frac{V_{r(p-p)}}{V_o} \cdot 100 \quad (2.11)$$

En los capítulos posteriores de este documento se calcula el factor de rizo en Simulink de acuerdo con la expresión (2.10), empleando el diagrama de bloques representado en la Figura A.1 y mantiene la nomenclatura de $FR_V(\%)$. De manera complementaria, también se considera la expresión (2.11), mediante la cual el voltaje de rizo pico a pico se determina a partir de un análisis visual. En este último caso, su nomenclatura se redefine por $r_V(\%)$.

Cabe señalar que las expresiones previamente mencionadas están formuladas en términos de voltaje, sin embargo, su aplicación es igualmente válida para el caso de corriente.

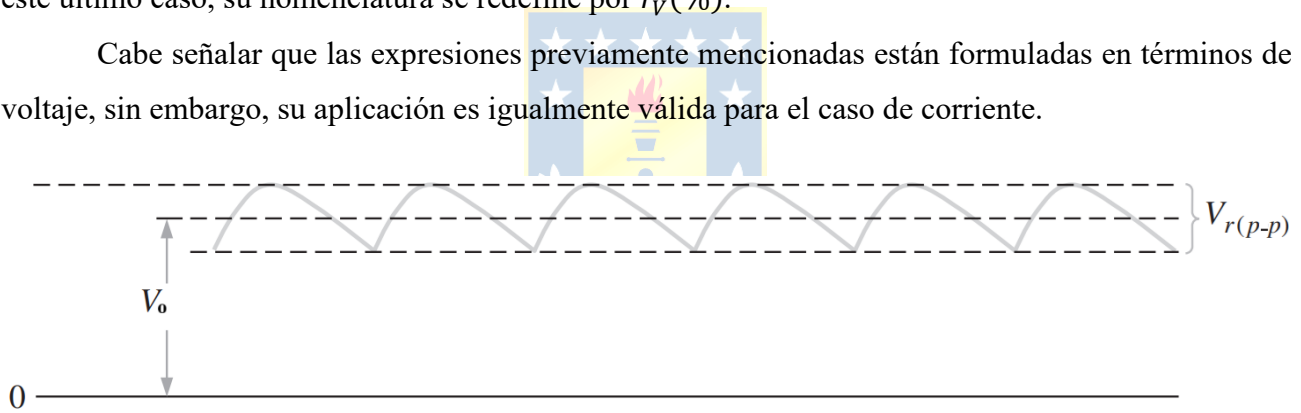


Figura 2.7: Voltaje de salida con rizo con definición del voltaje de rizo pico a pico. Extraída desde [17].

2.4.4 THD

La distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) se define como la relación entre el valor eficaz (rms) de todos los componentes armónicos y el valor eficaz de la componente fundamental de la señal [18], matemáticamente se expresa como se señala en (2.12).

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (2.12)$$

Donde, I_n representa el valor eficaz de la componente armónica de orden n -ésimo, mientras que I_1 es el valor eficaz de la componente fundamental.

Un THD reducido indica que la forma de onda se aproxima a una señal sinusoidal pura, lo cual es deseable en términos de calidad de energía. Por el contrario, un THD elevado refleja un mayor contenido armónico y, en consecuencia, una señal más distorsionada, lo que puede ocasionar problemas de eficiencia y desempeño en sistemas eléctricos y electrónicos.

En Chile, la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución [15] establece en su Artículo 3-5 que el THD de tensión, tanto en baja como en media tensión, no debe superar el 8% durante el 95% del tiempo de una semana de medición. A su vez, el Artículo 3-8 dispone que el THD de corriente en usuarios de baja tensión no debe exceder el 20%.

En el caso de los usuarios conectados en media tensión, la norma establece que la distorsión armónica de corriente se evalúa mediante el índice de distorsión de demanda total (TDD, por sus siglas en inglés), que normaliza la suma de los componentes armónicos con respecto a la corriente de demanda máxima del cliente. La expresión matemática para el TDD se muestra en (2.13).

$$TDD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \cdot 100 \quad (2.13)$$

Donde I_n representa el valor eficaz de la componente armónica de orden n -ésimo, mientras que I_L es el promedio de los máximos valores efectivos de la componente fundamental de la corriente en el punto común de conexión.

La norma fija límites de TDD en función de la relación entre la corriente de cortocircuito disponible en el punto común de conexión (I_{SC}) y la corriente de demanda máxima promedio (I_L). En consecuencia, el valor máximo de TDD permitido varía entre 5% y 20%, tomando valores más bajos para relaciones pequeñas de I_{SC}/I_L y valores más altos cuando la relación I_{SC}/I_L es grande.

2.4.5 Eficiencia

La eficiencia se define como un parámetro fundamental en la evaluación del desempeño de dispositivos eléctricos y electrónicos, al establecer la proporción entre la potencia de salida (P_{out}) y la potencia suministrada al sistema (P_{in}).

Dado que en todo proceso de conversión o transferencia de energía se producen pérdidas inevitables, principalmente asociadas a disipación térmica, radiación u otros mecanismos, la potencia de salida resulta necesariamente inferior a la potencia de entrada.

Matemáticamente, la eficiencia queda descrita como se señala en la ecuación (2.14).

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad (2.14)$$

2.5. Topologías comunes de convertidores CA-CC para la producción de hidrógeno verde

2.5.1 Introducción

La producción de hidrógeno verde mediante electrólisis, en general, requiere convertir eficientemente la energía eléctrica de corriente alterna en corriente continua, adecuada para alimentar electrolizadores. En esta sección se describen las principales topologías de convertidores CA-CC utilizadas en dicha aplicación.

2.5.2 Rectificador de tiristores de 6 pulsos (6-TR)

Esta topología convierte de CA a CC mediante seis tiristores dispuestos en un puente, como se muestra en la Figura 2.8. La tensión de salida se ajusta controlando el ángulo de disparo de los tiristores. Si bien este sistema presenta bajas pérdidas en los dispositivos semiconductores, genera un alto contenido de armónicos, especialmente de 5° y 7° orden en el lado de la red eléctrica, además, el rizado en corriente es alto, lo que afecta negativamente la eficiencia del proceso de electrólisis y reduce la vida útil del electrolizador. Por otro lado, también produce una elevada cantidad de potencia reactiva, lo que deteriora la calidad de energía en términos del factor de potencia [11].

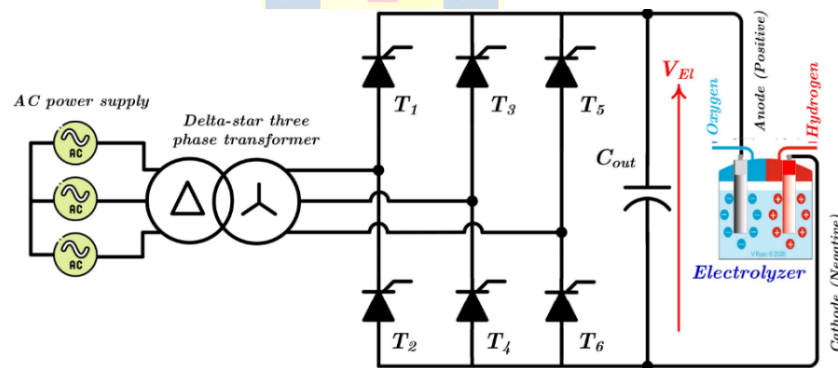


Figura 2.8: Diagrama de rectificador de tiristores de 6 pulsos. Extraído desde [19].

2.5.3 Rectificador de tiristores de 12 pulsos (12-TR)

Este sistema utiliza un transformador de tres devanados, como se aprecia en Figura 2.9, cuya función es eliminar las corrientes armónicas de 5° y 7° orden en la interfase con la red eléctrica. A cada una de las salidas secundarias del transformador se conecta un rectificador trifásico de 6 pulsos, controlados por tiristores. La corriente que suministra energía al electrolizador se puede ajustar variando el ángulo de disparo de los tiristores en ambos rectificadores. Cuando el sistema opera a baja potencia, se requiere un ángulo de disparo mayor, lo que provoca un aumento en la generación de

armónicos y en la demanda de potencia reactiva. Por ende, tanto el factor de potencia como la distorsión armónica están directamente influenciados por el valor de dicho ángulo [20].

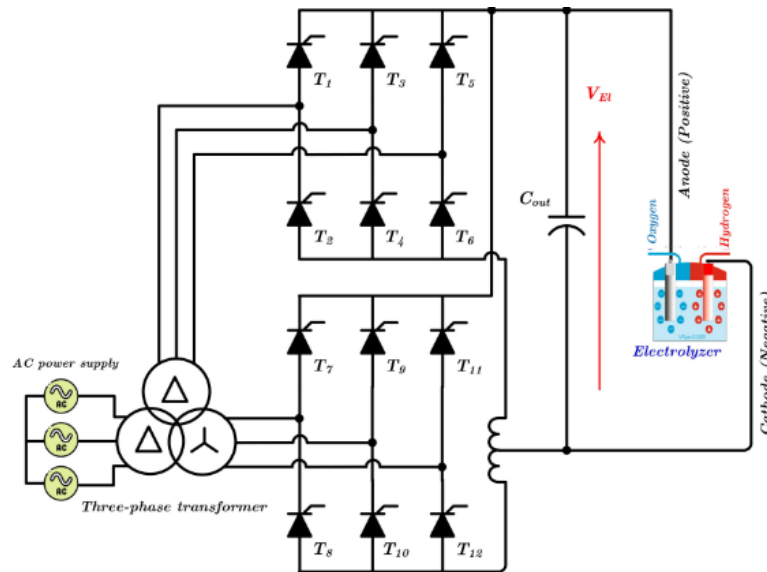


Figura 2.9: Puente rectificador de tiristores de doce pulsos (12-TR). Extraído desde [19].

2.5.4 Rectificador de diodos de 12 pulsos con chopper multifásico (12-DRMC)

La topología se basa en un rectificador trifásico de 12 pulsos, seguido por una etapa de choppers (convertidores CC-CC) multifase, implementados con IGBTs y diodos como se muestra en Figura 2.10. Los choppers están dispuestos de manera intercalada para reducir el rizo de corriente que llega al electrolizador. La corriente/potencia suministrada al electrolizador se regula modificando los ciclos de trabajo (duty cycle) de los IGBTs en los choppers. En comparación con el 12-TR, esta configuración mejora la calidad de energía, pues cuenta con distorsión de corriente relativamente menor y un factor de potencia constantemente alto en todo el rango de operación [20]. Además, en general se utilizan filtros pasivos sintonizados para mejor aún más la calidad de energía.

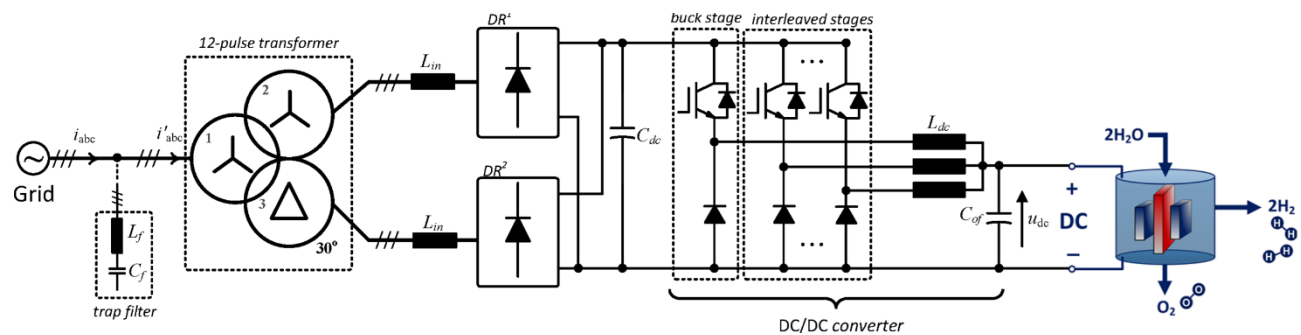


Figura 2.10: Diagrama de circuito de un rectificador de diodos de 12 pulsos con chopper multifásico (12-DRMC).

Extraído desde [20].

2.5.5 Rectificador de tiristores de 12 pulsos con filtro de potencia shunt activo (12-TRASPF)

Esta arquitectura toma en cuenta las dos topologías antes mencionadas, pues se encuentra compuesta por un rectificador de tiristores de 12 pulsos combinado con un filtro activo como se muestra en la Figura 2.11. En esta configuración los problemas de calidad de energía asociados al 12-TR, son compensados mediante el filtro activo de potencia en derivación [9], [20].

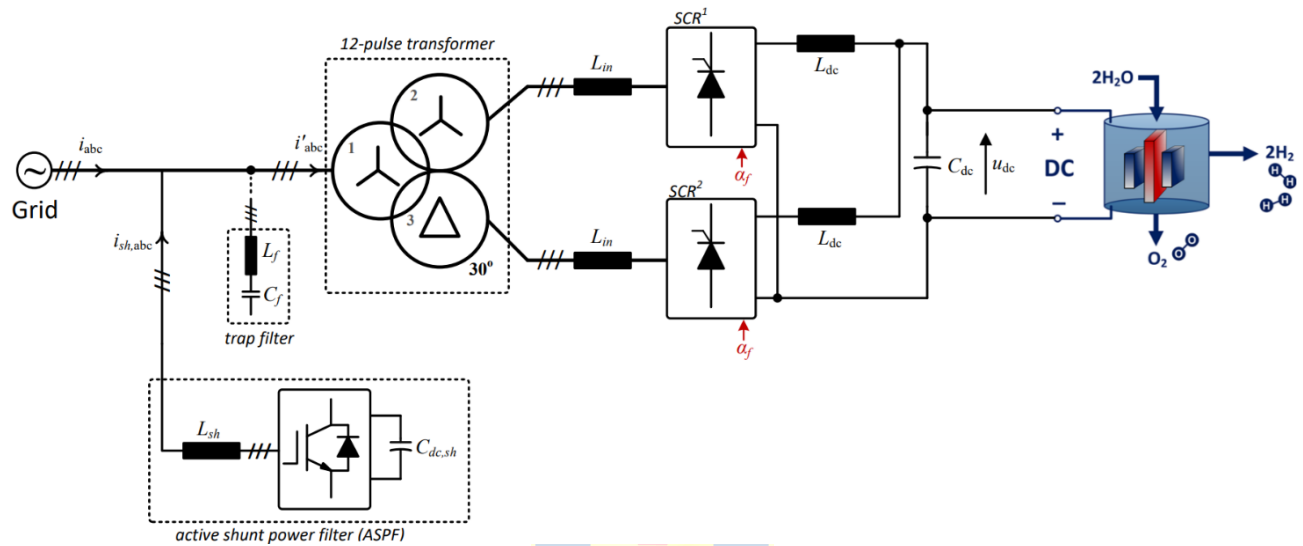


Figura 2.11: Diagrama de circuito de un sistema híbrido con rectificador de tiristores de 12 pulsos y filtro de potencia shunt activo (12-TRASPF). Extraído desde [20].

2.5.6 Rectificador frontal activo (AFER)

La topología del rectificador frontal activo se muestra en la Figura 2.12, la cual utiliza un convertidor B6 con tres puentes de IGBTs y en aplicaciones que requieren un mayor rango de operación, puede emplearse una configuración B6 + chopper para ajustar corriente y tensión de salida de forma más precisa [20]. La corriente de entrada se mantiene sinusoidal ajustando el ciclo de trabajo de los IGBTs, lo que reduce la distorsión armónica. Además, el factor de potencia se optimiza controlando la modulación del convertidor [20].

Una ventaja destacada del AFER es su capacidad para mejorar la calidad de energía, sin requerir filtros armónicos adicionales ni compensadores de potencia reactiva [9].

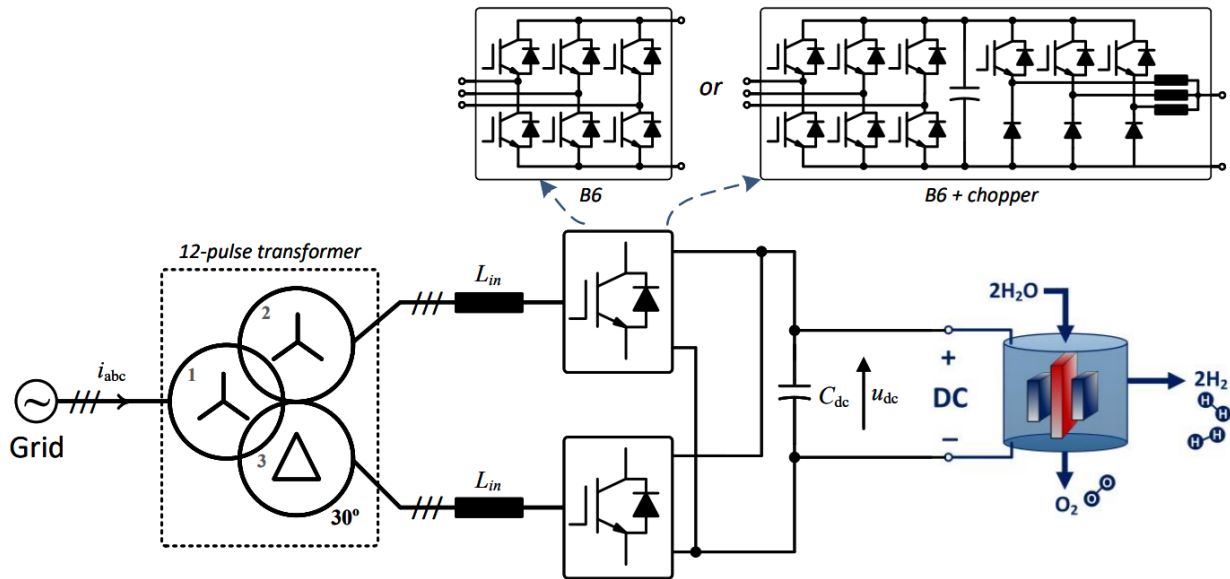


Figura 2.12: Diagrama de circuito de un rectificador frontal activo (AFER). Extraído desde [20].

Si bien diversos autores analizan estas topologías de rectificación, existen pocos estudios que las comparen entre sí en términos de calidad de energía, tanto en el lado de corriente alterna como en el de corriente continua, especialmente en aplicaciones relacionadas con electrolizadores [21].

Sin embargo, en [22] se analizan las últimas cuatro topologías antes mencionadas para su aplicación en sistemas Power-to-X a nivel industrial. En dicho estudio, se utiliza el software PLECS para modelar tanto la electrónica de potencia como una carga de 1 [MW], por lo que sus resultados resultan directamente comparables entre sí y relevantes para esta Memoria de Título. Los parámetros del sistema empleados en PLECS por los autores de [22] se detallan en la Tabla A.1 presente en el Anexo A.

Dentro de los resultados obtenidos en [22] se tiene que para la topología 12-TR, la corriente de entrada tiene un THD de 8.94% con armónicos predominante es los órdenes 11 y 13, por otro lado, el factor de potencia a plena carga es de 0.82, lo que se debe a la conmutación de los tiristores. Para mitigar estos problemas, se incorpora un filtro pasivo sintonizado en los armónicos 11 y 13, lo cual redujo el THD a 3.64% y el factor de potencia aumenta a 0.99, lo cual mejora sustancialmente la calidad de energía. También se tiene que, bajo condiciones de carga parcial, la eficiencia se mantiene alta, pero el contenido armónico se incrementa moderadamente, reflejando una mala adaptabilidad dinámica.

Con respecto a la topología 12-DRMC, se presenta un THD de corriente de 8.07% con predominancia de armónicos 11 y 13, también se presenta un factor de potencia a plena carga de 0.97, lo que indica un comportamiento razonable en cuanto al desfase entre corriente y voltaje en

condiciones nominales. Además, al agregar el filtro pasivo sintonizado, el sistema mejora su desempeño en términos de distorsión armónica, pues el THD se reduce a 2.12%. Sin embargo, a pesar de esta mejora en calidad de onda, el factor de potencia disminuye con la carga, cayendo desde 0.95 a 0.34 al reducir la carga de 100% a 20%, lo que refleja que el filtro pasivo no puede mantener el intercambio energético eficiente cuando el sistema opera en condiciones alejadas de lo nominal.

En la topología 12-TRASPF se evalúan distintas referencias de corriente reactiva para el filtro activo. Con $I_q^*=0$ el sistema alcanza un THD de corriente de 0.7% pero mantiene un factor de potencia bajo de 0.82. Al aumentar la inyección de potencia reactiva ($I_q^*=700$) el factor de potencia mejora a 0.94, aunque el THD sube ligeramente hasta 0.82%. En pruebas de carga parcial, sin compensación el factor de potencia cae hasta 0.36 al 20% de carga, mientras que con compensación se mantiene por sobre 0.74, aunque el THD aumenta hasta 2.8%. Estos resultados muestran que el filtro activo permite ajustar el factor de potencia según la demanda, a costa de un aumento moderado en la distorsión armónica.

Por otro lado, la topología AFER, la cual en este estudio utiliza la configuración B6 + Chopper, muestra un buen desempeño en términos de calidad de energía, pues a plena carga logra un THD de corriente de 0.8% con armónicos prácticamente despreciables, lo que indica una forma de onda casi ideal. En cuanto a la robustez frente a variación de carga, los resultados muestran que el factor de potencia se mantiene en 0.99 entre 100% y 60% de carga, disminuyendo a 0.75 al 20%. Y aunque el THD se incrementa gradualmente, el sistema sigue operando dentro de márgenes aceptables, lo que evidencia una alta capacidad de control y adaptación, incluso a baja carga, sin necesidad de filtros pasivos o activos adicionales.

En la Tabla 2.3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en [22]. En el caso de los sistemas 12-TR y 12-DRMC, se muestran los resultados sin la implementación de los filtros pasivos sintonizados. Para consultar los resultados con el uso de los filtros pasivos, véase la Tabla A.2 presente en el Anexo A.

En términos de costos asociados, en [21] se indica que a medida que se incrementa el número de etapas de conversión y se agregan elementos como filtros activos o choppers los costos aumentan. Por ejemplo, la configuración 6-TR resulta ser la más económica debido al número reducido de dispositivos de potencia y la utilización de componentes pasivos básicos, lo que además reduce la complejidad del sistema.

Tabla 2.3: Resumen comparativo de topologías analizadas en [22].

12-TR											
Análisis armónico											
Orden de armónico	11°	13°	23°	25°	35°	37°	THD				
Valor [%]	8.02	2.57	2.16	1.57	0.71	0.83	8.94				
Variación en la carga											
Carga [%]			100	80	60	40	20				
Potencia [MW]			1	0.8	0.6	0.4	0.2				
Factor de potencia			0.82	0.73	0.62	0.51	0.35				
THD _i [%]			8.92	9.26	9.50	10.56	10.78				
12-DRMC											
Análisis armónico											
Orden de armónico	11°	13°	23°	25°	35°	37°	THD				
Valor [%]	7.02	3.39	1.34	1.24	0.53	0.47	8.07				
Variación en la carga											
Carga [%]			100	80	60	40	20				
Potencia [MW]			1	0.8	0.6	0.4	0.2				
Factor de potencia			0.97	0.97	0.97	0.97	0.96				
THD _i [%]			8.07	8.14	9.42	10.78	14.78				
12-TRASPF											
Análisis armónico											
Referencia de corriente reactiva I _q *			0			-500	-700				
Carga [MW]			1			1	1				
Factor de potencia			0.82			0.91	0.94				
Potencia APF [kVAr]			109			226.9	359.5				
THD _i [%]			0.7			0.8	0.82				
Variación en la carga											
Carga [%]	100		80		60		40		20		
Potencia [MW]	1		0.8		0.6		0.4		0.2		
I _q *	0	-700	0	-700	0	-700	0	-700	0	-700	
Factor de potencia	0.82	0.94	0.73	0.89	0.63	0.83	0.51	0.77	0.36	0.74	
THD _i [%]	0.7	0.8	1.2	1.5	1.5	1.9	1	1.5	1.5	2.8	
AFER B6 + Chopper											
Análisis armónico											
Orden de armónico	11°	13°	23°	25°	35°	37°	THD				
Valor [%]	3.8e-5	3.7e-5	1.9e-5	1.7e-5	1.2e-5	1.2e-5	0.8				
Variación en la carga											
Carga [%]			100		80		60		40		20
Potencia [MW]			1		0.8		0.6		0.4		0.2
Factor de potencia			0.99		0.99		0.99		0.95		0.75
THD _i [%]			0.80		1.01		1.34		1.92		3.06

Por otro lado, en [21] también se menciona que la topología AFER B6 + Chopper tienen un mayor costo inicial debido al doble proceso de conversión y la sofisticación del control, pero ofrece ventajas como mejor calidad de potencia y eliminación de la necesidad de filtros externos, lo que

puede traducirse en ahorros operativos a largo plazo. En la Tabla 2.4 se indica un resumen en términos de costos de las configuraciones de rectificación antes mencionadas.

Tabla 2.4: Análisis de costos de las topologías. Adaptado desde [21].

Grado de costo	Costo de dispositivos de potencia	Costo de dispositivos pasivos
–	6-TR	6-TR
↓	AFER B6	12-TR
	12-DRMC	AFER B6
	12-TR	12-DRMC
↓	12-TRASPF	12-TRASPF
+	AFER B6 + Chopper	AFER B6 + Chopper

En la Tabla 2.5 se presenta una comparación cualitativa de las topologías analizadas en [20] de convertidores CA-CC empleadas en la alimentación de electrolizadores, considerando aspectos clave de desempeño y operación.

Tabla 2.5: Comparación entre las topologías. Superior (++); satisfactorio (+); neutral (Δ); insatisfactorio (–).

Adaptado desde [20].

Topología	Calidad de energía	Eficiencia	Costo	Confiabilidad	Complejidad del control
12-TR	–	+	+	++	+
12-DRMC	Δ	Δ	+	+	Δ
12-TRASPF	+	Δ	Δ	Δ	–
AFER	++	Δ	–	Δ	–

2.6. Conexión Scott-T

La conexión Scott-T es un método utilizado para obtener una fuente bifásica con tensiones desfasadas en 90° a partir de una fuente de alimentación trifásica. Esta configuración emplea dos transformadores monofásicos de igual capacidad. Uno de ellos incluye una toma en su devanado primario ubicada al 86.6% del voltaje a plena carga. La conexión se realiza como se indica en la Figura 2.13, donde la toma al 86.6% del transformador $T2$ se conecta al punto medio del devanado primario del transformador $T1$ [23], de este modo, las relaciones de transformación quedan descritas por las ecuaciones (2.15) y (2.16).

$$a_{T1} = \frac{N_P}{N_S} \quad (2.15)$$

$$a_{T2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{N_P}{N_S} = 0.866 \cdot \frac{N_P}{N_S} \quad (2.16)$$

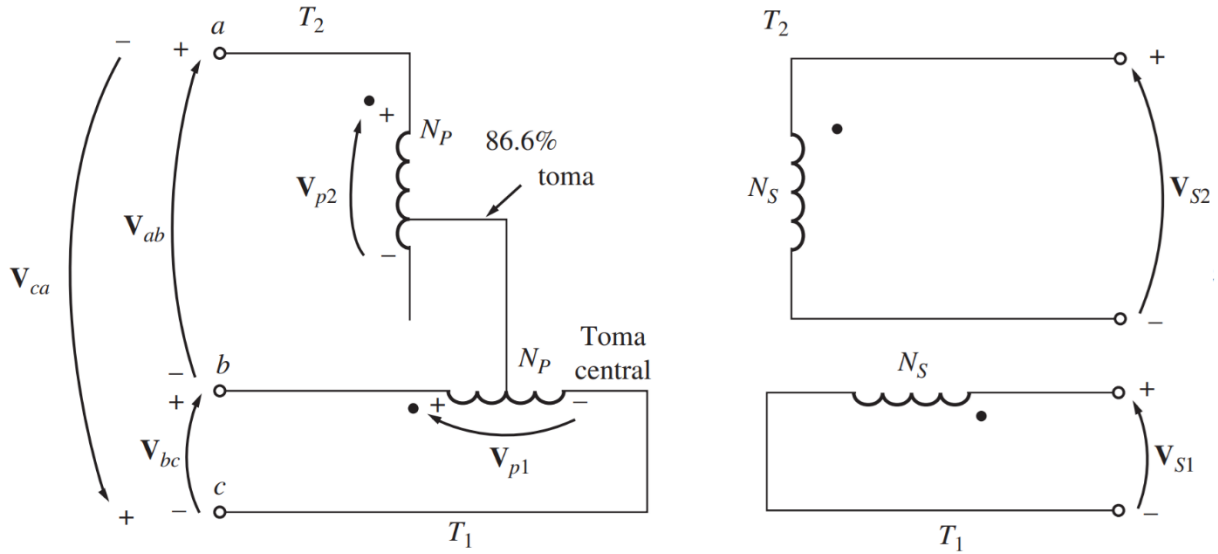


Figura 2.13: Diagrama de la conexión del transformador Scott-T. Extraída desde [23].

Por otro lado, si se toma como referencia de fases la tensión compuesta V_{bc} , los voltajes en los devanados primarios del transformador quedan descritos en las ecuaciones (2.17), (2.18) y (2.19), además se muestran en la Figura 2.14.a.

$$V_{ab} = |V| \angle 120^\circ \quad (2.17)$$

$$V_{bc} = |V| \angle 0^\circ \quad (2.18)$$

$$V_{ca} = |V| \angle -120^\circ \quad (2.19)$$

Por ende, el valor complejo de la tensión primaria aplicada al transformador $T1$ queda descrito en (2.20).

$$V_{p1} = V_{bc} = |V| \angle 0^\circ \quad (2.20)$$

Y de este modo el valor complejo de la tensión secundaria del transformador $T1$ se describe en la expresión (2.21).

$$V_{S1} = \frac{V_{p1}}{a_{T1}} = \frac{|V| \angle 0^\circ}{\frac{N_p}{N_s}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot |V| \angle 0^\circ \quad (2.21)$$

De un modo similar, el valor complejo de la tensión primaria aplicada al transformador $T2$ queda descrito en (2.22).

$$V_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} |V| \angle 90^\circ \quad (2.22)$$

Y de este modo el valor complejo de la tensión secundaria del transformador $T2$ se describe en la expresión (2.23).

$$V_{S2} = \frac{V_{p2}}{a_{T2}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} |V| \angle 90^\circ}{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{N_P}{N_S}} = \frac{N_S}{N_P} \cdot |V| \angle 90^\circ \quad (2.23)$$

De acuerdo con las ecuaciones (2.21) y (2.23) se obtienen dos tensiones secundarias de igual módulo y desfasadas entre sí en 90° (como se muestra en la Figura 2.14.c), es decir, se ha transformado el sistema trifásico simétrico primario en un sistema bifásico secundario simétrico [24].

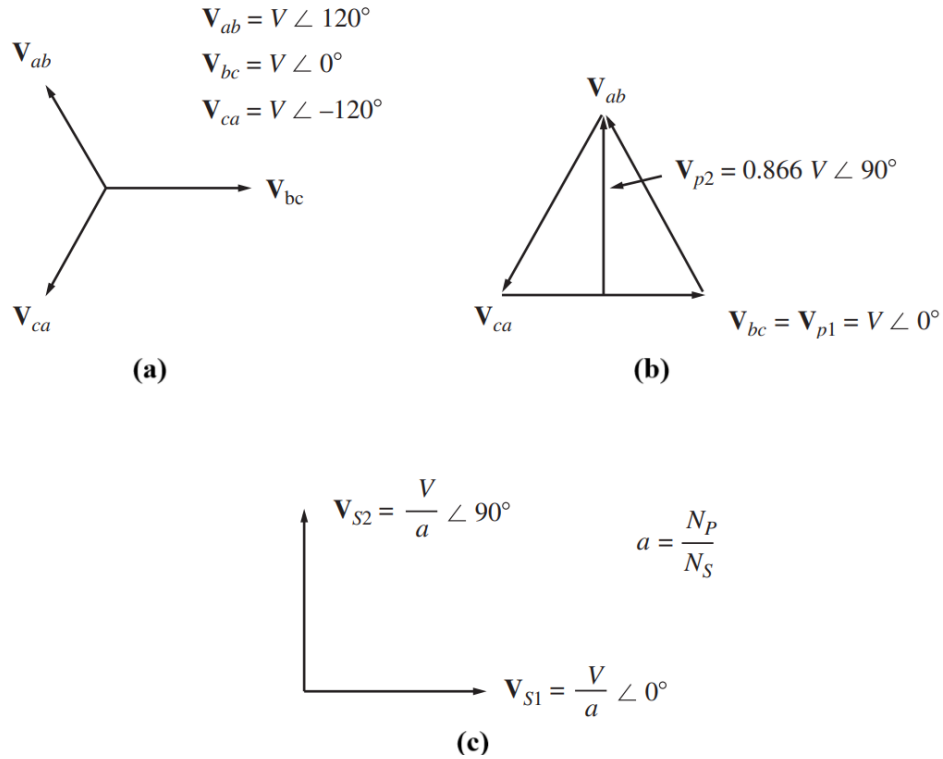


Figura 2.14: Fasores en conexión Scott-T. (a) Voltajes de entrada; (b) Voltajes en los devanados primarios de la conexión Scott-T; (c) Voltajes secundarios bifásicos. Extraída desde [23].

2.7. Convertidor elevador con PFC

El convertidor elevador (boost) con PFC es una topología ampliamente utilizada para la conversión de energía CA–CC. Su funcionamiento se basa en dos etapas principales: primero, la tensión alterna de entrada v_s es procesada mediante un puente rectificador de diodos, obteniéndose una señal rectificada $|v_s|$; luego, esta tensión rectificada se aplica a un convertidor elevador conformado por un inductor, un interruptor electrónico (MOSFET o IGBT), un diodo y un condensador como se aprecia en la Figura 2.15.

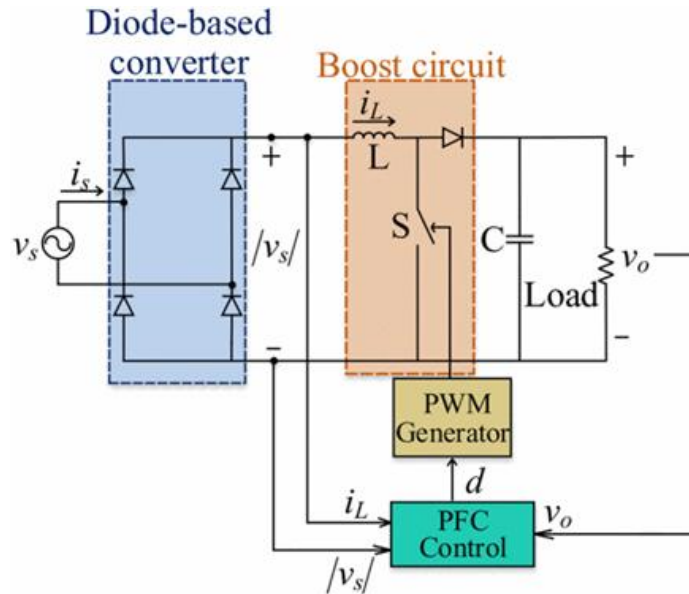


Figura 2.15: Convertidor monofásico con circuito elevador. Extraído desde [25].

La finalidad del control PFC es que la corriente absorbida desde la red siga la forma de la tensión de entrada, es decir, que sea sinusoidal y en fase con v_s logrando un factor de potencia cercano a la unidad.

Para alcanzar este objetivo, se utiliza un esquema de regulación basado en dos lazos anidados como se muestra en la Figura 2.16. El lazo interno de corriente se encarga de dar forma a la corriente del inductor i_L . Para ello, se genera una referencia proporcional a la tensión rectificada $|v_s|$, de manera que la corriente medida se vea forzada a seguir esa referencia sinusoidal.

El lazo externo de tensión, en cambio, se encarga de mantener la salida v_o en el nivel deseado. Para hacerlo, compara la tensión de salida v_o con la referencia v_o^* y ajusta la amplitud de la referencia de corriente que recibe el lazo interno. De esta manera, además de corregir el factor de potencia, se garantiza que la tensión entregada a la carga permanezca estable.

Finalmente, la señal de control obtenida en el lazo interno modula un generador PWM, el cual determina el ciclo de trabajo del interruptor del convertidor.

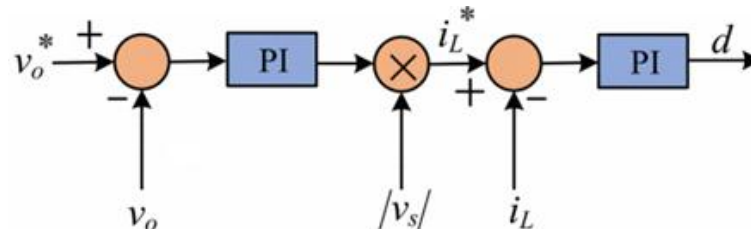


Figura 2.16: Sistema de control PFC. Extraído desde [25].

Asumiendo un funcionamiento en modo de conducción continua, las ecuaciones diferenciales del convertidor elevador se expresan en (2.24) y (2.25).

$$L \frac{di_L}{dt} = |v_s| - (1 - d)v_o \quad (2.24)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = (1 - d)i_L - \frac{v_o}{R_{load}} \quad (2.25)$$

Donde i_L es la corriente del inductor, $|v_s|$ es la tensión de entrada rectificada, v_o es la tensión de salida, R_{load} representa a la carga y finalmente, d es el ciclo de trabajo del interruptor y se define según la expresión (2.26).

$$d = 1 - \frac{|v_s|}{v_o} \quad (2.26)$$

2.8. Circuito equivalente del electrolizador tipo PEM

El comportamiento eléctrico de los electrolizadores de membrana de electrolito polimérico o membrana de intercambio de protones se ha estudiado por diversos autores en los últimos años, lo que ha permitido desarrollar un modelo que conceptualiza al electrolizador PEM como un circuito electrónico con la particularidad de tomar en consideración las dinámicas encapsuladas dentro de la curva corriente-voltaje [26]. En la Figura 2.17 se muestran los detalles del circuito equivalente, en donde las dos celdas RC representan el comportamiento en el ánodo ($R_a C_a$) y en el cátodo ($R_c C_c$), respectivamente. Por otro lado, la tensión E_{rev} reproduce la potencia convertida en hidrogeno, mientras que la resistencia R_m está asociada a las pérdidas en la membrana [27].

A partir del modelo, el voltaje del electrolizador V_{el} queda dado por la expresión (2.27).

$$V_{el} = E_{rev} + V_{act,a} + V_{act,c} + V_m \quad (2.27)$$

Además, las ecuaciones dinámicas de $V_{act,a}$ y $V_{act,c}$ quedan definidas por las expresiones (2.28) y (2.29), respectivamente.

$$\frac{dV_{act,a}}{dt} = \frac{1}{C_a} \cdot I_{el} - \frac{1}{\tau_a} \cdot V_{act,a} \quad (2.28)$$

$$\frac{dV_{act,c}}{dt} = \frac{1}{C_c} \cdot I_{el} - \frac{1}{\tau_c} \cdot V_{act,c} \quad (2.29)$$

Las constantes de tiempo τ_a y τ_c que rigen la dinámica varían según las condiciones de operación a la entrada del electrolizador [28], [29], y quedan descritas en (2.30) y (2.31).

$$\tau_a = C_a \cdot R_a \quad (2.30)$$

$$\tau_c = C_c \cdot R_c \quad (2.31)$$

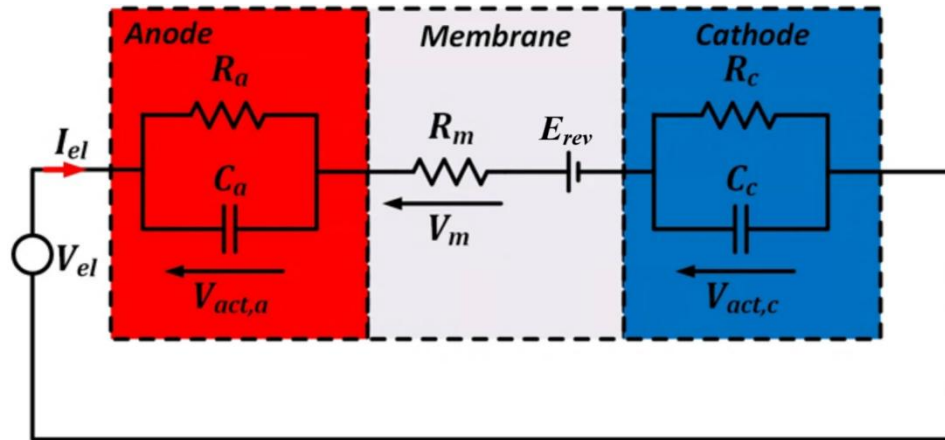


Figura 2.17: Circuito eléctrico equivalente del electrolizador tipo PEM. Extraído desde [26].



3. Topología de rectificación propuesta

3.1. Introducción

En este capítulo se expone la topología de rectificación desarrollada para este trabajo, presentando la estructura general del sistema y los parámetros relevantes de su configuración, los cuales constituyen la base para el análisis de desempeño y resultados presentados en capítulo 4.

3.2. Topología propuesta

La topología propuesta y analizada en el próximo capítulo se puede apreciar en la Figura 3.1, en donde se emplea una fuente de tensión trifásica conectada a una configuración Scott-T. Las dos salidas de la conexión se convierten en corriente continua mediante puentes rectificadores de diodos. Posteriormente, cada salida rectificada alimenta cinco convertidores elevadores con PFC, los que son operados de manera entrelazada, y cada uno se encuentra conformado por un inductor, un interruptor IGBT y un diodo.

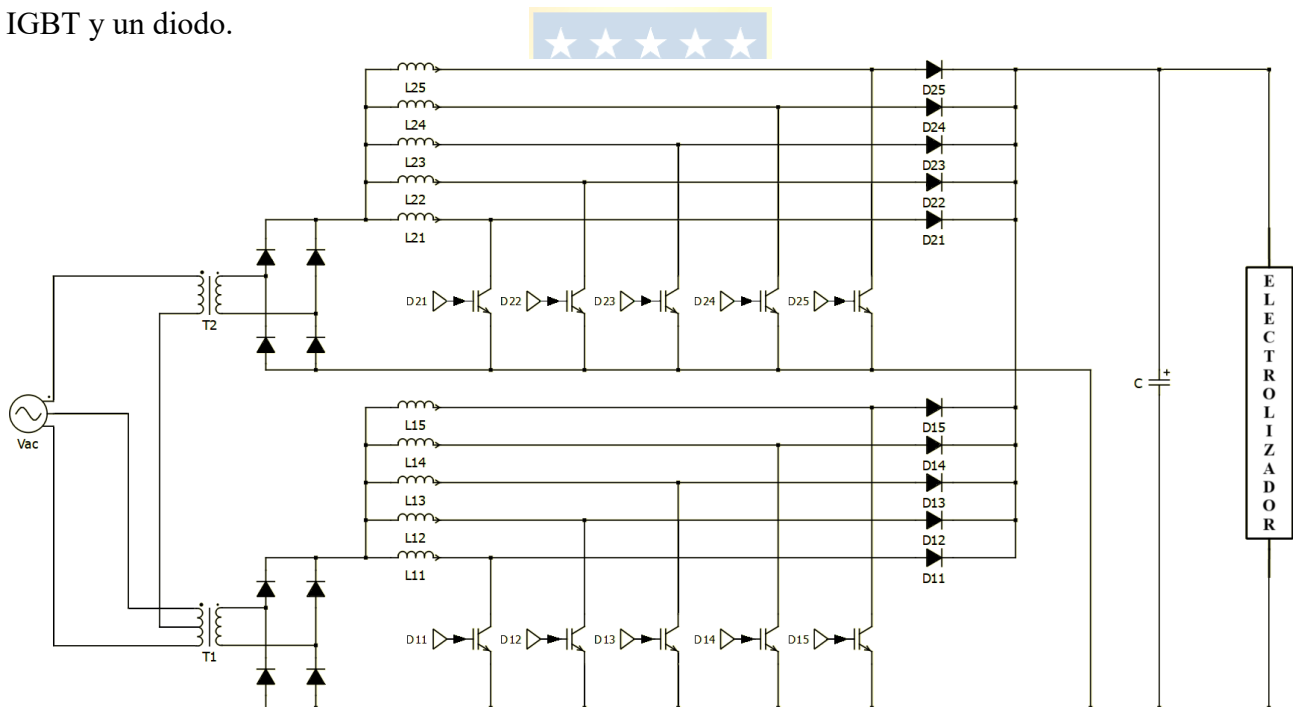


Figura 3.1: Propuesta de topología rectificadora con conexión Scott-T y PFC.

De esta manera, se aplica el principio descrito previamente en la sección 2.7 para el convertidor elevador, pero replicado en múltiples ramas entrelazadas. Esto permite regular la tensión de salida, mantener la corriente de entrada sinusoidal y en fase con la tensión de red, y al mismo tiempo manejar mayores valores de corriente, condición fundamental para la alimentación del electrolizador PEM.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de los parámetros considerados en la implementación de la topología mostrada en la Figura 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros del sistema propuesto.

Parámetro	Valor	Unidad de medida
$V_{LL-3\Phi}$	4160	[V _{rms}]
Frecuencia de red	50	[Hz]
$L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{14}, L_{15}$	30	[μH]
$L_{21}, L_{22}, L_{23}, L_{24}, L_{25}$	30	[μH]
C	5700	[μF]
Tensión en secundario de T ₁	41	[V _{rms}]
Tensión en secundario de T ₂	41	[V _{rms}]
Frecuencia de conmutación	10	[kHz]

3.3. Parámetros de electrolizador tipo PEM

Para la simulación se utilizan como base datos del electrolizador comercial VMF-20M de la empresa Suzhou VMA New Energy [30], los cuales se presentan en la Tabla 3.2. Esta elección se justifica por ser un electrolizador PEM de alta potencia.

Tabla 3.2: Datos del electrolizador PEM VMF-20M. Extraído desde [30].

Variable	Valor	Unidad de medida
Corriente	0 – 1575	[A _{CC}]
Voltaje	57 – 80	[V _{CC}]
Número de celdas	32	–
Área efectiva de la membrana	1050	[cm ²]
Temperatura de operación	40 – 60	[°C]
Flujo de H ₂	20	[Nm ³ /h]

Como no se cuenta con mayores detalles técnicos de fabricación del electrolizador, ni su curva de polarización y es necesario estimar los parámetros del circuito equivalente analizado en la sección 2.8, se analiza la curva de polarización del electrolizador PEM presentada en [31], la cual se identifica en la Figura 3.2 como “electrolyzer polarzation”. Se observa que el comportamiento puede aproximarse a una relación lineal en el rango de densidades de corriente entre 0.07 y 1 [A/cm²].

Para llevar esta representación al caso particular del VMF-20M, se multiplican los valores de los ejes por los parámetros del electrolizador presentados en la Tabla 3.2. El eje “x”, correspondiente a la densidad de corriente, se multiplica por el área efectiva del electrolizador para obtener la corriente total. El eje “y”, correspondiente al voltaje de celda, se multiplica por el número de celdas para obtener el voltaje total del electrolizador.

De esta forma, la pendiente de la curva resultante permite estimar la resistencia total efectiva del electrolizador. Lo anterior queda descrito en la expresión (3.1).

$$R_{total} = \frac{(2.186 - 1.496) \cdot 32}{(1 - 0.07) \cdot 1050} = 22.61 [m\Omega] \quad (3.1)$$

De manera similar se puede estimar la resistencia asociada a las pérdidas en la membrana (R_m), mediante el análisis de la curva “ohmic overpotential”, según lo descrito en la expresión (3.2).

$$R_m = \frac{(1.674 - 1.168) \cdot 32}{(1) \cdot 1050} = 15.42 [m\Omega] \quad (3.2)$$

En consecuencia, la diferencia entre los dos valores de resistencia calculados ($R_{total} - R_m$) corresponde a la suma $R_a + R_c$ [32]. Asimismo, se establece que R_a debe ser superior a R_c , dado que la primera resistencia modela tanto la energía de Gibbs como las pérdidas térmicas en el ánodo, mientras que la segunda únicamente representa las pérdidas térmicas en el cátodo [32].

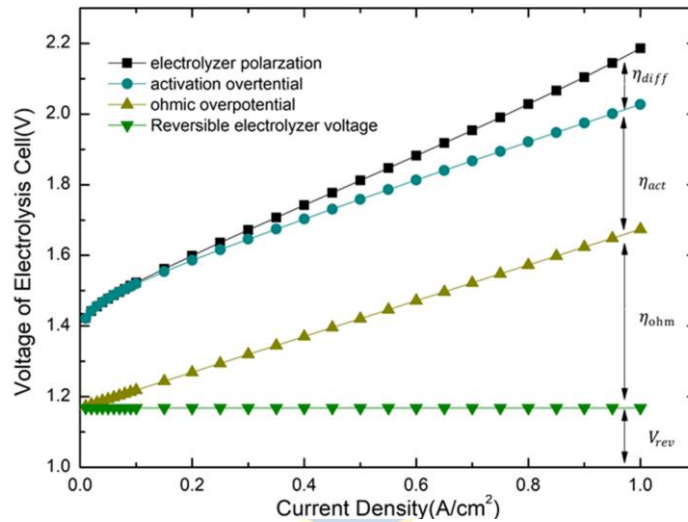


Figura 3.2: Curva de polarización electrolizador PEM estudiada en [31].

Por otro lado, en lo que respecta a las capacitancias C_a y C_c , diversos autores señalan que ambas pueden considerarse equivalentes [26], [32], asignándoles un valor de 37 [F]. Sin embargo, dado que el electrolizador objeto de estudio está constituido por 32 celdas, los valores empleados en la simulación para C_a y C_c corresponden a 1.16 [F].

De esta manera, la Tabla 3.3 muestra los parámetros propuestos para el circuito equivalente del electrolizador PEM visto en la Figura 2.17 y que se utilizan en Simulink.

Tabla 3.3: Parámetros para la simulación del electrolizador PEM.

Parámetro	Valor	Unidad de medida
R_a	5.75	[mΩ]
C_a	1.16	[F]
R_c	1.44	[mΩ]
C_c	1.16	[F]
R_m	15.42	[mΩ]
E_{rev}	44.48	[V]

En la Figura 3.3.a se presenta la curva de polarización del electrolizador PEM reportada en [31], mientras que en la Figura 3.3.b se muestra la curva obtenida a partir de los parámetros propuestos en este trabajo. Como es de esperar, ambas curvas presentan un comportamiento similar.

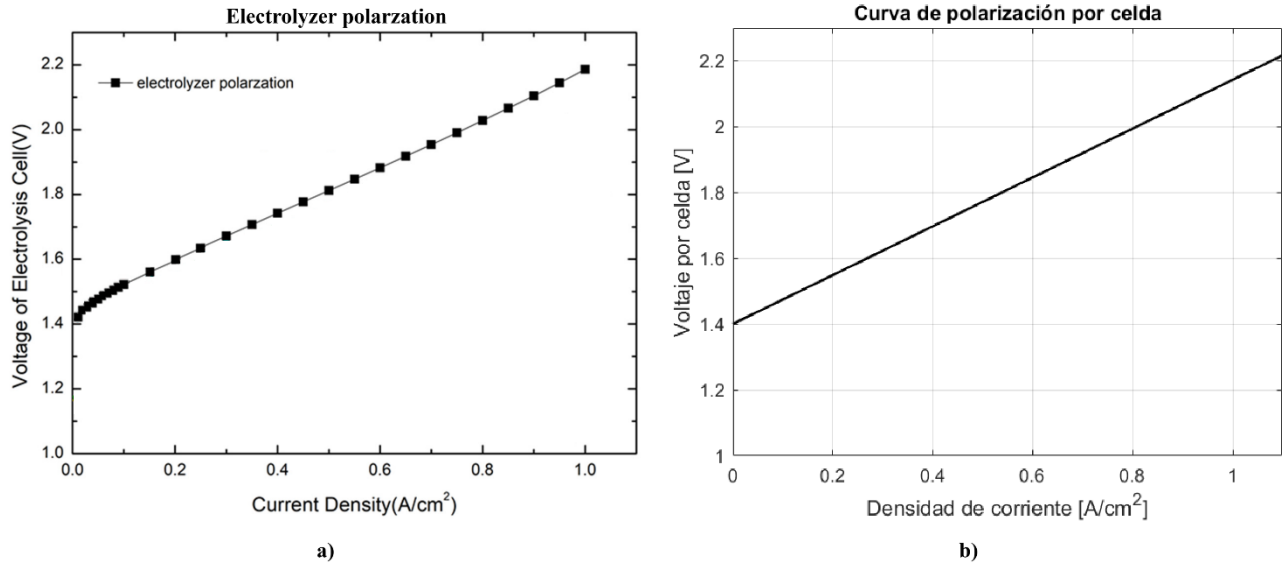


Figura 3.3: Curvas de polarización electrolizador PEM. a) Curva de polarización extraída desde [31]. b) Curva de polarización con parámetros propuestos.

Por su parte, la Figura 3.4 corresponde a la misma aproximación mostrada en la Figura 3.3.b, pero expresada en función de voltaje frente a corriente, lo que permite una visualización más adecuada del desempeño global del electrolizador.

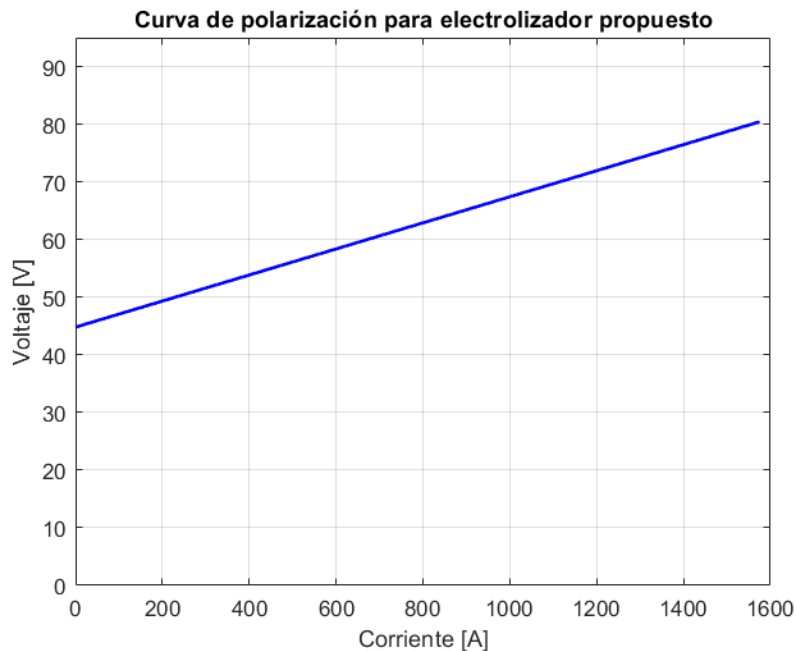


Figura 3.4: Curva voltaje v/s corriente de electrolizador PEM propuesto.

3.4. Implementación en Simulink

La topología propuesta es modelada en MATLAB/Simulink R2024b, y su esquema general se presenta en la Figura 3.5. Para la modelación se emplean principalmente bloques de la librería Specialized Power Systems, tanto en la construcción de la conexión Scott-T a partir de transformadores monofásicos como en la representación de los dispositivos semiconductores de la topología. Los parámetros asignados a cada bloque se detallan en el Anexo B, los cuales se complementan con los valores resumidos en la Tabla 3.1 y en la Tabla 3.3.

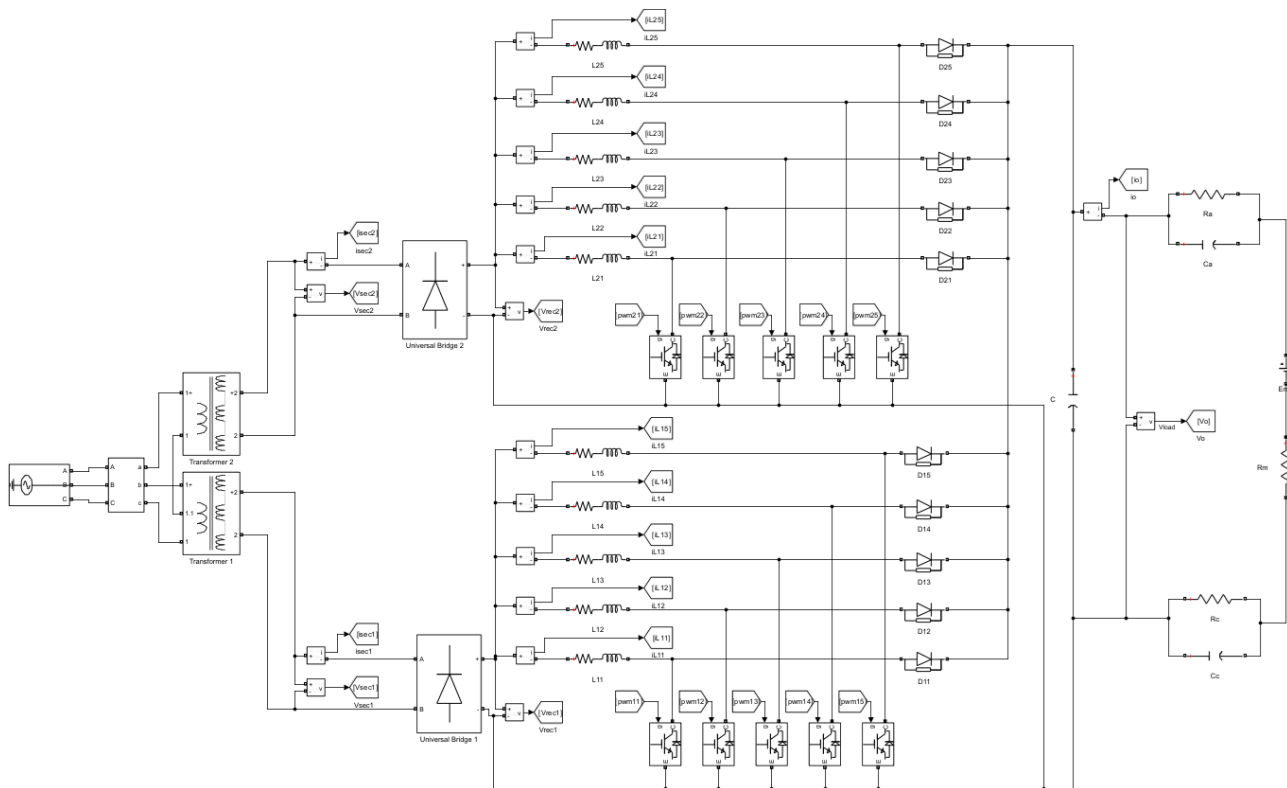


Figura 3.5: Esquema de la topología propuesta en Simulink.

El sistema de control diseñado en Simulink se muestra en la Figura 3.6. En el lazo externo de tensión, la tensión de salida se compara con su referencia, y el error es procesado mediante un controlador PI.

La salida del lazo externo corresponde a una señal de control lenta, que actúa como factor de modulación para las referencias de corriente que alimentan al lazo interno, asegurando así la regulación estable de la tensión entregada a la carga.

Para lograr la sincronización con la red, se emplean dos bloques PLL (Phase Locked Loop), uno asociado a cada secundario de la conexión Scott-T. Cada PLL genera una señal sinusoidal en fase con la tensión de su respectiva rama. Estas señales se rectifican y se multiplican por la salida del lazo

externo de tensión, obteniendo así las referencias de corriente que deben seguir los convertidores elevadores con corrección de factor de potencia.

Como se menciona en la sección 3.2, en cada salida de la conexión Scott-T se disponen cinco convertidores elevadores de manera entrelazada, lo que suma un total de diez ramas de control de corriente. Cada una de ellas cuenta con un controlador PI de corriente, que compara la corriente medida en el inductor con la referencia asignada a la rama.

El error obtenido se compensa y modula un generador PWM encargado de accionar el interruptor IGBT correspondiente. En esta implementación, la frecuencia de conmutación se fija en 10 [kHz], y las portadoras PWM se desfasan 36° entre sí ($360^\circ/10$), de manera que las diez ramas operen de forma intercalada, permitiendo distribuir la conmutación y lograr un reparto equilibrado de la potencia entre módulos.

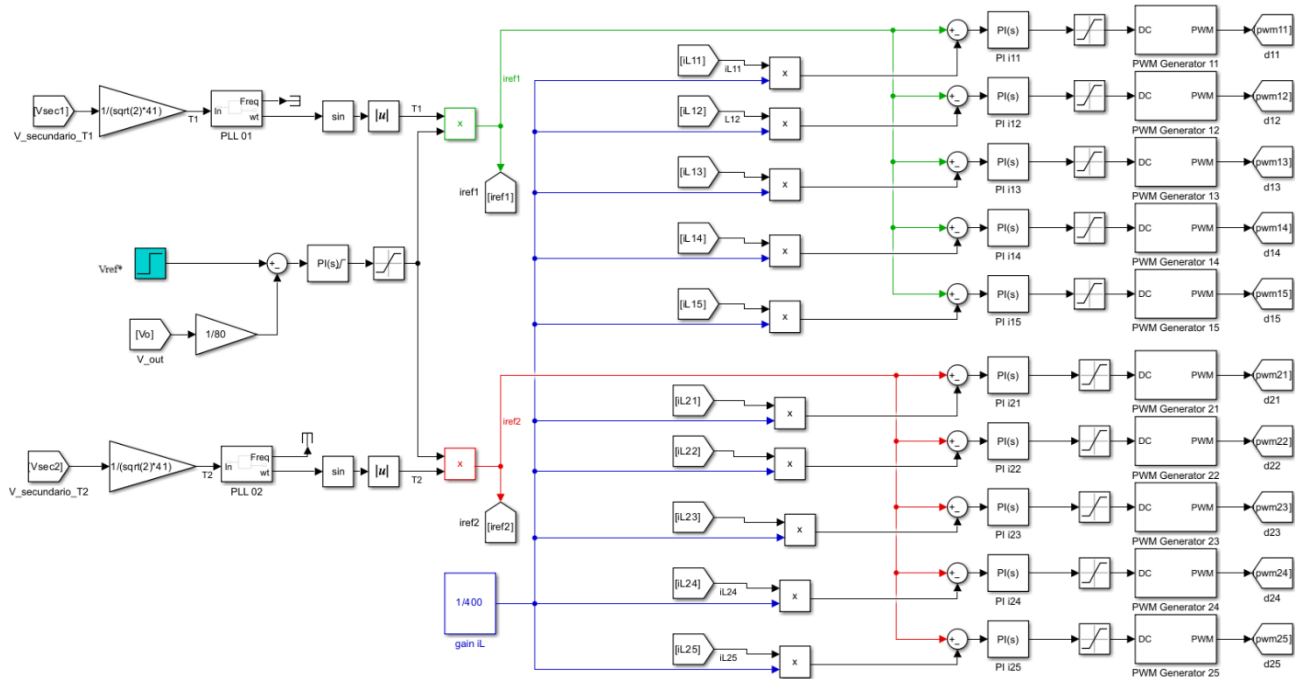


Figura 3.6: Esquema de control de la topología propuesta en Simulink.

4. Análisis de Resultados

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir de la simulación de la topología propuesta en MATLAB/Simulink. El análisis se organiza en distintos escenarios de operación, comenzando con la condición nominal y extendiéndose a casos de carga parcial, desbalance de fases e incremento de la inductancia de fuga en la conexión Scott-T. Para cada escenario se evalúan parámetros de desempeño para contrastar sus ventajas y limitaciones frente a los objetivos planteados.

4.2. Condiciones nominales

Para esta condición, la simulación se lleva a cabo considerando un voltaje de referencia de 80 [V] en la carga, valor que corresponde al límite máximo de tensión permitido en el electrolizador, según indica la Tabla 3.2. Adicionalmente, se emplea una red trifásica balanceada de 4.16 [kV] entre fases, con un desfase de 120° entre ellas.

4.2.1 Formas de onda en conexión Scott-T

Antes de analizar los resultados asociados al comportamiento de la etapa rectificadora, es necesario verificar previamente el desempeño de la conexión Scott-T operando en la topología propuesta bajo las condiciones denominadas nominales. En la Figura 4.1 se presentan las formas de onda de las tensiones de los secundarios de la conexión, donde la curva verde corresponde al Transformador 1 y la curva roja al Transformador 2. Se observa que, si bien las formas de onda no son completamente sinusoidales, el cruce por cero se produce con un desfase temporal entre ambas señales de 0.005 [s] aproximadamente, lo que equivale a 90° eléctricos para una frecuencia de 50 [Hz]. De lo anterior, se confirma que la conexión Scott-T entrega un sistema bifásico secundario simétrico, tal como lo establece su principio de funcionamiento revisado en la sección 2.6.

La distorsión en las formas de onda de la Figura 4.1 se debe principalmente a los convertidores elevadores con PFC que operan de manera entrelazada, los cuales generan variaciones rápidas de corriente por su conmutación a alta frecuencia, y a las impedancias internas de ambos transformadores de la conexión Scott-T, las cuales permiten que dichas variaciones se reflejen como pequeñas componentes de alta frecuencia superpuestas a la onda fundamental.

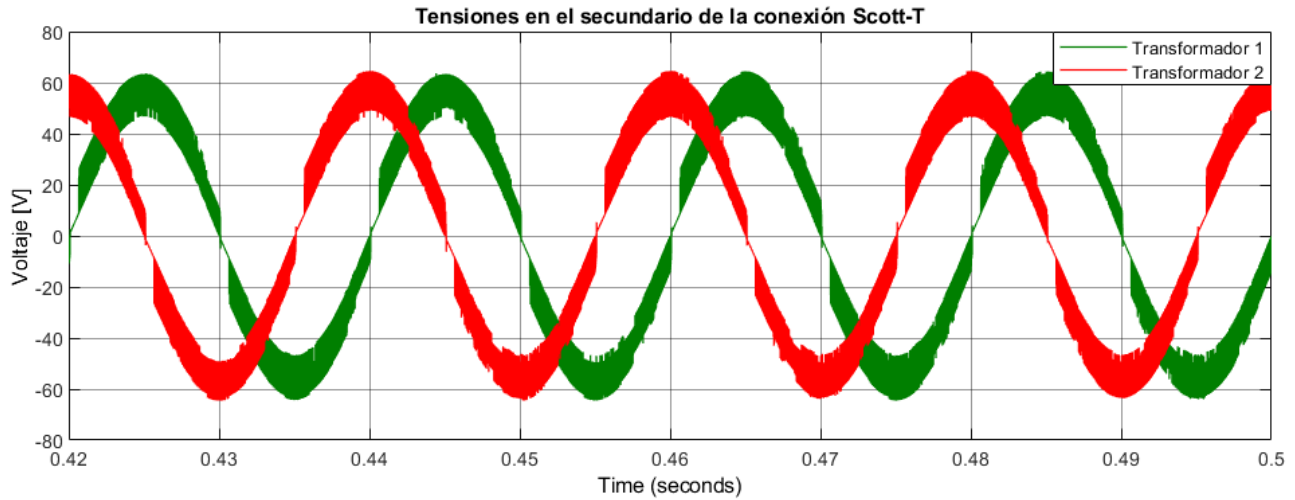


Figura 4.1: Señales de voltajes en los secundarios de la conexión Scott-T bajo condiciones nominales.
Transformador 1 en verde, y transformador 2 en rojo.

En la Figura 4.2 se presenta el espectro armónico de la señal de tensión en el secundario del transformador 1 de la conexión Scott-T, se observa la presencia de armónicos de orden impar y de baja magnitud con respecto a la componente fundamental, cuya contribución total se traduce en un THD del 13.42%. Por otro lado, para la tensión en el secundario del transformador 2, se obtiene un THD de 13.29%, cuyo espectro armónico se presenta en la Figura C.1 del Anexo C, presentando un comportamiento similar al del transformador 1.

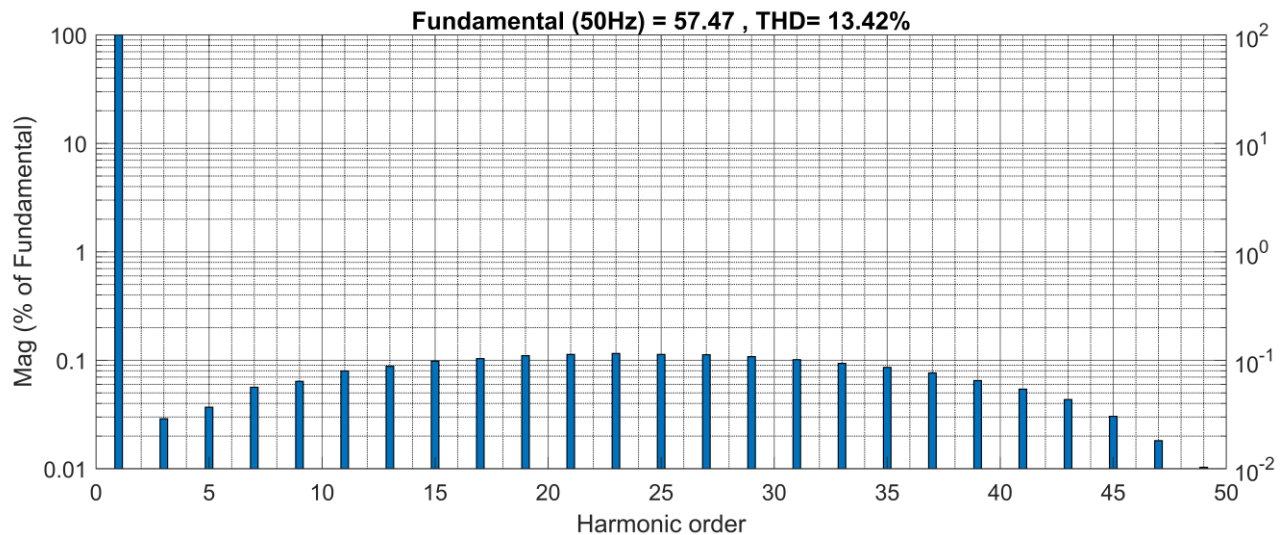


Figura 4.2: Espectro armónico de la señal de voltaje del secundario del transformador 1 de la conexión Scott-T bajo condiciones nominales.

4.2.2 Formas de onda en el electrolizador

Las formas de onda de tensión, corriente y potencia del electrolizador se encuentran respectivamente representadas en Figura 4.3, donde se desprende que, en estado estacionario, el electrolizador opera con una tensión promedio (V_o) de 80 [V], valor consistente con lo definido con la referencia. Por otro lado, la corriente (I_o) alcanza un valor promedio de 1571 [A], lo que se traduce en un valor de potencia promedio (P_o) aproximadamente de 125681 [W].

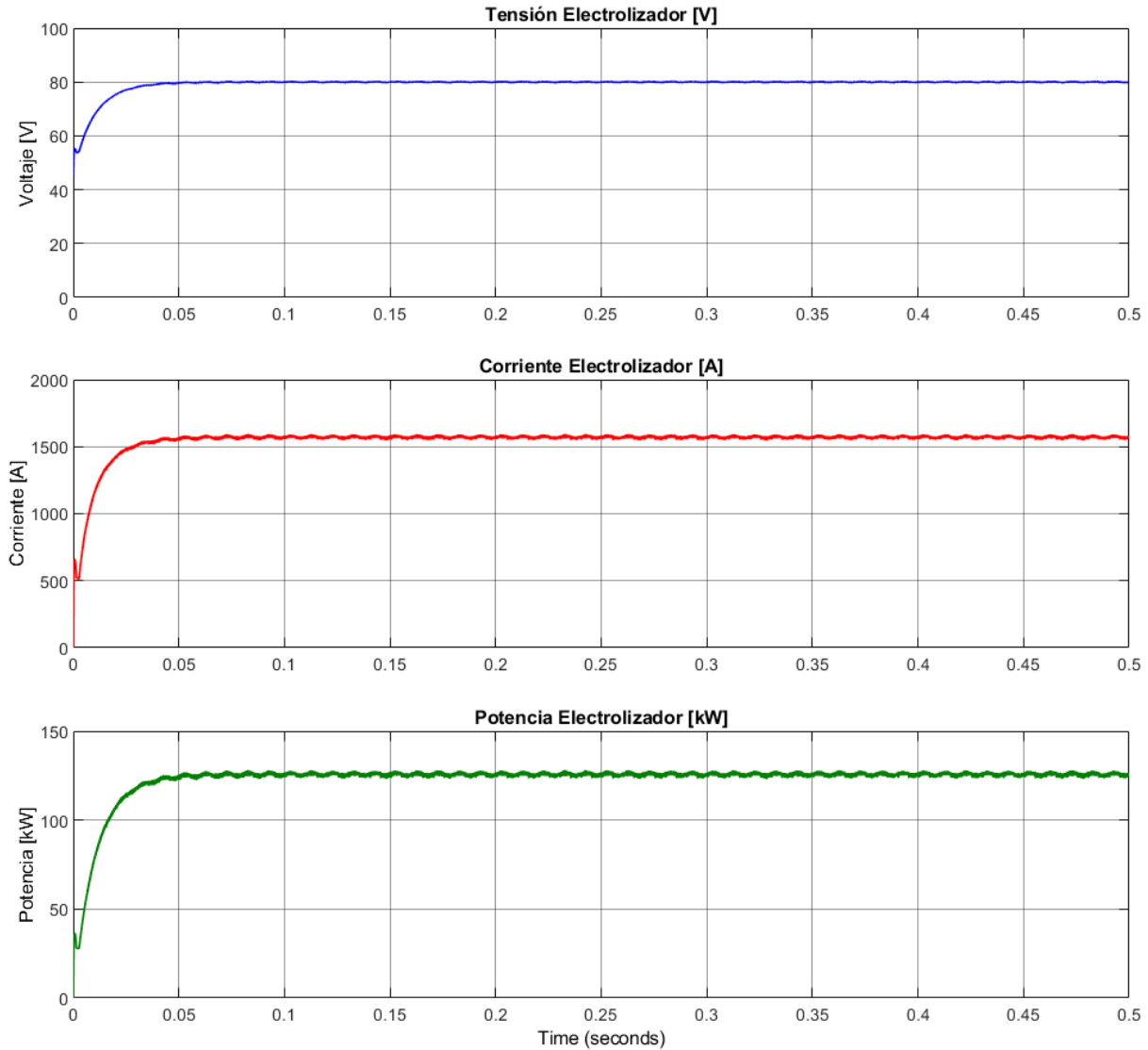


Figura 4.3: Voltaje, corriente y potencia en la carga para condición nominal.

Los parámetros de desempeño de la topología de rectificación propuesta se revisan a continuación.

4.2.3 Factor de potencia

Las formas de onda de voltajes y corrientes de cada fase de la red trifásica se muestran en la Figura 4.4. Se puede ver que el ángulo de desfase entre las señales rojas (corrientes) y las señales azules (voltajes) es cercano a cero, dicho de otro modo, las señales se encuentran prácticamente en fase, lo que indica un factor de potencia cercano al valor unitario.

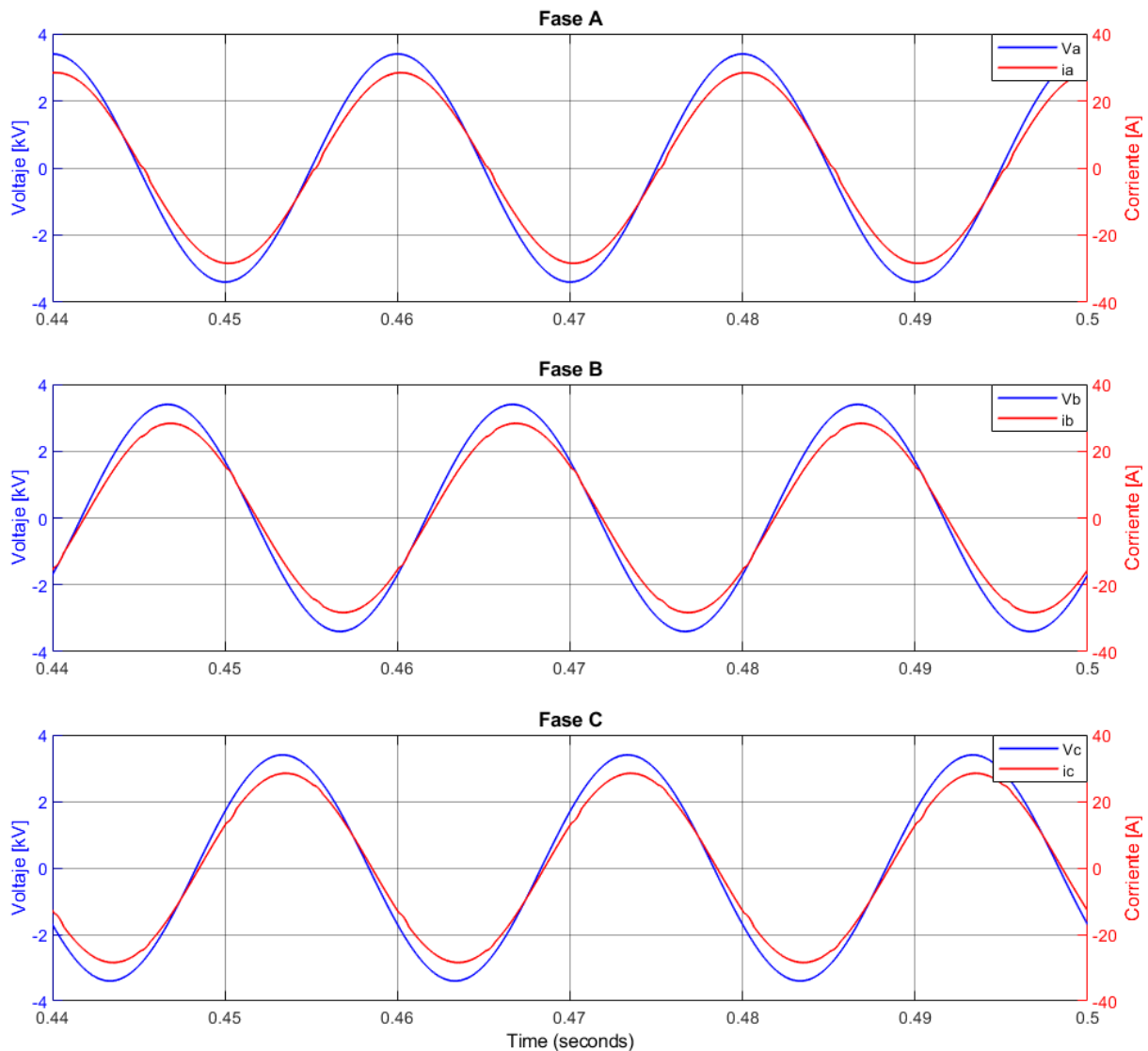


Figura 4.4: Voltajes y corrientes de fase bajo condición nominal.

Por otro lado, en la Figura 4.5 se presentan, en el lado izquierdo, la potencia activa y reactiva de la red trifásica, mientras que en el lado derecho se muestra la potencia aparente de la red trifásica. La gráfica refleja la magnitud de dichas potencias considerando únicamente la frecuencia fundamental (50 [Hz]), sin incluir los armónicos. No obstante, como se muestra más adelante, el THD de las corrientes de entrada es inferior al 1% en todos los casos de estudio, por lo que la gráfica resulta

plenamente representativa. Esta metodología se utiliza en todo el capítulo en lo que respecta a potencias desde la red trifásica.

También, de la Figura 4.5 se puede apreciar que la magnitud de la potencia activa es prácticamente la misma que la de la potencia aparente, lo que complementa lo de un valor de factor de potencia cercano a 1. En específico, se tiene que se alcanza un valor de potencia activa de 144294 [W], un valor de potencia reactiva de 8823 [VAr], y un valor de potencia aparente cercano a 144563 [VA], lo que se traduce en un factor de potencia de 0.9982.

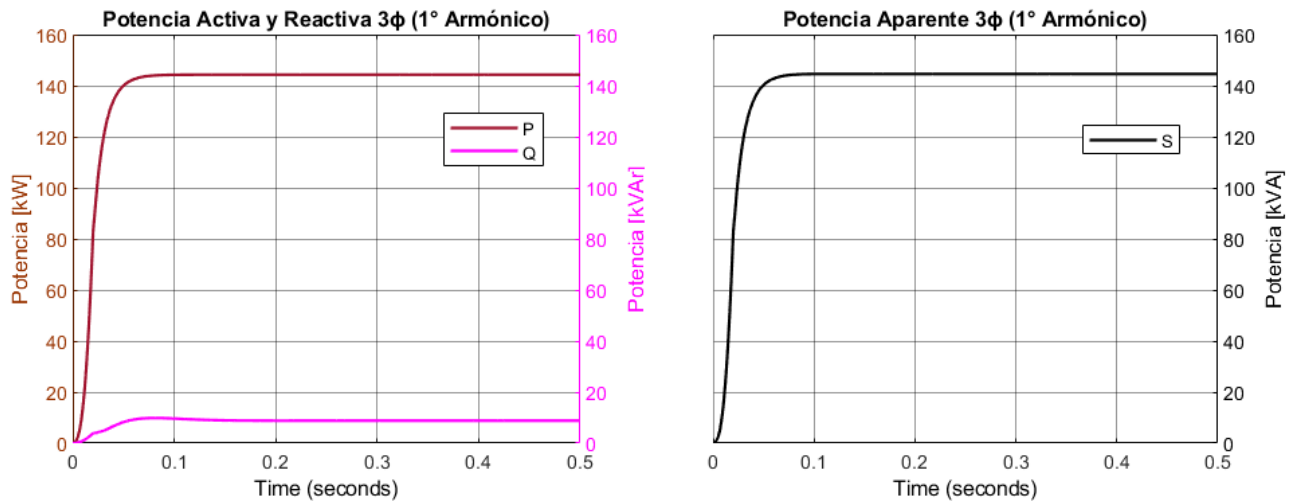


Figura 4.5: Potencia activa, reactiva y aparente trifásica para condición nominal.

4.2.4 Factor de rizo

En la Figura 4.6 se muestra un acercamiento a las formas de onda de voltaje y corriente en el electrolizador. Se desprende que el voltaje de rizo pico a pico ($V_{r(p-p)}$) corresponde aproximadamente a 0.6874 [V], como también que la corriente de rizo pico a pico ($I_{r(p-p)}$) corresponde a aproximadamente a 45.37 [A].

Los factores de rizo de tensión (FR_V) y corriente (FR_I) (calculados mediante el diagrama de bloques de la Figura A.1) son respectivamente 0.1404% y 0.4481%. Mientras que el cociente entre $V_{r(p-p)}$ y V_o es de 0.8593% ($r_V(\%)$), por otro lado, el cociente entre $I_{r(p-p)}$ y I_o es de 2.888% ($r_I(\%)$).

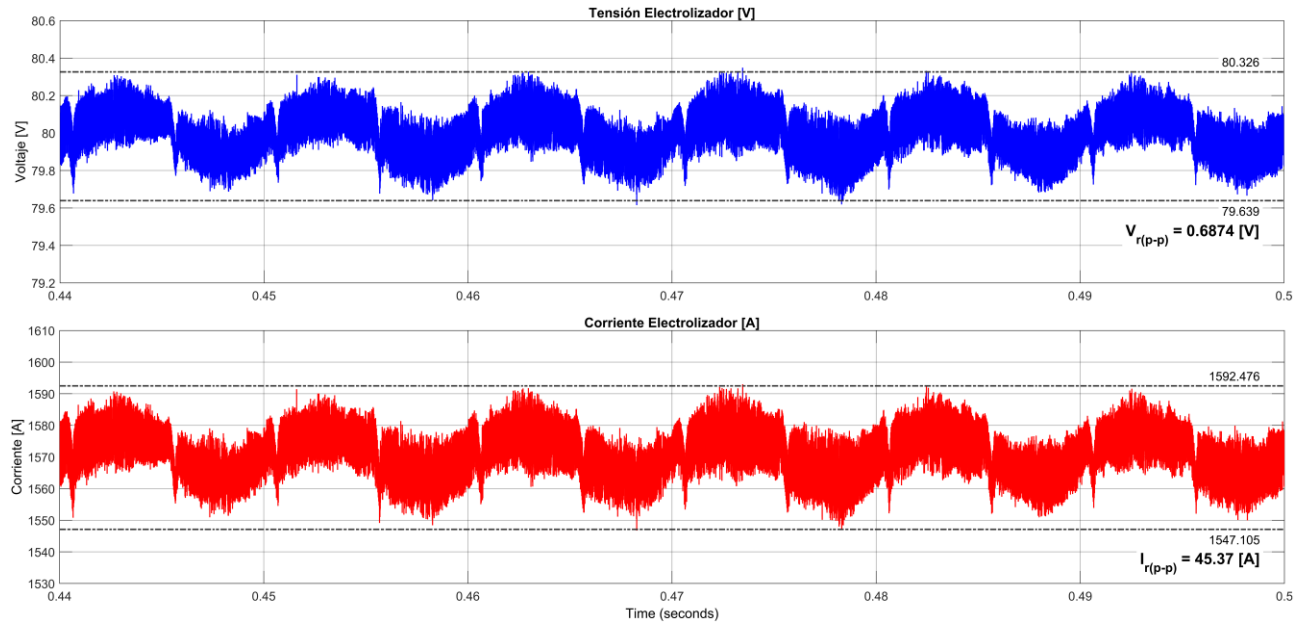


Figura 4.6: Acercamiento de las señales de voltaje y corriente en la carga bajo condición nominal.

4.2.5 THD

En la Figura 4.7 se muestran las corrientes de la red trifásica, las cuales se ven sinusoidales con una pequeña distorsión cercana a los momentos en que las tensiones secundarias de la conexión Scott-T cruzan por cero, lo que indica una buena calidad de energía del sistema desde el lado de la red eléctrica.

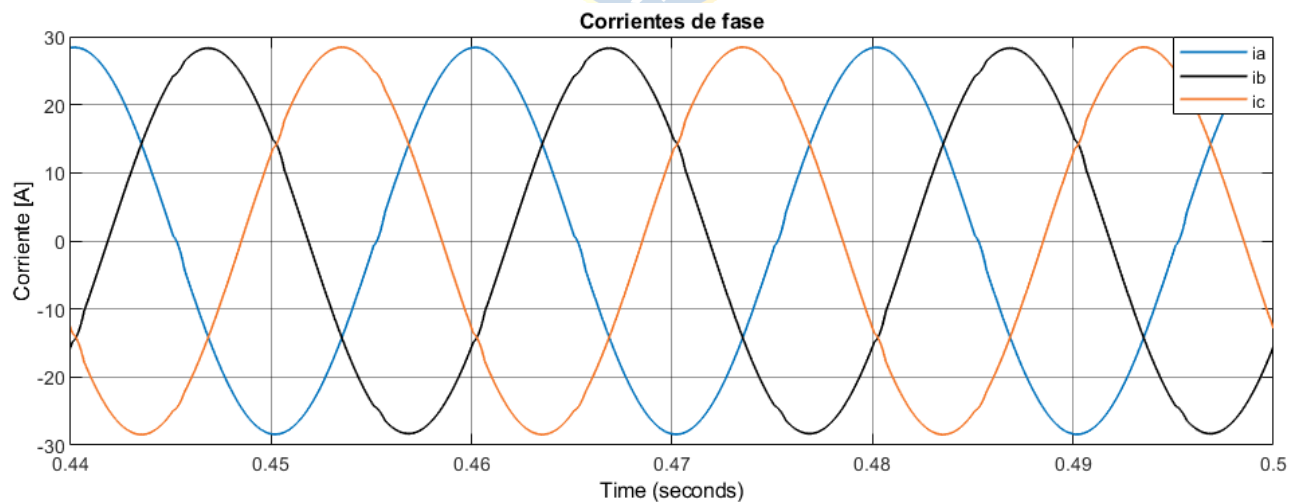


Figura 4.7: Corrientes de fase bajo condición nominal.

Más específicamente, en la Figura 4.8 se muestra el espectro armónico de la corriente de la fase A, el cual indica un THD de 0.71%. Un espectro armónico y porcentaje de THD similares se

tienen para las corrientes de las fases B y C, en particular, para la fase B se tiene un THD del 0.74%, mientras que en la fase C el THD alcanza un valor de 0.72%.

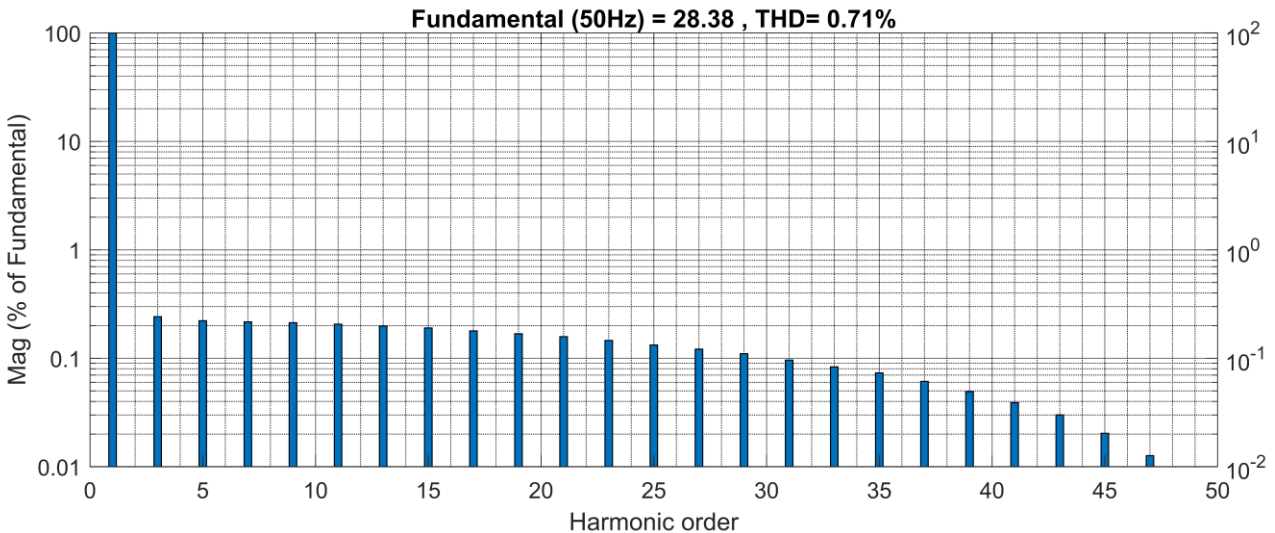


Figura 4.8: Espectro armónico de la corriente de la fase A.

4.2.6 Eficiencia

En la simulación se incorporan los principales factores de pérdida presentes en la topología propuesta, de modo que los resultados obtenidos representen con mayor precisión el comportamiento esperado del sistema, estos efectos son incluidos en los bloques del modelo, cuyos parámetros y configuraciones se describen en el Anexo B.

De esta manera, las pérdidas de la topología se concentran en los transformadores de la conexión Scott-T, debido a la resistencia de sus devanados y a las pérdidas magnéticas del núcleo. También se incluyen las caídas de conducción en los diodos de los puentes rectificadores, así como en los IGBTs y diodos de los convertidores elevadores, cuyos efectos de conducción y conmutación influyen directamente en la eficiencia

Bajo estas consideraciones, la potencia activa entregada por la red trifásica corresponde a 144294 [W], mientras que la potencia promedio presente en el electrolizador es de 125681 [W], por ende, la eficiencia del sistema es de 87.10%.

La Tabla 4.1 muestra un resumen de todos los parámetros mencionados anteriormente para para la simulación en condiciones nominales.

Tabla 4.1: Resumen de parámetros bajo condición nominal.

Parámetro	Valor	Unidad de medida
V_o	Voltaje promedio en electrolizador	80 [V]
I_o	Corriente promedio en electrolizador	1571 [A]
P_o	Potencia promedio en electrolizador	125681 [W]
$V_{r(p-p)}$	Voltaje de rizo pico a pico	0.6874 [V]
$I_{r(p-p)}$	Corriente de rizo pico a pico	45.37 [A]
$FR_V(\%)$	Factor de rizo de voltaje	0.1404 [%]
$FR_I(\%)$	Factor de rizo de corriente	0.4481 [%]
$r_V(\%)$	Factor de rizo de voltaje	0.8593 [%]
$r_I(\%)$	Factor de rizo de corriente	2.888 [%]
V_a	Voltaje fase A del lado de la red	2402 [V]
V_b	Voltaje fase B del lado de la red	2402 [V]
V_c	Voltaje fase C del lado de la red	2402 [V]
I_a	Corriente fase A del lado de la red	20.07 [A]
I_b	Corriente fase B del lado de la red	20.02 [A]
I_c	Corriente fase C del lado de la red	20.11 [A]
$P_{3\phi}$	Potencia activa trifásica	144294 [W]
$Q_{3\phi}$	Potencia reactiva trifásica	8823 [VAr]
$S_{3\phi}$	Patencia aparente trifásica	144563 [VA]
FP	Factor de potencia	0.9981 -
THD_{I_a}	THD de corriente fase A	0.71 [%]
THD_{I_b}	THD de corriente fase B	0.74 [%]
THD_{I_c}	THD de corriente fase C	0.72 [%]
THD_{T1v}	THD tensión secundario transformador 1	13.42 [%]
THD_{T2v}	THD tensión secundario transformador 2	13.29 [%]
η	Eficiencia	87.10 [%]

4.3. Condiciones de carga parcial

Para esta condición, se realiza la misma simulación que la vista en la sección 4.2, con la diferencia que se varia la carga al 75%, 50% y 25% de lo que era la carga nominal, lo que se realiza variando la tensión de referencia de la carga.

4.3.1 Formas de onda en el electrolizador

En la Figura 4.9 se muestran las formas de onda de voltaje, corriente y potencia del electrolizador a medida que la carga disminuye progresivamente: primero, pasa del 100% al 75% en el instante de 0.25 [s]; luego, desciende al 50% en 0.5 [s]; y finalmente alcanza el 25% en 0.75 [s].

Cuando la carga se reduce al 75%, el sistema alcanza un nuevo régimen de estado estacionario en el cual se registran valores promedio de 73.5 [V] para el voltaje y 1284 [A] para la corriente. Como resultado, la potencia media suministrada al electrolizador se estabiliza en 94341 [W].

Al disminuir la carga al 50%, los valores promedios obtenidos son 66 [V] de voltaje, 951.8 [A] de corriente y 62821 [W] de potencia.

Finalmente, cuando la carga se reduce al 25%, se establece como referencia un voltaje de operación de 57 [V], el cual corresponde al límite inferior admitido por el electrolizador, según se indica en la Tabla 3.2. Bajo estas condiciones, los valores promedios alcanzados son 57 [V] de voltaje, 553.7 [A] de corriente y una potencia de 31563 [W].

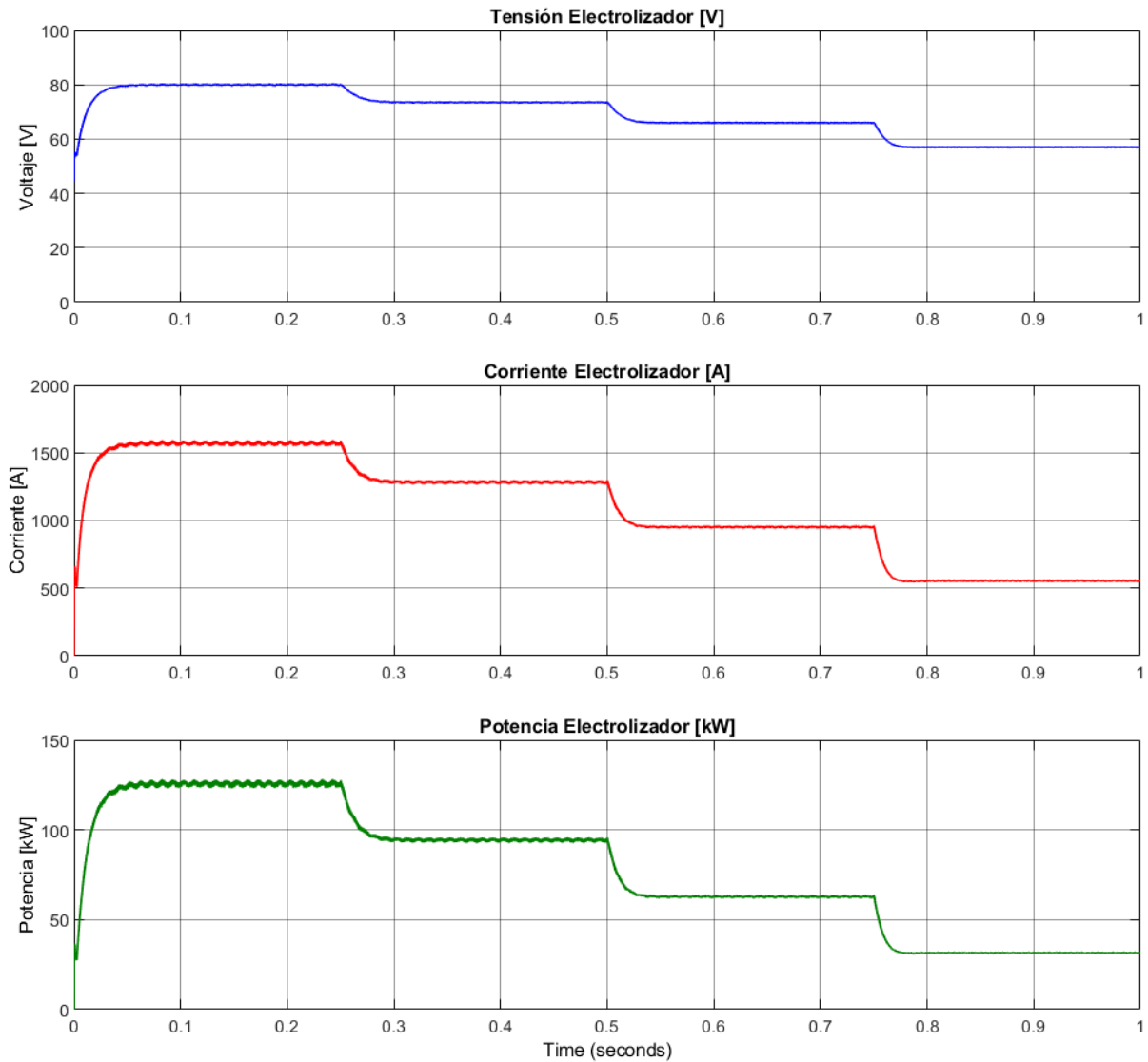


Figura 4.9: Voltaje, corriente y potencia en la carga para variación al 75%, 50% y 25%.

Por otro lado, el comportamiento en las formas de onda evidencia que el control propuesto regula eficazmente la tensión del electrolizador ante variaciones en la referencia de tensión en la carga, manteniendo una respuesta estable. La corriente se ajusta de forma proporcional a los cambios de tensión, mientras que el rizo presente en ambas variables disminuye progresivamente a medida que la

referencia se reduce. En consecuencia, la potencia entregada presenta transiciones suaves y proporcionales a los distintos niveles de operación, manteniendo un comportamiento estable y bien regulado.

Los parámetros de desempeño de la topología bajo el escenario de reducción de carga se revisan a continuación.

4.3.2 Factor de potencia

En la Figura 4.10 se muestra cómo se comporta la magnitud de la potencia activa, reactiva y aparente de la red trifásica al variar la carga al 75%, 50% y 25% de la nominal. Se desprende que las magnitudes de potencia activa y aparente ante los cambios en la carga se mantienen similares entre sí, lo que se traduce en un buen factor de potencia. En específico, para el caso de reducción al 75% de la carga nominal, la potencia activa toma un valor de 106462 [W], mientras que la potencia aparente toma un valor de 106652 [VA], lo que se traduce en un factor de potencia de 0.9982.

Por otro lado, para el caso de la reducción al 50% de la carga nominal, la potencia activa y reactiva de la red son 70472 [W] y 70634 [VA] respectivamente, lo que conlleva en un factor de potencia de 0.9977.

Finalmente, los valores de potencia activa y aparente al reducir la carga al 50% de la nominal son 36496 [W] y 36704 [VA], llegando a tener un factor de potencia de 0.9943.

Los resultados anteriormente mostrados, indican que la topología se comporta de manera adecuada ante perturbaciones en la carga en lo que respecta a factor de potencia.

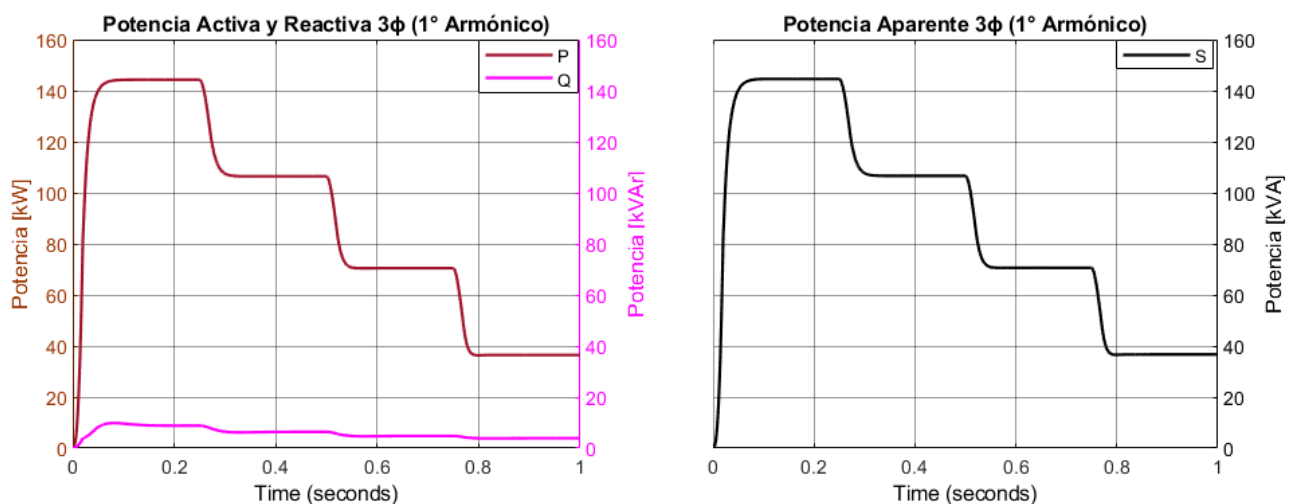


Figura 4.10: Potencia activa, reactiva y aparente de la red para variación de carga al 75%, 50% y 25%.

Además, en la Figura 4.11 se muestra las formas de onda de voltajes y corrientes por fase de la red para la disminución de carga al 25%, en donde las curvas rojas representan las corrientes y las azules los voltajes. Se desprende que las señales se encuentran desfasadas por un ángulo muy pequeño, lo que confirma lo visto anteriormente de un valor de factor de potencia alto. Las formas de onda de voltajes y corrientes de fase para la reducción al 75% y 50% de la carga nominal se encuentran respectivamente en la Figura C.2 y la Figura C.3 presentes en el Anexo C, las cuales presentan un comportamiento similar.

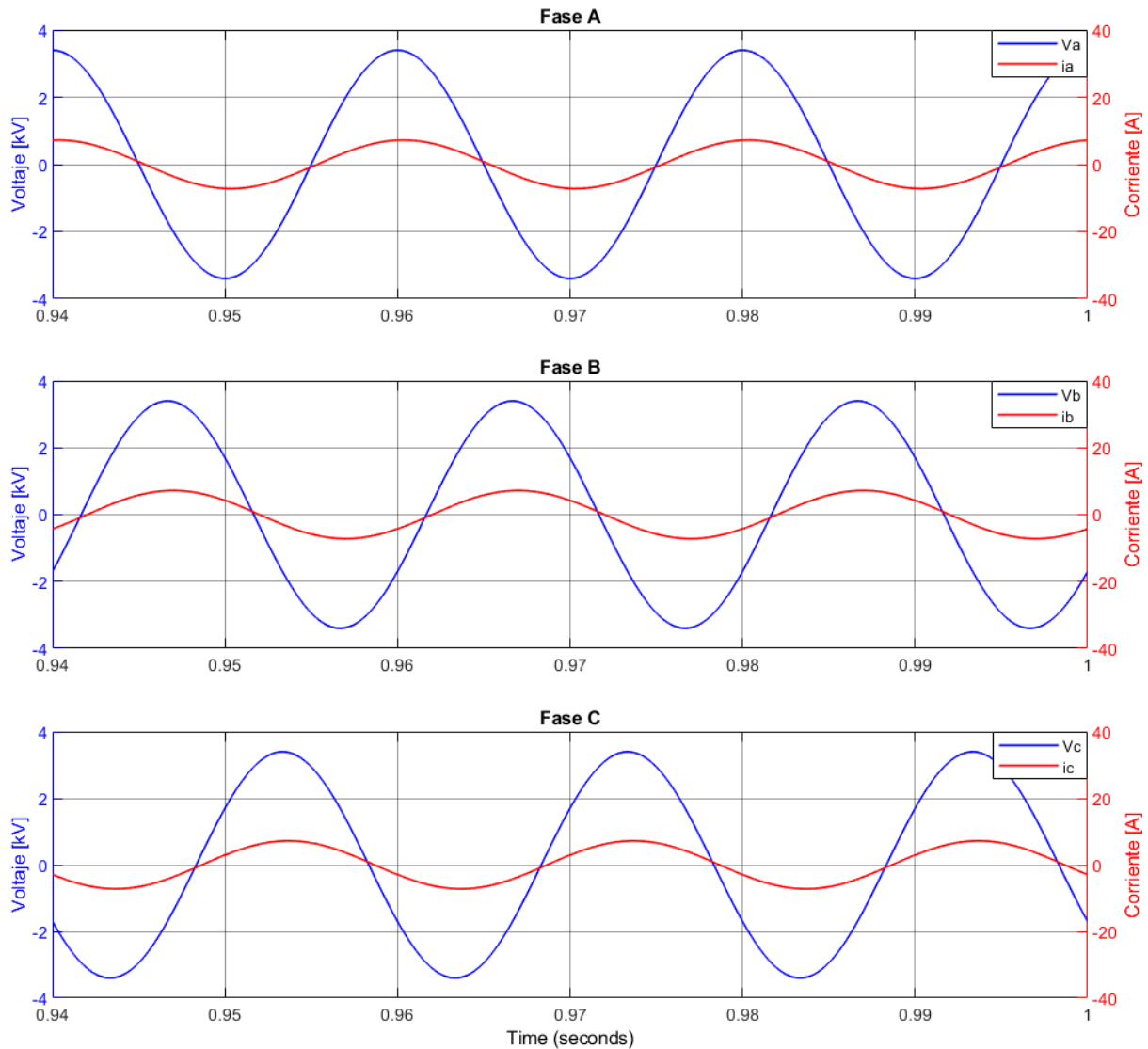


Figura 4.11: Voltajes y corrientes de fase para una reducción al 25% de la carga nominal.

4.3.3 Factor de rizo

En la Figura 4.12 se muestra un acercamiento de las formas de onda de voltaje y corriente presente en el electrolizador cuando la carga se ve reducida al 25% de la nominal, de ella se desprende

que, bajo esta condición, el voltaje de rizo pico a pico es de 0.1503 [V], mientras que la corriente de rizo pico a pico corresponde aproximadamente a 9.704 [A]. Estos valores corresponden a factores de rizo en voltaje ($r_V(\%)$) de 0.2637% y de 1.753% en corriente ($r_I(\%)$), los cuales representan una disminución cercana al 69% y 39%, respectivamente, con respecto al caso nominal. De esta forma, se observa que, al operar con menor carga, las ondulaciones en las señales de voltaje y corriente se reducen.

En la Figura C.4 y en la Figura C.5 presentes en el Anexo C se muestra un acercamiento de las formas de onda de voltaje y corriente para una reducción en la carga al 75% y 50% respectivamente. Los factores de rizo correspondientes para cada caso se detallan en la Tabla 4.2.

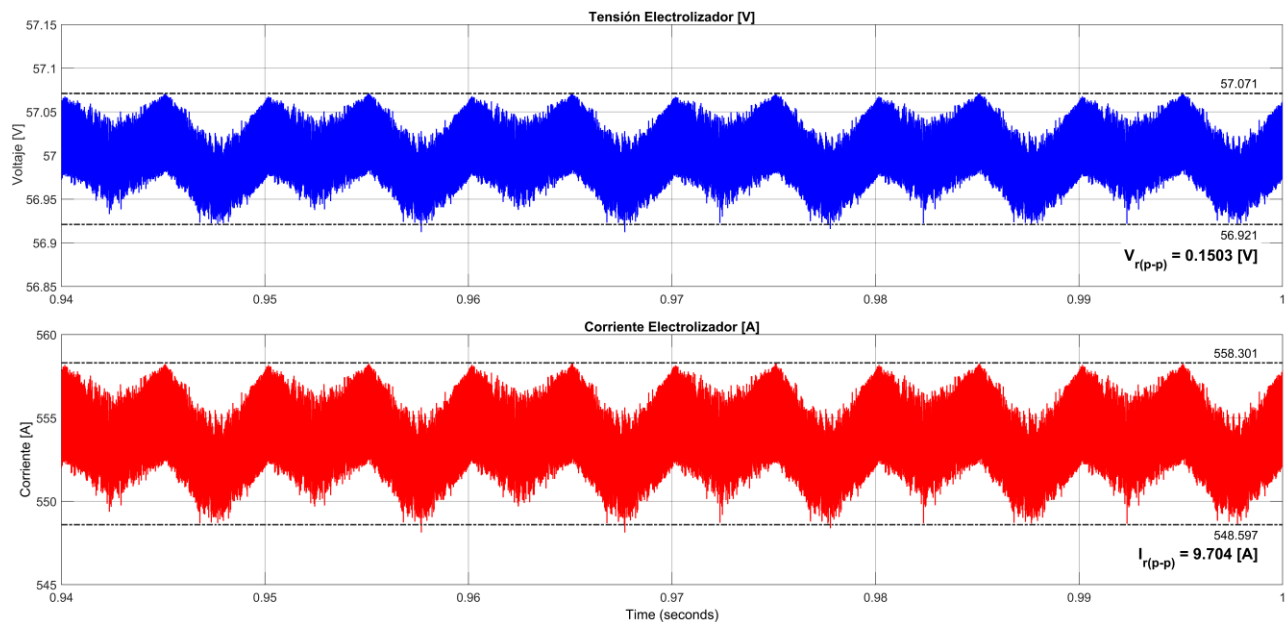


Figura 4.12: Acercamiento de las señales de voltaje (azul) y corriente (rojo) en el electrolizador al reducir la carga al 25% de la nominal.

4.3.4 THD

Las corrientes de fase de entrada al sistema cuando la carga se reduca al 25% de la nominal se muestran en la Figura 4.13. Se observa que presentan una forma de onda sinusoidal, lo que indica una buena calidad de energía. En particular, el THD de las corrientes es de 0.39%, 0.40% y 0.39% para las fases A, B y C, respectivamente.

Las corrientes de fase para el caso de reducción de carga al 75% y al 50% se encuentran respectivamente en la Figura C.6 y la Figura C.7 del Anexo C, por otro lado, los valores de THD asociados a las corrientes se encuentran detallados en la Tabla 4.2.

Por otra parte, el contenido armónico de las tensiones en los secundarios de la conexión Scott-T presenta una tendencia decreciente conforme disminuye la carga. Al 75% de carga nominal, los valores de THD_{T1v} y THD_{T2v} alcanzan 13.20% y 13.50%, reduciéndose a 12.94% y 13.68% al 50%, y llegando finalmente a 10.32% y 10.37% cuando el sistema opera al 25%. Al comparar esta última condición con el caso nominal, se obtiene una reducción promedio cercana al 23% en el contenido armónico total, lo que evidencia una mejora en la calidad de la tensión entregada por los secundarios de la conexión Scott-T bajo regímenes de menor carga.

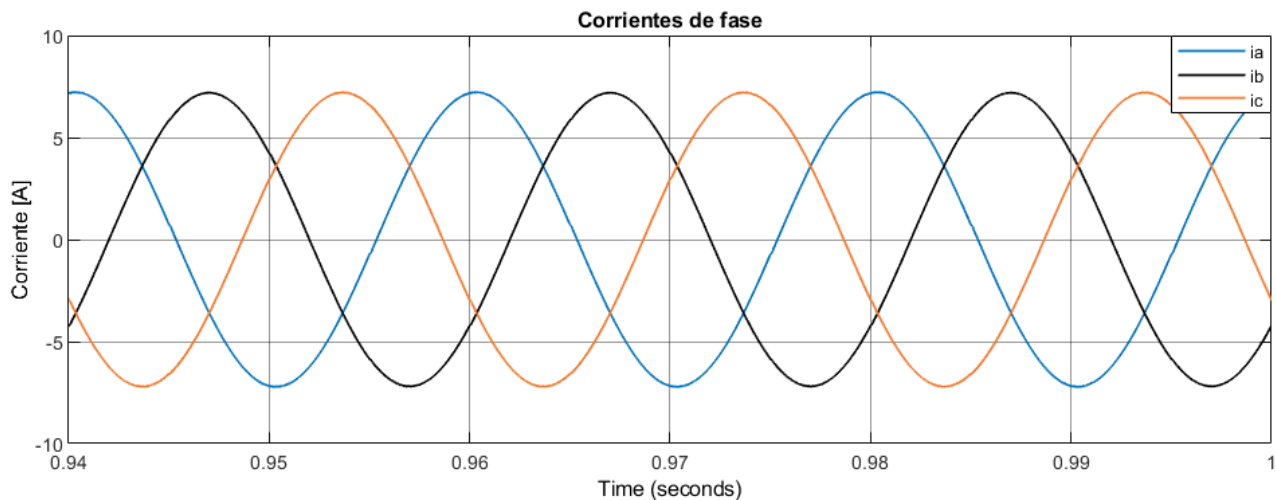


Figura 4.13: Corrientes de fase al reducir la carga al 25% de la nominal.

4.3.5 Eficiencia

Para el estudio de la eficiencia de la topología bajo condiciones de variación en la carga, se conservan los mismos criterios de pérdida establecidos en la sección 4.2.6, asegurando la consistencia del modelo respecto al caso nominal.

En la Figura 4.14 se presenta la variación de la eficiencia del sistema en función de la carga.

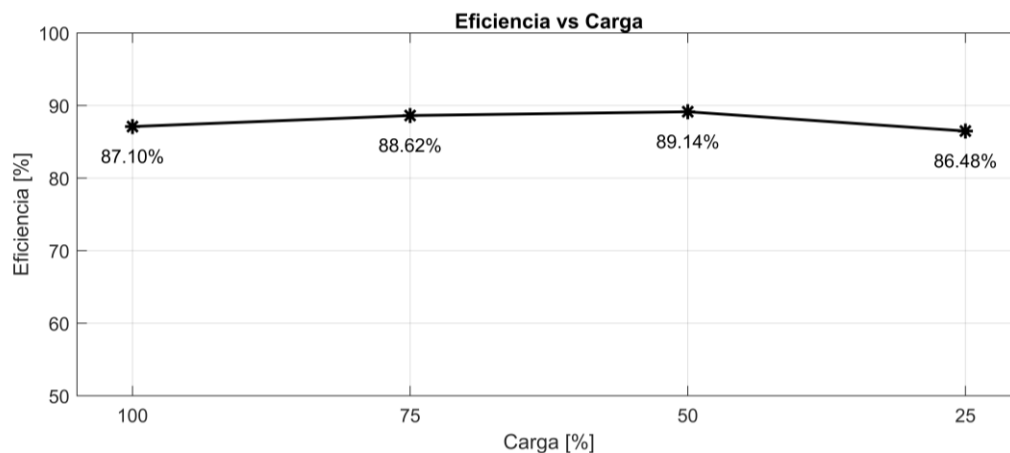


Figura 4.14: Variación de la eficiencia con respecto a la carga.

De la Figura 4.14 se desprende que bajo condiciones nominales, correspondiente al 100% de carga, la eficiencia alcanza un valor de 87.10%, aumentando levemente a 88.62% y 89.14% cuando la carga se reduce al 75% y 50%, respectivamente.

Finalmente, al operar al 25% de carga, la eficiencia disminuye hasta 86.48%, producto de que las pérdidas fijas asociadas a los dispositivos de conmutación y transformadores adquieren mayor predominio a bajas potencias. En general, se observa un desempeño estable y eficiente en todo el rango de operación, con una variación acotada y valores de eficiencia superiores al 86% en todas las condiciones evaluadas.

En la Tabla 4.2 se presenta un resumen de los parámetros analizados para cuando se varía la carga del sistema.

Tabla 4.2: Resumen de parámetros bajo variación de carga.

Parámetro		Valor			Unidad de medida
		75%	50%	25%	
V_o	Voltaje promedio en electrolizador	73.5	66	57	[V]
I_o	Corriente promedio en electrolizador	1284	951.8	553.7	[A]
P_o	Potencia promedio en electrolizador	94341	62821	31563	[W]
$V_{r(p-p)}$	Voltaje de rizo pico a pico	0.4914	0.3375	0.1503	[V]
$I_{r(p-p)}$	Corriente de rizo pico a pico	31.11	21.93	9.704	[A]
$FR_V(\%)$	Factor de rizo de voltaje	0.1126	0.0776	0.0502	[%]
$FR_I(\%)$	Factor de rizo de corriente	0.4085	0.3429	0.3311	[%]
$r_V(\%)$	Factor de rizo de voltaje	0.6686	0.5114	0.2637	[%]
$r_I(\%)$	Factor de rizo de corriente	2.423	2.304	1.753	[%]
V_a	Voltaje fase A del lado de la red	2402	2402	2402	[V]
V_b	Voltaje fase B del lado de la red	2402	2402	2402	[V]
V_c	Voltaje fase C del lado de la red	2402	2402	2402	[V]
I_a	Corriente fase A del lado de la red	14.80	9.804	5.094	[A]
I_b	Corriente fase B del lado de la red	14.78	9.791	5.091	[A]
I_c	Corriente fase C del lado de la red	14.83	9.813	5.097	[A]
$P_{3\phi}$	Potencia activa trifásica	106462	70472	36496	[W]
$Q_{3\phi}$	Potencia reactiva trifásica	6374	4779	3897	[VAr]
$S_{3\phi}$	Patencia aparente trifásica	106652	70634	36704	[VA]
FP	Factor de potencia	0.9982	0.9977	0.9943	-
THD_{I_a}	THD de corriente fase A	0.47	0.31	0.39	[%]
THD_{I_b}	THD de corriente fase B	0.49	0.32	0.40	[%]
THD_{I_c}	THD de corriente fase C	0.47	0.31	0.39	[%]
THD_{T1v}	THD tensión secundario transformador 1	13.20	12.94	10.32	[%]
THD_{T2v}	THD tensión secundario transformador 2	13.50	13.68	10.37	[%]
η	Eficiencia	88.62	89.14	86.48	[%]

4.4. Condiciones de desbalance de fases

En este caso se analiza el comportamiento de la topología propuesta cuando las tensiones de entrada presentan un desbalance únicamente en magnitud, manteniéndose el desfase de 120° entre fases. En particular, la fase A reduce su amplitud hasta el 90% de su valor nominal, la fase B se incrementa al 110%, y la fase C conserva su nivel en el 100%.

4.4.1 Formas de onda en el electrolizador

En la Figura 4.15 se presenta las formas de onda de voltaje, corriente y potencia en el electrolizador, en donde se observa un rizo más acentuado en la forma de onda de voltaje con respecto a los casos previamente analizados, lo que provoca un incremento del rizo en la corriente.

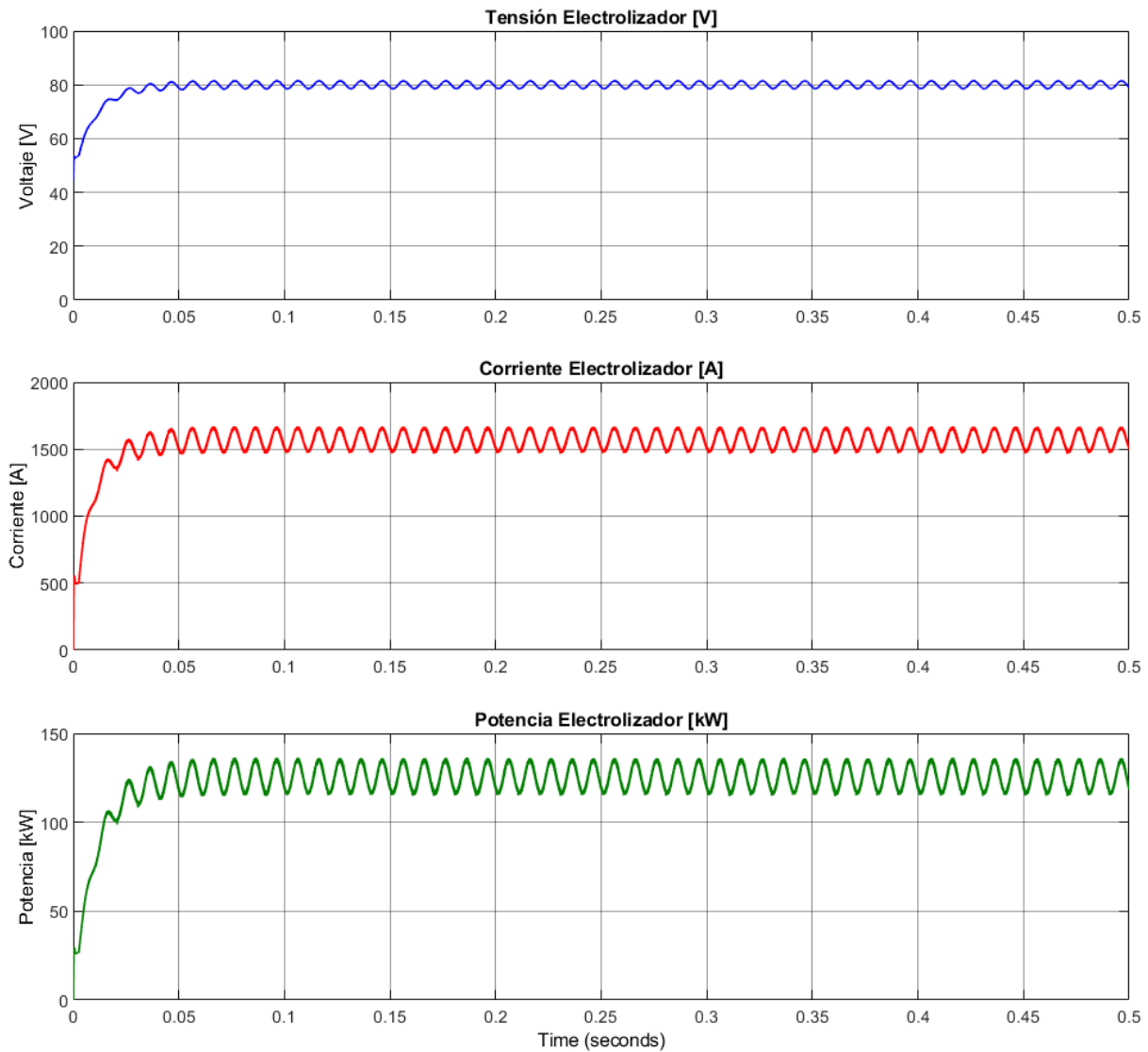


Figura 4.15: Voltaje, corriente y potencia en la carga para condiciones de desbalance de fases.

No obstante, la topología mantiene un adecuado seguimiento del voltaje de referencia, alcanzando un valor promedio de 80 [V]. De manera correspondiente, la corriente registra un promedio de 1571 [A], lo que se traduce en una potencia media del orden de 125748 [W].

Los parámetros de desempeño de la topología bajo el escenario de desbalance de fases se revisan a continuación.

4.4.2 Factor de potencia

En la Figura 4.16 se presenta las formas de onda de voltaje y corriente en cada fase a la entrada del sistema. Se observa que, en las tres fases, ambas señales se encuentran prácticamente en fase, lo que indica un factor de potencia cercano a la unidad. Asimismo, se aprecia el desbalance en la magnitud de los voltajes, siendo más evidente en la fase B.

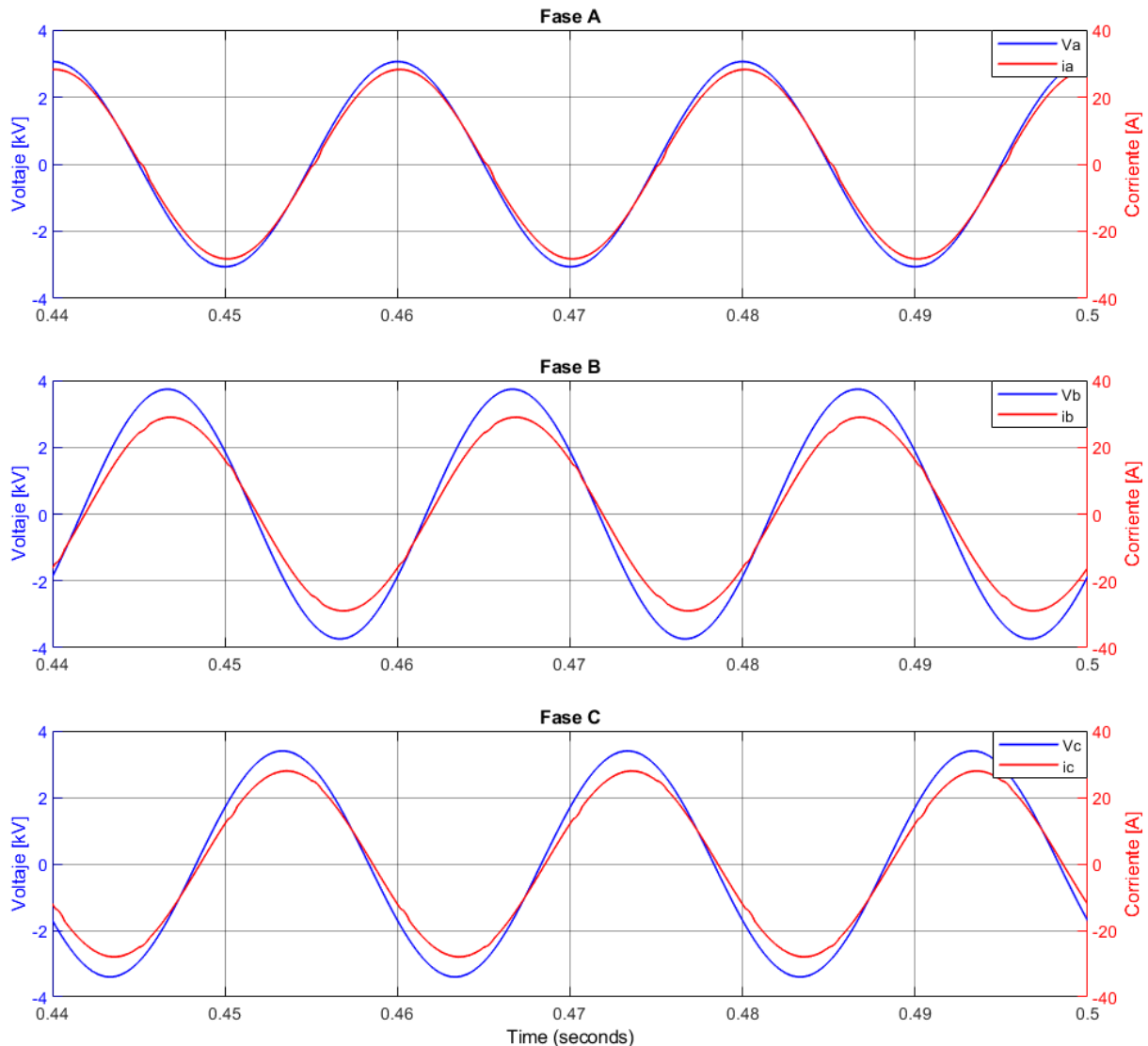


Figura 4.16: Voltajes (azul) y corrientes (rojo) de fase de la red para condiciones de desbalance de fases.

Por otro lado, las magnitudes de la potencia activa, reactiva y aparente se ven representadas, en la Figura 4.17. Se observa que la potencia activa y la potencia aparente presentan valores muy similares, lo que confirma la existencia de un factor de potencia cercano a la unidad. En particular, la potencia activa alcanza un valor de 144246 [W], mientras que la potencia aparente se encuentra alrededor de 144504 [VA], lo que corresponde a un factor de potencia de 0.9982.

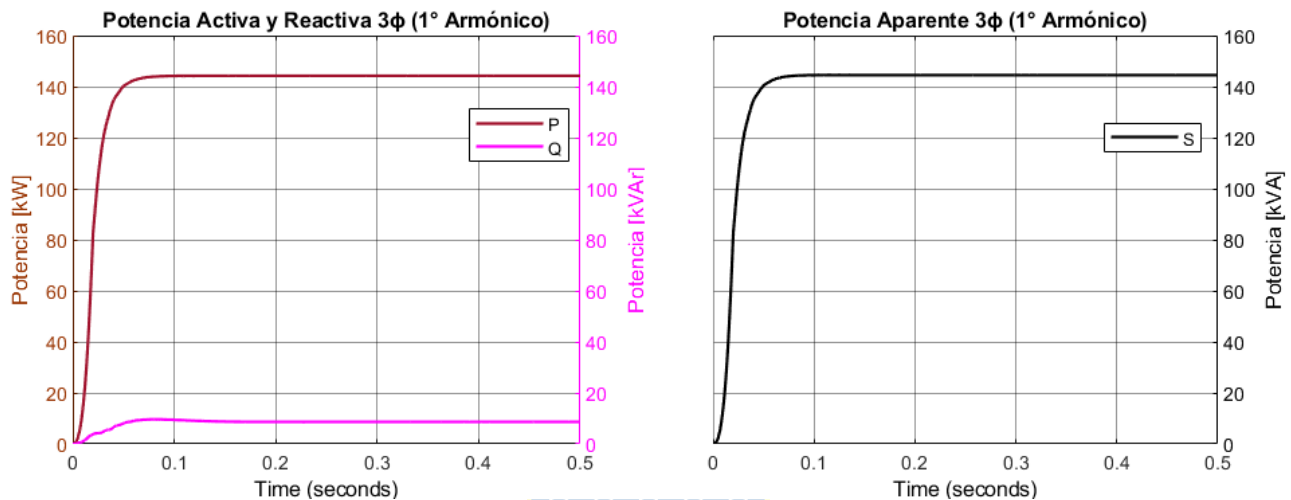


Figura 4.17: Potencia activa, reactiva y aparente de la red bajo condiciones de desbalance de fases.

4.4.3 Factor de rizo

Un acercamiento de las formas de onda de voltaje y corriente se presenta en la Figura 4.18, donde se desprende que el voltaje de rizo pico a pico corresponde aproximadamente a 3.216 [V]. Por su parte la corriente de rizo pico a pico corresponde aproximadamente a 200.1 [A], valores notablemente superiores a los obtenidos en el caso nominal.

A partir de estos resultados se obtienen factores de rizo de voltaje ($r_V(\%)$) y corriente ($r_I(\%)$) de 4.020% y 12.74%, respectivamente, los cuales en comparación con los valores nominales de 0.8593% y 2.888% representan un incremento aproximado del 368% en voltaje y del 341% en corriente. Dicho aumento evidencia el impacto del desbalance entre fases en las formas de onda eléctricas del electrolizador.

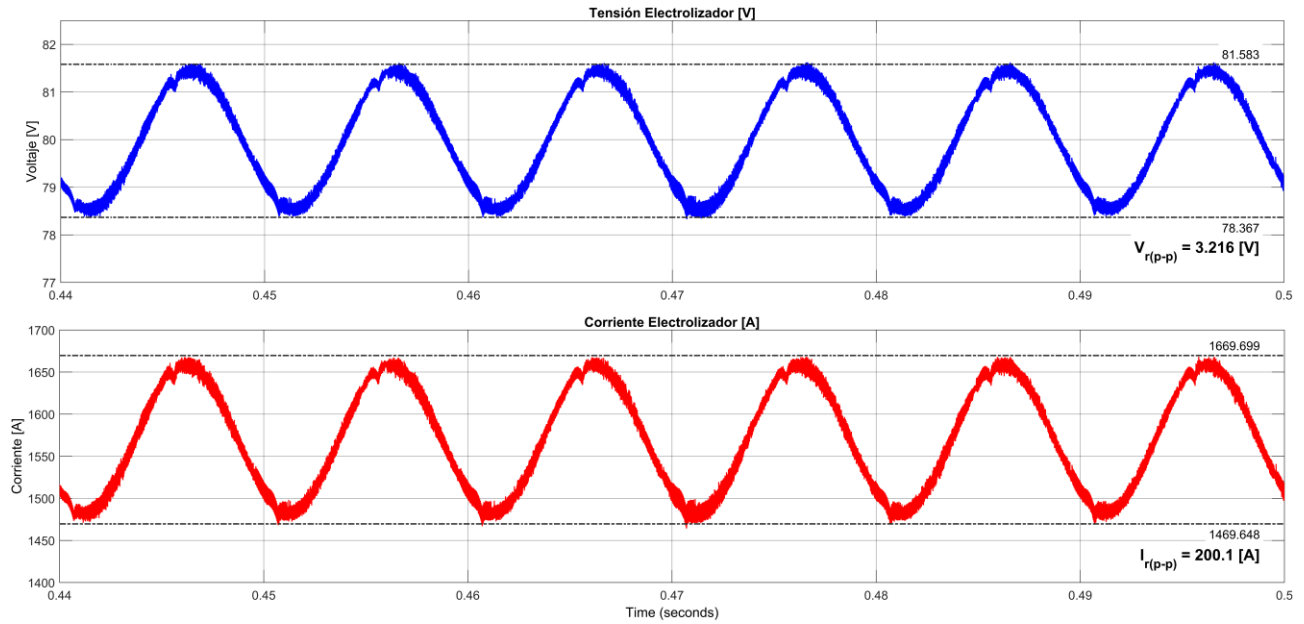


Figura 4.18: Acercamiento de las señales de voltaje (azul) y corriente (rojo) en condiciones de desbalance de fases.

4.4.4 THD

Las corrientes de fase de entrada al sistema se muestran en la Figura 4.19. En general, presentan una forma sinusoidal, con la excepción de pequeñas distorsiones en los instantes en que los voltajes de los secundarios de la conexión Scott-T cruzan por cero, comportamiento que ya se había observado en la sección 4.2.5. Asimismo, se aprecia que la magnitud de la corriente en la fase B es la más elevada, aunque la diferencia respecto a las demás fases no resulta significativa en comparación con las variaciones de voltaje.

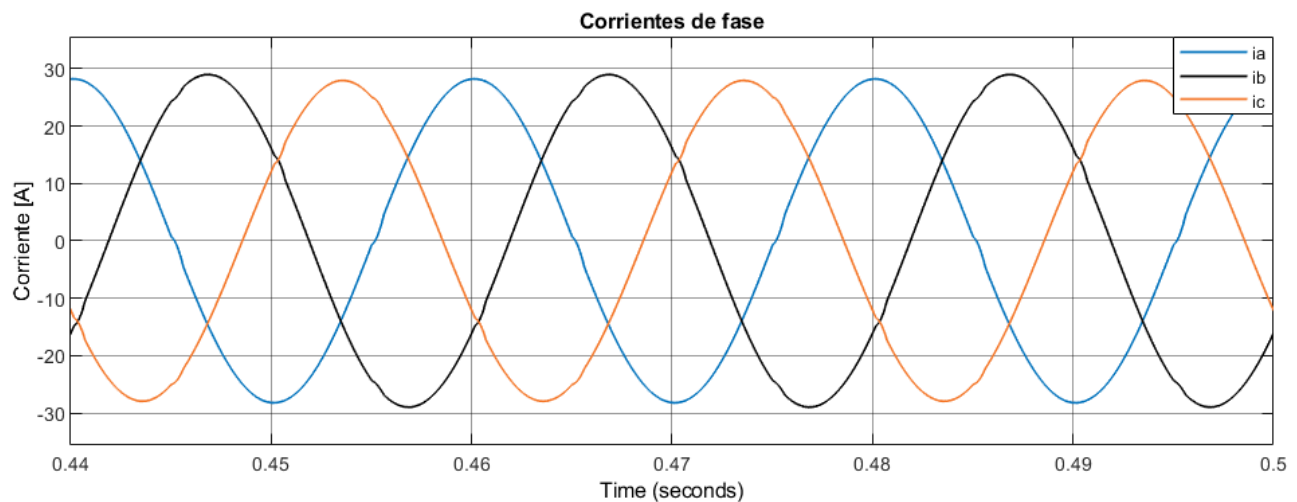


Figura 4.19: Corrientes de fase de la red bajo condiciones de desbalance de fases.

Este comportamiento refleja una adecuada calidad de energía, donde el valor más alto de THD corresponde a la corriente de la fase C, con un 0.86%. Los valores de THD en corrientes para las fases A y B son 0.74% y 0.78%, respectivamente, los cuales no se encuentran muy alejados a los vistos bajo condiciones nominales.

A su vez, el contenido armónico de las tensiones en los secundarios de la conexión Scott-T no presenta mayores variaciones con respecto al caso nominal, pasando de un 13.42% a un 12.30% para el transformador 1 y de un 13.29% a un 14.52% para el transformador 2

4.4.5 Eficiencia

Para el estudio de la eficiencia de la topología bajo condiciones de desbalance de fases, se conservan los mismos criterios de pérdida establecidos en la sección 4.2.6, alcanzando un valor similar al observado bajo condiciones nominales, específicamente un 87.18%.

En la Tabla 4.3 se resumen los parámetros analizados para el caso de desbalance de fases.

Tabla 4.3: Resumen de parámetros bajo condiciones de desbalance de fases.

	Parámetro	Valor	Unidad de medida
V_o	Voltaje promedio en electrolizador	80	[V]
I_o	Corriente promedio en electrolizador	1571	[A]
P_o	Potencia promedio en electrolizador	125748	[W]
$V_{r(p-p)}$	Voltaje de rizo pico a pico	3.216	[V]
$I_{r(p-p)}$	Corriente de rizo pico a pico	200.1	[A]
$FR_V(\%)$	Factor de rizo de voltaje	1.285	[%]
$FR_I(\%)$	Factor de rizo de corriente	3.958	[%]
$r_V(\%)$	Factor de rizo de voltaje	4.020	[%]
$r_I(\%)$	Factor de rizo de corriente	12.74	[%]
V_a	Voltaje fase A del lado de la red	2162	[V]
V_b	Voltaje fase B del lado de la red	2642	[V]
V_c	Voltaje fase C del lado de la red	2402	[V]
I_a	Corriente fase A del lado de la red	19.99	[A]
I_b	Corriente fase B del lado de la red	20.50	[A]
I_c	Corriente fase C del lado de la red	19.69	[A]
$P_{3\phi}$	Potencia activa trifásica	144246	[W]
$Q_{3\phi}$	Potencia reactiva trifásica	8640	[VAr]
$S_{3\phi}$	Patencia aparente trifásica	144504	[VA]
FP	Factor de potencia	0.9982	-
THD_{I_a}	THD de corriente fase A	0.74	[%]
THD_{I_b}	THD de corriente fase B	0.78	[%]
THD_{I_c}	THD de corriente fase C	0.86	[%]
THD_{T1v}	THD tensión secundario transformador 1	12.30	[%]
THD_{T2v}	THD tensión secundario transformador 2	14.52	[%]
η	Eficiencia	87.18	[%]

4.5. Conexión Scott-T con inductancia de fuga más alta

En esta sección se modifican determinados parámetros de la conexión Scott-T, prestando especial atención a la inductancia de dispersión (también denominada inductancia de fuga) presente en los transformadores. El objetivo de este ajuste es analizar cómo dicha inductancia influye en el desempeño general de la topología. Los nuevos parámetros de la conexión Scott-T se detallan en la Figura C.8 del Anexo C.

4.5.1 Formas de onda en la conexión Scott-T

Al aumentar la inductancia de fuga en los transformadores de la conexión Scott-T, la alteración en las formas de onda de voltaje en los secundarios se incrementa. Este comportamiento puede apreciarse en la Figura 4.20, donde las señales fueron obtenidas con la referencia de 80 [V] en la carga dentro de la topología propuesta, y se observa que la distorsión de las formas de onda es considerablemente mayor, mostrando una deformación más pronunciada y diferencias de amplitud al comparar con el escenario de condiciones nominales mostrado en la Figura 4.1.

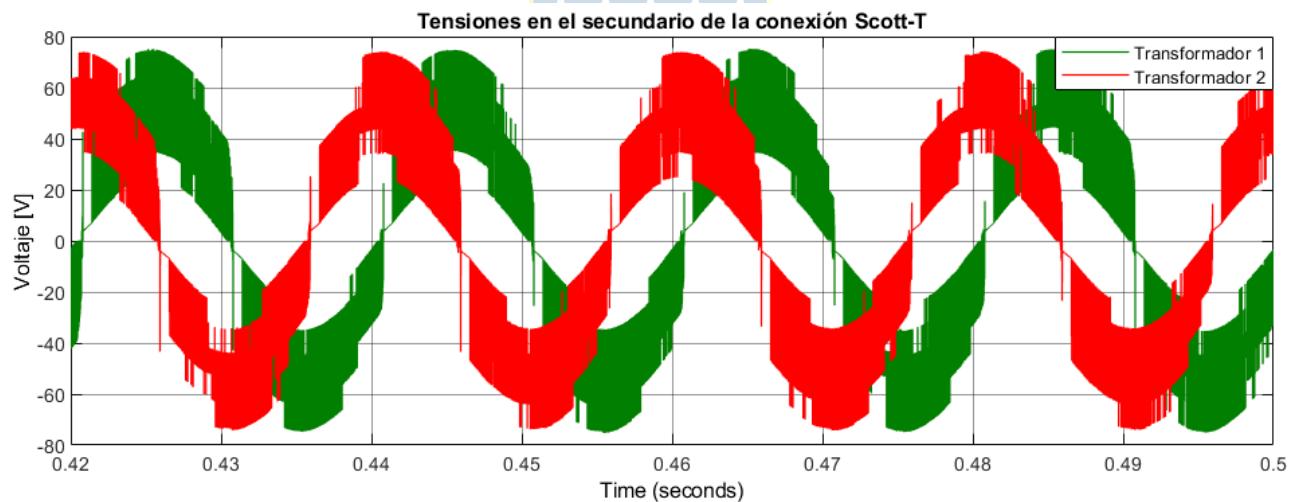


Figura 4.20: Señales de voltajes en los secundarios de la conexión Scott-T al aumentar la inductancia de fuga. Transformador 1 en verde, y transformador 2 en rojo.

El espectro armónico de la tensión del secundario del transformador 1 de la conexión Scott-T se presenta en la Figura 4.21, donde se aprecia la presencia de armónicos impares de orden medio y alto que contribuyen a la distorsión significativa en la forma de onda.

El espectro armónico correspondiente al transformador 2 se encuentra en la Figura C.9 presente en el Anexo C y muestra un comportamiento similar.

Los valores de THD en las señales de voltaje secundario alcanzan 31.15% y 31.32% para los transformadores 1 y 2, respectivamente, lo que representa un incremento superior al 135% respecto al escenario de condiciones nominales, donde se registraban 13.42% y 13.29%. Estos resultados confirman que el aumento de la inductancia de fuga provoca una mayor distorsión armónica en las tensiones secundarias de la conexión Scott-T.

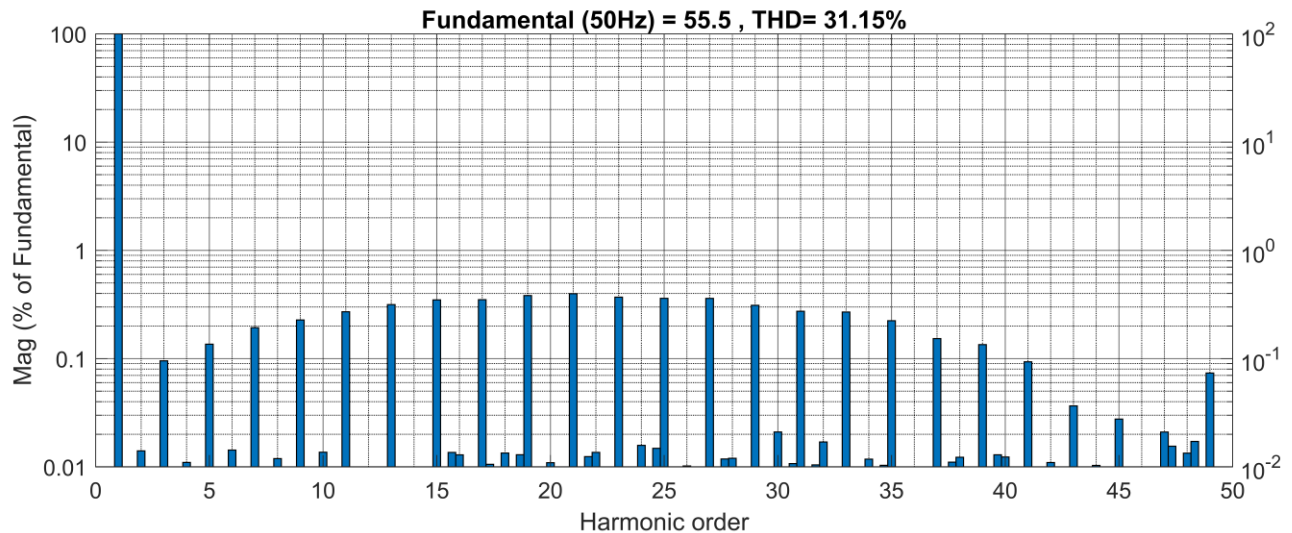


Figura 4.21: Espectro armónico de la señal de voltaje del secundario del transformador 1 de la conexión Scott-T al aumentar la inductancia de fuga.

4.5.2 Formas de onda en el electrolizador

En la Figura 4.22 se presentan las formas de onda de tensión, corriente y potencia en el electrolizador. Durante el transiente inicial, la tensión muestra un incremento hacia el valor de referencia de 80 [V], acompañado de una distorsión caracterizada por picos y pequeñas irregularidades en la forma de onda. Esta distorsión se transmite directamente a la corriente.

Una vez alcanzado el estado estacionario, la tensión se estabiliza en 79.99 [V] con un rizo similar al visto en la sección 4.4, el cual también se refleja en la corriente que toma un valor promedio de 1570 [A]. El valor de promedio de potencia es de 125622 [W].

Los parámetros de desempeño de la topología bajo este nuevo escenario se desglosan a continuación.

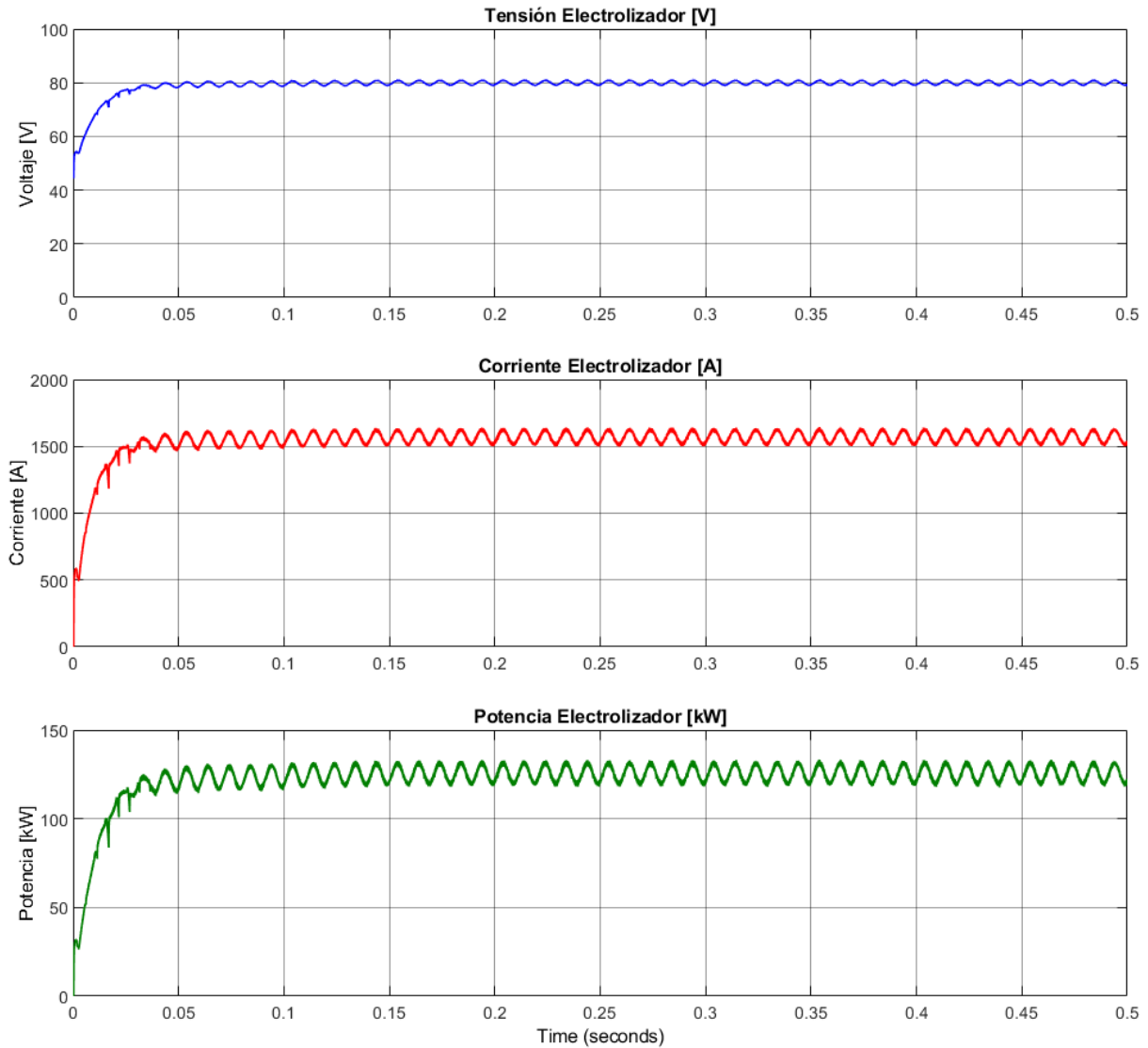


Figura 4.22: Voltaje, corriente y potencia en el electrolizador con inductancia de dispersión alta de la conexión Scott-T.

4.5.3 Factor de potencia

En la Figura 4.23 se presentan las corrientes y voltajes de fase a la entrada del sistema bajo este escenario. Se observa un comportamiento similar en las tres fases, donde la corriente presenta un atraso respecto al voltaje, evidenciando un ángulo de desfase mayor que en los escenarios analizados previamente. Esto se traduce en un factor de potencia relativamente más bajo en comparación con los escenarios anteriores.

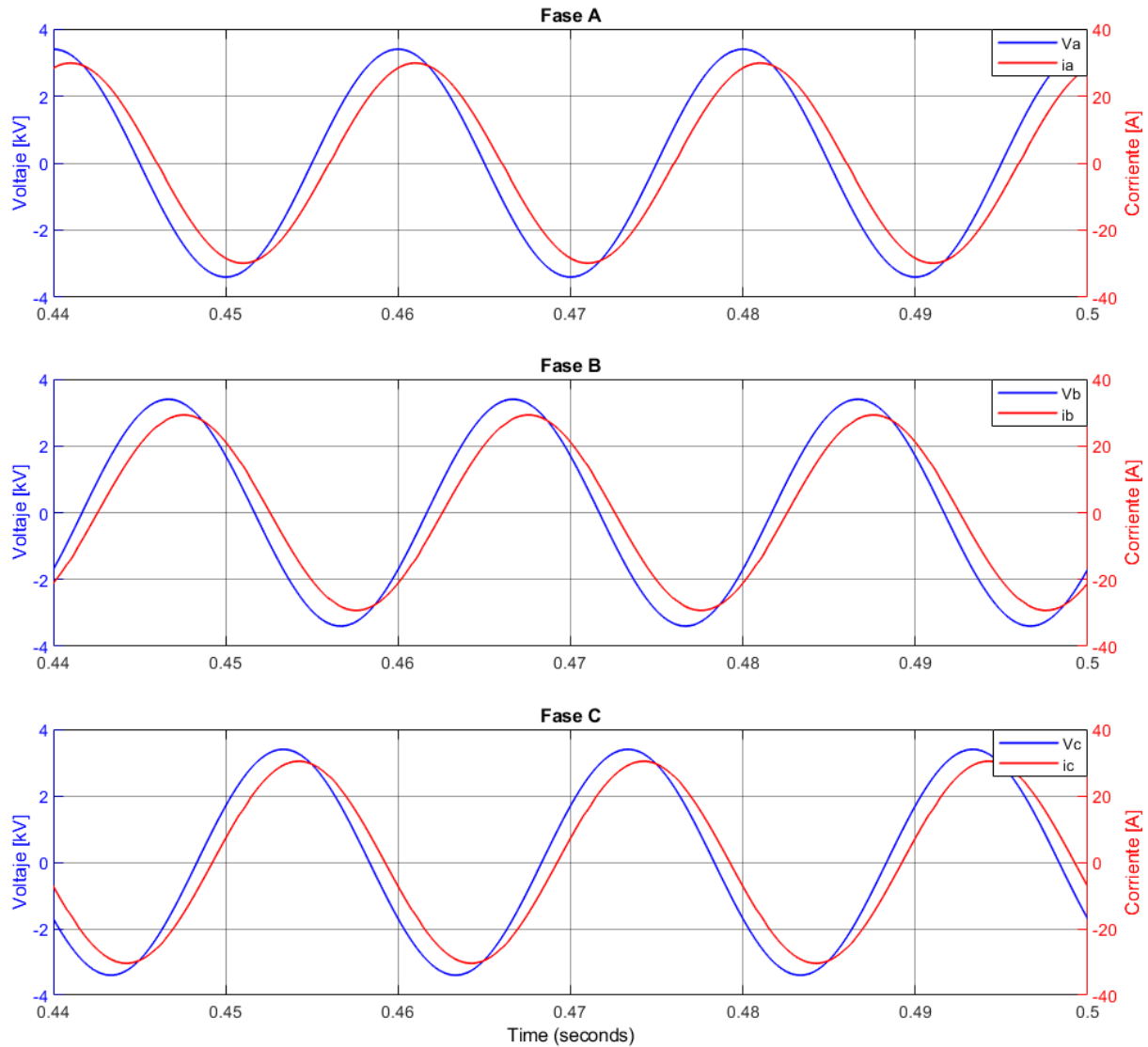


Figura 4.23: Voltajes (azul) y corrientes (rojo) de fase de la red, para una inductancia de dispersión alta de la conexión Scott-T.

Por otro lado, en la Figura 4.24 se muestran las magnitudes de las potencias activa, reactiva y aparente. Se aprecia que la potencia activa difiere de la potencia aparente, lo que confirma que el factor de potencia es relativamente más bajo en comparación a los escenarios previamente revisados.

En particular, la potencia activa alcanza un valor de 145380 [W], mientras que la potencia aparente se sitúa en torno a 151950 [VA], lo que resulta en un factor de potencia de 0.9568.

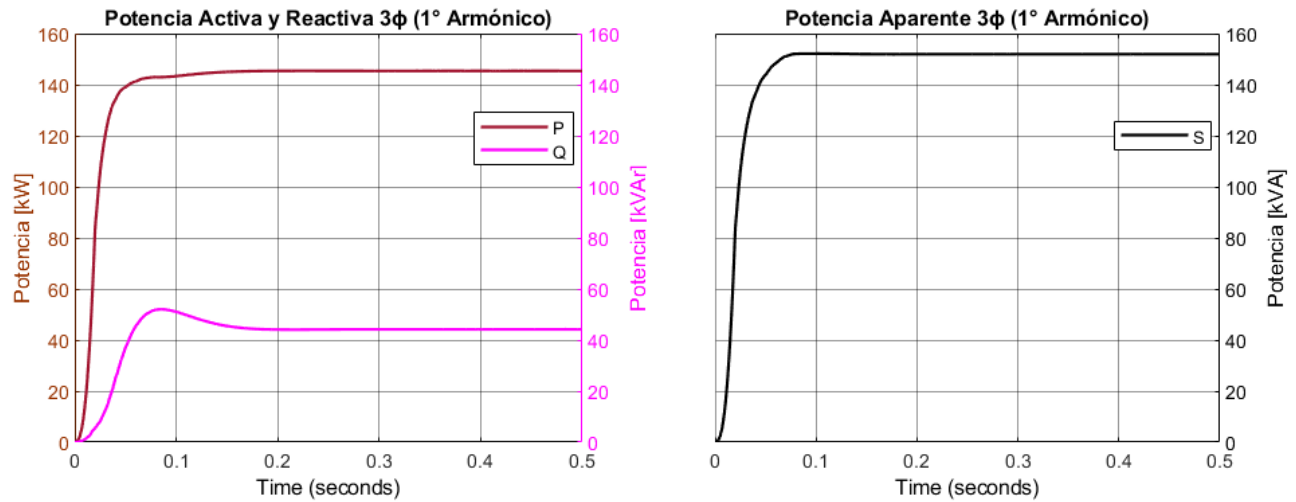


Figura 4.24: Potencia activa, reactiva y aparente con una inductancia de fuga más alta en la conexión Scott-T.

4.5.4 Factor de rizo

Un acercamiento a las formas de onda de voltaje y corriente en el electrolizador se presentan en la Figura 4.25, donde se deduce que el voltaje de rizo pico a pico alcanza un valor cercano a los 2.275 [V] en estado estable. Por otro lado, la corriente de rizo pico a pico está en el orden de los 140.3 [A].

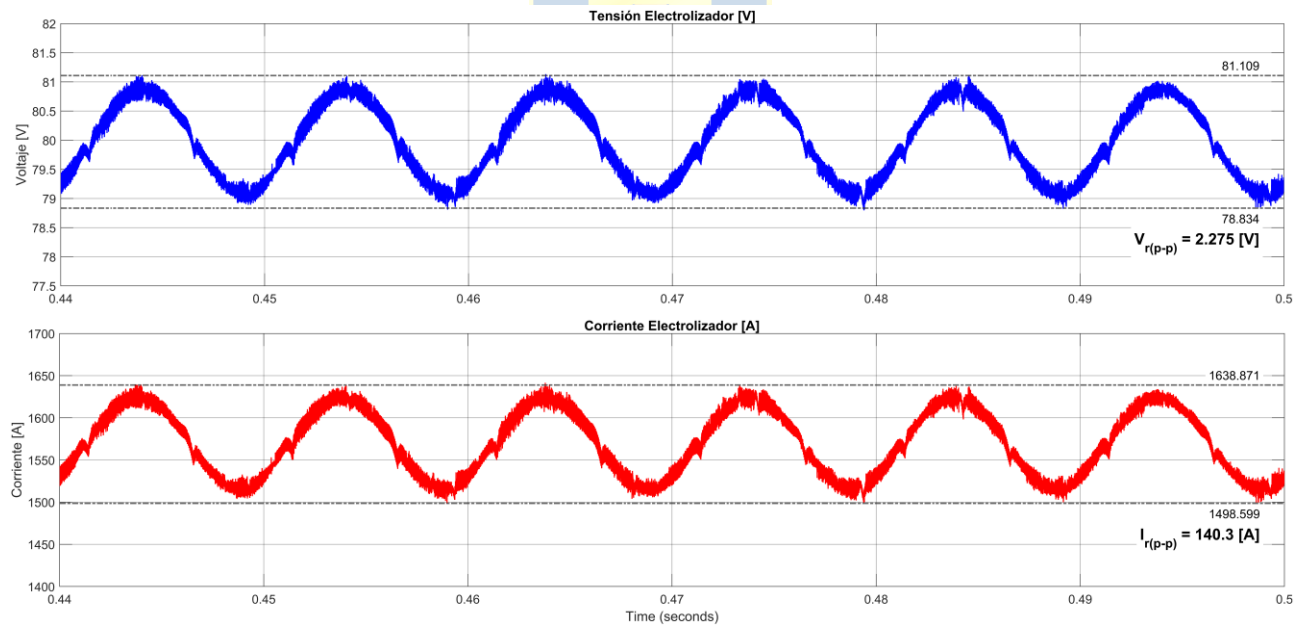


Figura 4.25: Acercamiento de las señales de voltaje (azul) y corriente (rojo) en el electrolizador, considerando una inductancia de fuga más alta en la conexión Scott-T.

A partir de estos resultados se obtienen factores de rizo de voltaje ($r_V(\%)$) y corriente ($r_I(\%)$) de 2.844% y 8.936%, respectivamente, los cuales en comparación con los valores nominales de

0.8593% y 2.888% representan un incremento aproximado del 231% en voltaje y del 209% en corriente, sin embargo, dichos incrementos son menores a los observados bajo condiciones de desbalance de fases.

4.5.5 THD

En la Figura 4.26 se presentan las corrientes de fase de entrada al sistema, las cuales exhiben una forma prácticamente sinusoidal. En particular, el valor de THD de las corrientes de las fases A, B y C son 0.27%, 0.30% y 0.29%, respectivamente, valores más bajos que los revisados en el escenario de condiciones nominales.

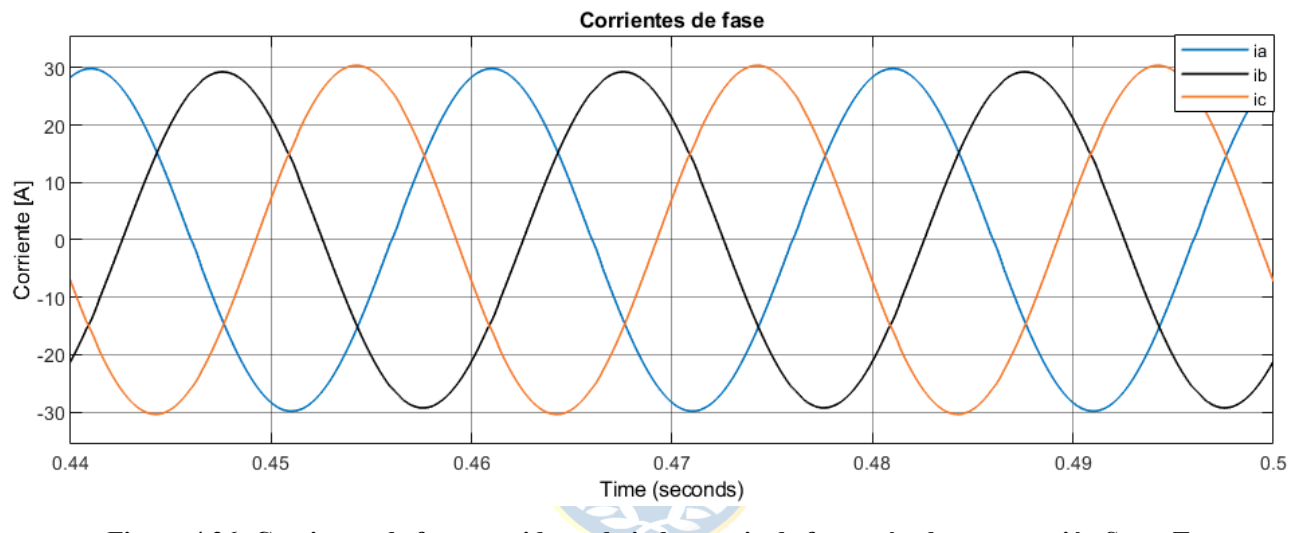


Figura 4.26: Corrientes de fase, considerando inductancia de fuga más alta en conexión Scott-T.

4.5.6 Eficiencia

Para el estudio de la eficiencia de la topología en este escenario, se conservan los mismos criterios de pérdida establecidos en la sección 4.2.6, con la diferencia que se varían parámetros de los transformadores de la conexión Scott-T, según se indica en la Figura C.8 del Anexo C.

Este escenario muestra que la eficiencia de potencia no presenta variaciones significativas respecto a las condiciones nominales, situándose en 86.41%

En la Tabla 4.4 se resumen los parámetros analizados para el escenario de conexión Scott-T con alta inductancia de dispersión.

Tabla 4.4: Resumen de parámetros para caso de inductancia de dispersión alta.

Parámetro		Valor	Unidad de medida
V_o	Voltaje promedio en electrolizador	79.99	[V]
I_o	Corriente promedio en electrolizador	1570	[A]
P_o	Potencia promedio en electrolizador	125622	[W]
$V_{r(p-p)}$	Voltaje de rizo pico a pico	2.275	[V]
$I_{r(p-p)}$	Corriente de rizo pico a pico	140.3	[A]
$FR_V(\%)$	Factor de rizo de voltaje	0.7986	[%]
$FR_I(\%)$	Factor de rizo de corriente	2.462	[%]
$r_V(\%)$	Factor de rizo de voltaje	2.844	[%]
$r_I(\%)$	Factor de rizo de corriente	8.936	[%]
V_a	Voltaje fase A del lado de la red	2402	[V]
V_b	Voltaje fase B del lado de la red	2402	[V]
V_c	Voltaje fase C del lado de la red	2402	[V]
I_a	Corriente fase A del lado de la red	21.09	[A]
I_b	Corriente fase B del lado de la red	20.7	[A]
I_c	Corriente fase C del lado de la red	21.49	[A]
$P_{3\phi}$	Potencia activa trifásica	145380	[W]
$Q_{3\phi}$	Potencia reactiva trifásica	44198	[VAR]
$S_{3\phi}$	Patencia aparente trifásica	151950	[VA]
FP	Factor de potencia	0.9568	-
THD_{I_a}	THD de corriente fase A	0.27	[%]
THD_{I_b}	THD de corriente fase B	0.30	[%]
THD_{I_c}	THD de corriente fase C	0.29	[%]
THD_{T1v}	THD tensión secundario transformador 1	31.15	[%]
THD_{T2v}	THD tensión secundario transformador 2	31.32	[%]
η	Eficiencia	86.41	[%]

4.6. Discusión de resultados

En términos generales, la topología propuesta mantiene una operación confiable, con buen aprovechamiento energético y excelente calidad de corriente absorbida desde la red en todos los escenarios de estudio.

En condiciones nominales, la topología muestra un comportamiento estable y equilibrado. La tensión en el electrolizador permanece constante, y las corrientes de red son prácticamente sinusoidales y en fase con las tensiones, lo que se traduce en un factor de potencia de 0.9981, asimismo, el THD en las corrientes de entrada es inferior al 1%. Por otro lado, la eficiencia medida se aproxima al 87.10%, valor adecuado considerando las pérdidas en los dispositivos de conmutación y transformadores. En este régimen, el rizo de tensión y corriente es reducido, garantizando una alimentación estable al electrolizador sin generar perturbaciones relevantes.

En condiciones de carga parcial, el sistema mantiene una operación estable y una correcta respuesta frente a la reducción de potencia. El factor de potencia se conserva elevado en todos los

niveles de carga, es decir, superior a 0.99 y el THD de las corrientes de entrada continúa por debajo del 1%. La eficiencia experimenta una leve disminución, alcanzando un 86.48% cuando la carga es reducida al 25%. También se tiene que los valores de rizo disminuyen, evidenciando un comportamiento más suave del sistema bajo menor demanda.

El escenario bajo condiciones de desbalance de fases representa una condición más exigente, no obstante, a pesar de la asimetría en las tensiones de entrada, el sistema conserva un factor de potencia de 0.9982 y una eficiencia cercana al 87%, manteniendo el THD de corrientes de entrada por debajo del 1%. En esta condición se observa el mayor nivel de rizo entre todos los escenarios, sin embargo, este aumento no constituye un problema relevante, ya que los valores registrados se mantienen dentro de márgenes aceptables y no afectan la estabilidad del electrolizador.

Por último, al aumentar la inductancia de fuga del transformador, se aprecia una degradación moderada en el desempeño eléctrico. Este incremento genera un mayor desfase entre las tensiones y corrientes de entrada, reduciendo el factor de potencia a 0.9568, además de un aumento perceptible del rizo en la salida y una ligera disminución de la eficiencia con respecto al caso nominal, no obstante, el THD de corrientes de entrada se mantiene por debajo del 1%. Aunque este escenario presenta en general los peores parámetros de desempeño eléctrico, los valores obtenidos se mantienen dentro de un rango aceptable, sin implicar pérdidas críticas ni inestabilidad en la operación.

En conjunto, los resultados demuestran que la topología propuesta, basada en la conexión Scott-T con convertidores elevadores PFC operados de manera entrelazada, ofrece un desempeño estable y confiable en todos los escenarios analizados, pues, se mantienen factores de potencia elevados, es decir, mayores a 0.95 y niveles de distorsión armónica por debajo del 1%, cumpliendo con los límites establecidos por la normativa vigente. Las variaciones de eficiencia y de rizo observadas no representan un problema significativo para el funcionamiento del electrolizador, por lo que el sistema puede considerarse una alternativa práctica y efectiva para la alimentación de electrolizadores PEM de alta potencia.

5. Conclusiones

5.1. Sumario

El presente trabajo se centra en el análisis, diseño y simulación de un rectificador modular con corrección del factor de potencia, implementado a partir de dos transformadores monofásicos en conexión Scott-T, con el propósito de suministrar energía eléctrica de calidad y alta eficiencia a electrolizadores PEM de alta potencia. El desarrollo del trabajo integra una revisión teórica sobre el hidrógeno verde y las tecnologías de electrólisis, junto con el análisis de parámetros de desempeño y un estudio comparativo de topologías de rectificación. Con base en estos antecedentes, se plantea una topología modular que posteriormente se implementa y evalúa en MATLAB/Simulink bajo condiciones nominales, de carga parcial, desbalance de fases y variaciones en la inductancia de fuga de la conexión Scott-T.

5.2. Conclusiones

El objetivo general de este trabajo consiste en estudiar y diseñar un rectificador modular con PFC en conexión Scott-T, orientado al suministro de energía para electrolizadores PEM de alta potencia. Dicho objetivo se cumple, ya que la topología propuesta presenta un desempeño robusto, con una eficiencia comprendida entre 86% y 89%, un control adecuado del rizo y de la distorsión armónica, y un factor de potencia cercano a la unidad en todos los escenarios evaluado.

En cuanto al primer objetivo específico, orientado a evaluar la capacidad de aplicación del transformador en conexión Scott-T en sistemas de rectificación de alta potencia, se concluye que su incorporación en la topología propuesta resulta adecuada. Los resultados de simulación muestran que la conexión Scott-T permite una alimentación equilibrada hacia los convertidores elevadores entrelazados, manteniendo un funcionamiento estable en todos los escenarios de operación. Bajo condiciones de desbalance de fases, los secundarios dejan de operar en forma simétrica, lo que genera un ligero aumento en el rizo de salida, sin embargo, el sistema conserva un comportamiento estable y una buena calidad de energía desde el lado de la red.

Respecto al diseño del rectificador modular, correspondiente al segundo objetivo específico, se implementan puentes rectificadores y convertidores elevadores que operan de manera entrelazada, integrando inductores de 30 $[\mu\text{H}]$ por rama y un condensador de 5700 $[\mu\text{F}]$. Esta configuración permite procesar corrientes elevadas sin comprometer la estabilidad de la tensión de salida, la cual se mantiene regulada en torno a los valores de referencia establecidos para el electrolizador.

En cuanto al tercer objetivo específico, asociado a la validación mediante simulación, el modelo desarrollado en MATLAB/Simulink confirma que el sistema mantiene su estabilidad en todos los escenarios evaluados. En condiciones nominales, las corrientes de red son sinusoidales y en fase con las tensiones, reflejando un buen control del PFC. Bajo carga parcial, la eficiencia se conserva prácticamente constante y solo disminuye levemente al reducir la carga al 25% de la nominal. En el escenario de desbalance de fases, aunque el rizo de salida aumenta, la tensión del electrolizador se mantiene estable y la calidad de energía desde el lado de la red no se ve comprometida. Finalmente, el incremento de la inductancia de fuga en la conexión Scott-T provoca una ligera caída en el factor de potencia y un rizo algo mayor con respecto al caso nominal, pero el sistema sigue funcionando dentro de los márgenes normativos.

Por último, respecto al cuarto objetivo específico, orientado a la evaluación del desempeño eléctrico, los resultados muestran que la topología cumple con los principales estándares de calidad de energía. El factor de potencia se mantiene cercano a 1 en todos los escenarios, al igual que la distorsión armónica de corriente se mantiene por debajo del 1%, y el rizo de salida oscila entre valores mínimos en carga parcial y moderados bajo inductancia de fuga elevada. Estos indicadores reflejan un sistema eficiente y capaz de entregar energía regulada y de calidad a la carga, incluso bajo condiciones adversas. En síntesis, la topología propuesta es técnicamente viable para la alimentación de electrolizadores PEM de gran potencia.

5.3. Trabajo futuro

Una de las proyecciones más relevantes de este trabajo corresponde a la validación experimental de la topología propuesta. La construcción de un prototipo a escala de laboratorio debiese permitir contrastar los resultados obtenidos con mediciones reales, incorporando fenómenos que en el modelo fueron idealizados, como por ejemplo el calentamiento de los componentes. Esto resulta fundamental para confirmar el desempeño del sistema en condiciones prácticas y acercar la investigación a su aplicación industrial.

Otra línea de investigación corresponde a la exploración de topologías alternativas de PFC que permitan optimizar la eficiencia y la calidad de energía en aplicaciones de alta potencia. Entre estas alternativas, se pueden considerar configuraciones “bridgeless”, que eliminan el puente rectificador de diodos, reduciendo así las pérdidas de conducción y las caídas de tensión en la etapa de entrada, lo que puede mejorar el aprovechamiento energético en sistemas de gran escala destinados a la producción de hidrógeno verde.

Referencias

- [1] Ministerio del Medio Ambiente de Chile, “¿Qué es el Cambio Climático?” Accessed: Jul. 18, 2025. [Online]. Available: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/que-es-el-cambio-climatico/>
- [2] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, “El Acuerdo de París.” Accessed: Jul. 18, 2025. [Online]. Available: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- [3] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia and Centro de Derecho Ambiental de la Universidad de Chile, “Cápsula climática: ¿Qué es la carbono neutralidad?” Accessed: Jul. 18, 2025. [Online]. Available: <https://leycambioclimatico.cl/capsula-climatica-que-es-la-carbono-neutralidad/>
- [4] Red Campus Sustentable and R. Reyes, “El Acuerdo de París: Un Aniversario de Compromisos y Desafíos.” Accessed: Jul. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.redcampussustentable.cl/aniversario-acuerdo-de-paris/>
- [5] Superintendencia de Electricidad Y Combustibles, “Hidrógeno.” Accessed: Jul. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.sec.cl/hidrogeno/>
- [6] G. Rego, J. Rocha, J. A. Faria, J. L. Afonso, and V. Monteiro, “A Review of Hydrogen Production Methods and Power Electronics Converter Topologies for Green Hydrogen Applications,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 22, p. 5579, Nov. 2024, doi: 10.3390/en17225579.
- [7] J. M. M. Arcos and D. M. F. Santos, “The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production,” *Gases*, vol. 3, no. 1, pp. 25–46, Feb. 2023, doi: 10.3390/gases3010002.
- [8] Mapas de El Orden Mundial and Á. Merino, “Verde, azul o negro: los distintos tipos de hidrógeno.” Accessed: Apr. 12, 2025. [Online]. Available: <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/tipos-hidrogeno/>
- [9] J. Pereira, R. Souza, J. Oliveira, and A. Moita, “Hydrogen Production, Transporting and Storage Processes—A Brief Review,” *Clean Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 1260–1313, Sep. 2024, doi: 10.3390/cleantechnol6030061.
- [10] P. Saha *et al.*, “Grey, blue, and green hydrogen: A comprehensive review of production methods and prospects for zero-emission energy,” *Int J Green Energy*, vol. 21, no. 6, pp. 1383–1397, May 2024, doi: 10.1080/15435075.2023.2244583.

- [11] J. Lei, H. Ma, G. Qin, Z. Guo, P. Xia, and C. Hao, “A Comprehensive Review on the Power Supply System of Hydrogen Production Electrolyzers for Future Integrated Energy Systems,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 4, p. 935, Feb. 2024, doi: 10.3390/en17040935.
- [12] X. Guo, H. Zhu, and S. Zhang, “Overview of electrolyser and hydrogen production power supply from industrial perspective,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 1048–1059, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.325.
- [13] S. Sebbahi *et al.*, “A comprehensive review of recent advances in alkaline water electrolysis for hydrogen production,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 82, pp. 583–599, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.07.428.
- [14] W. H. Hayt, J. E. Kemmerly, and S. M. Durbin, *Engineering circuit analysis*. McGraw-Hill, 2012.
- [15] Superintendencia de Electricidad Y Combustibles, “Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución,” Apr. 2024, *San*. Accessed: Aug. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/05/NTCSDx2024-1.pdf>
- [16] M. H. Rashid, *Electrónica de potencia*, 4th ed. México, D.F.: Pearson Educación, 2015.
- [17] T. L. Floyd, *Dispositivos electrónicos*, 8th ed. Naucalpan de Juárez, Edo. de México: Pearson Educación, 2008.
- [18] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-43881-4.
- [19] M. B. El Kattel *et al.*, “Overview of Main Electrolyzer Technologies and Power Electronic Converter Topologies for Enabling Hydrogen Production Through Water Electrolysis,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, Oct. 2024, doi: 10.1002/cta.4277.
- [20] M. Chen, S.-F. Chou, F. Blaabjerg, and P. Davari, “Overview of Power Electronic Converter Topologies Enabling Large-Scale Hydrogen Production via Water Electrolysis,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 4, p. 1906, Feb. 2022, doi: 10.3390/app12041906.
- [21] L. Sánchez, D. Reigosa, A. Bilbao, I. Peña-Gonzalez, and F. Briz, “Comparative Analysis of Power Converter Topologies for Hydrogen Electrolyzers,” *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 12, no. 5, pp. 4325–4341, Oct. 2024, doi: 10.1109/JESTPE.2024.3417258.
- [22] Jakob Damkjær, Ubaid Bashir Wani, and Spyridon Lazaris, “MW-Level Power Converter Solutions for Power-to-X Application,” Master’s Thesis, Aalborg University, 2022. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available:

https://vbn.aau.dk/ws/files/474444653/Thesis___MW_Level_Power_Converter_Solutions_for_Power_to_X_Application.pdf

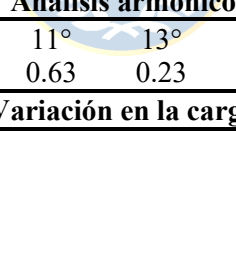
- [23] S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas*, 5th ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2012.
- [24] J. F. Mora, *Máquinas eléctricas*, 6th ed. Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U., 2008.
- [25] L. Bao, L. Fan, and Z. Miao, “Modeling and Analysis of Single-phase Boost Converter with Power Factor Correction Control,” in *2020 52nd North American Power Symposium (NAPS)*, IEEE, Apr. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/NAPS50074.2021.9449672.
- [26] A. Hassan, O. Abdel-Rahim, M. Bajaj, and I. Zaitsev, “Power electronics for green hydrogen generation with focus on methods, topologies, and comparative analysis,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 24767, Oct. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-76191-6.
- [27] D. Guilbert and G. Vitale, “Dynamic Emulation of a PEM Electrolyzer by Time Constant Based Exponential Model,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 4, p. 750, Feb. 2019, doi: 10.3390/en12040750.
- [28] H. Marefatjouikilevae, F. Auger, and J.-C. Olivier, “Static and Dynamic Electrical Models of Proton Exchange Membrane Electrolysers: A Comprehensive Review,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 18, p. 6503, Sep. 2023, doi: 10.3390/en16186503.
- [29] Á. Hernández-Gómez, V. Ramirez, and D. Guilbert, “Investigation of PEM electrolyzer modeling: Electrical domain, efficiency, and specific energy consumption,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 29, pp. 14625–14639, May 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.195.
- [30] Suzhou VMA New Energy Co. Ltd., “PEM Water Electrolysis Electrolyzer Stack.” Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.vma-energy.com/productinfo/1213387.html>
- [31] W. Ji, S. Wang, Y. Sun, H. Lv, X. Shen, and C. Zhang, “Research on the Influence of Collector Microstructure on the Performance of PEM Electrolyzer,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 4, p. 165, Sep. 2021, doi: 10.3390/wevj12040165.
- [32] D. Guilbert and G. Vitale, “Dynamic Emulation of a PEM Electrolyzer by Time Constant Based Exponential Model,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 4, p. 750, Feb. 2019, doi: 10.3390/en12040750.

A. Anexo A

Tabla A.1: Especificaciones del sistema analizado en [22].

Variable	Valor	Unidad de medida
Tensión de la red	33	[kV] (Linea a Linea, rms)
Frecuencia de la red	50	[Hz]
Voltaje de salida de CC	1	[kV]
Corriente de salida de CC	1	[kA]
Potencia de carga	1	[MW]
Carga resistiva	1	[Ω]

Tabla A.2: Resumen comparativo de topologías analizadas en [22], considerando filtros pasivos.

12-TR							
Análisis armónico							
Orden de armónico	11°	13°	23°	25°	35°	37°	THD
Valor [%]	0.9	0.2	2.5	1.9	0.8	0.9	3.64
Variación en la carga							
Carga [%]			100	80	60	40	20
Potencia [MW]			1	0.8	0.6	0.4	0.2
Factor de potencia			0.99	0.98	0.97	0.98	0.92
THD _i [%]			3.64	4.64	4.96	5.45	6.06
12-DRMC							
Análisis armónico							
Orden de armónico	11°	13°	23°	25°	35°	37°	THD
Valor [%]	0.63	0.23	1.31	1.21	0.52	0.46	2.12
Variación en la carga							
Carga [%]			100	80	60	40	20
Potencia [MW]			1	0.8	0.6	0.4	0.2
Factor de potencia			0.95	0.90	0.79	0.62	0.34
THD _i [%]			2.12	2.29	2.33	2.07	1.66

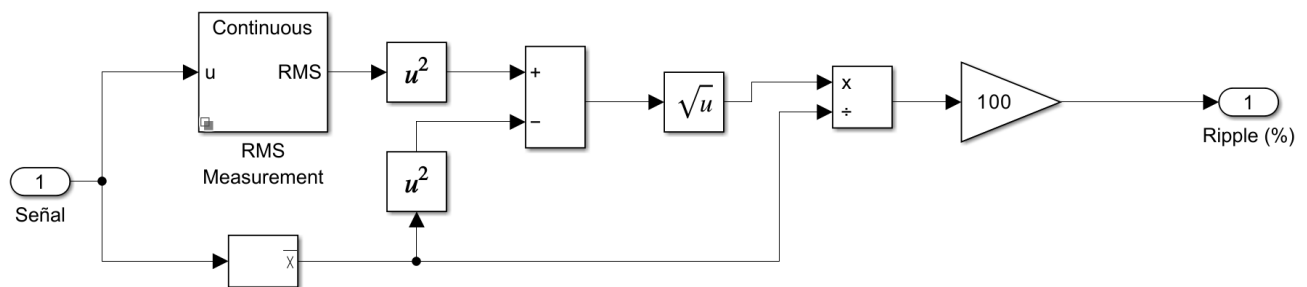


Figura A.1: Diagrama de bloques para calcular factor de rizo.

B. Anexo B

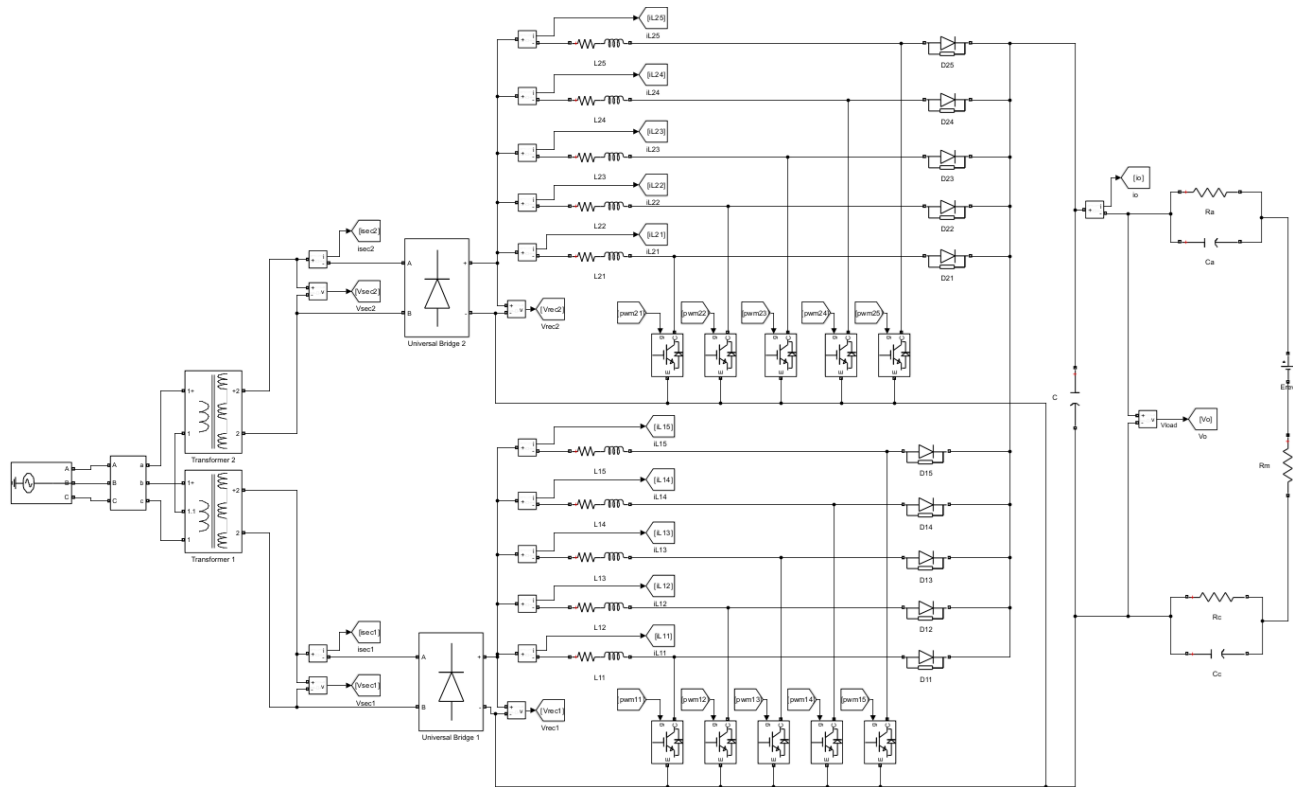


Figura B.1: Topología propuesta implementada en Simulink.

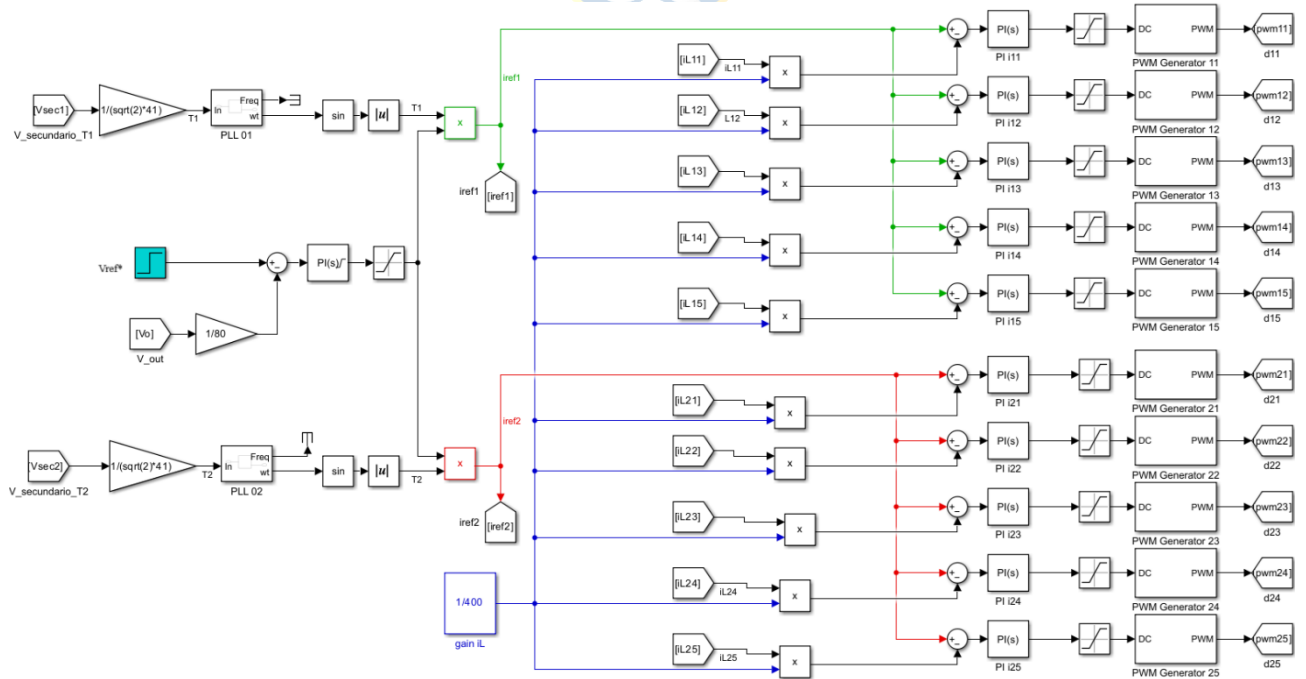


Figura B.2: Sistema de control de la topología propuesta.

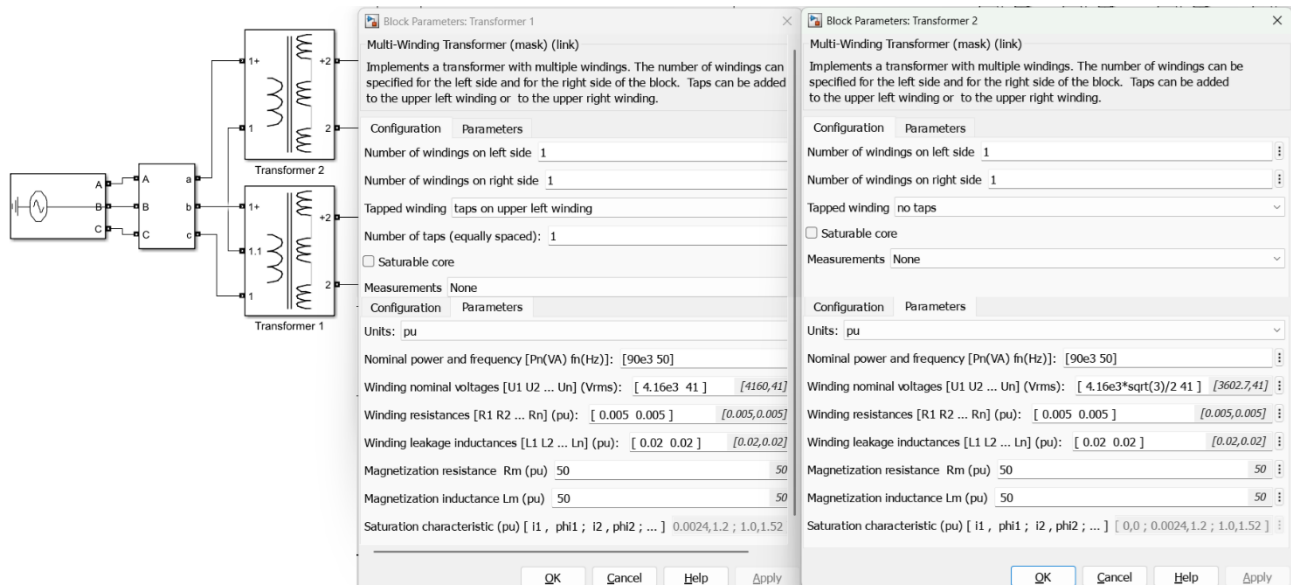


Figura B.3: Configuración y parámetros de la conexión Scott-T en Simulink.

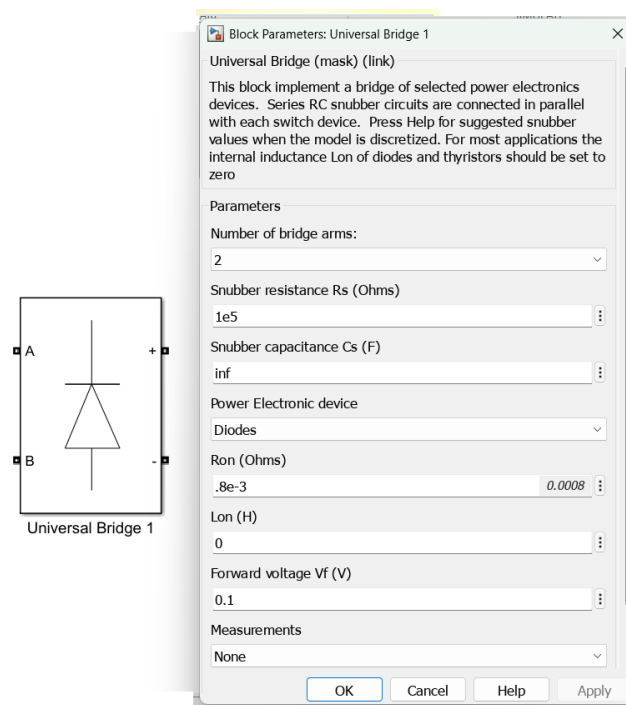


Figura B.4: Parámetros del puente universal en Simulink, configurado como puente de diodos monofásico. Válido para los dos puentes en la topología.

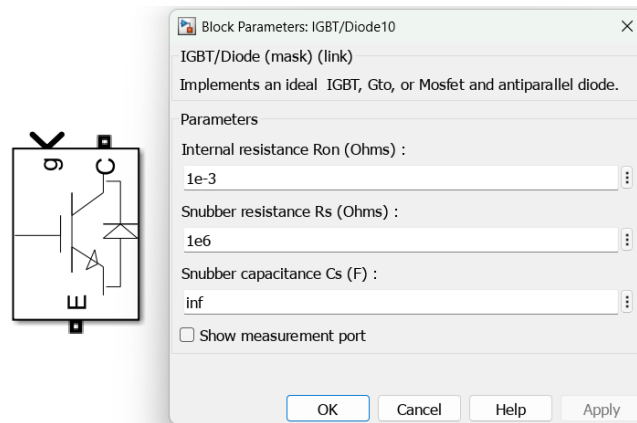


Figura B.5: Parámetros de los IGBTs utilizados en la simulación de Simulink. Válido para los 10 IGBTs presentes en la topología.

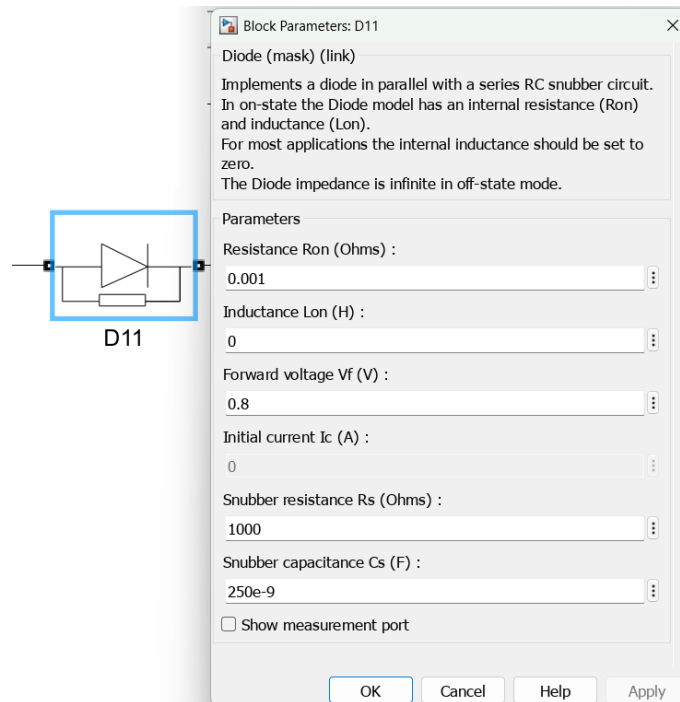


Figura B.6: Parámetros de los diodos utilizados en la simulación de Simulink. Válido para los 10 diodos presentes en la topología.

Tabla B.1: Parámetros de los controladores PI utilizados en Simulink.

Parámetro		Valor
P_i	Valor P para los 10 controladores de corriente	15000
I_i	Valor I para los 10 controladores de corriente	1100
P_v	Valor P para el controlador de tensión	0.001
I_v	Valor I para el controlador de tensión	290

C. Anexo C

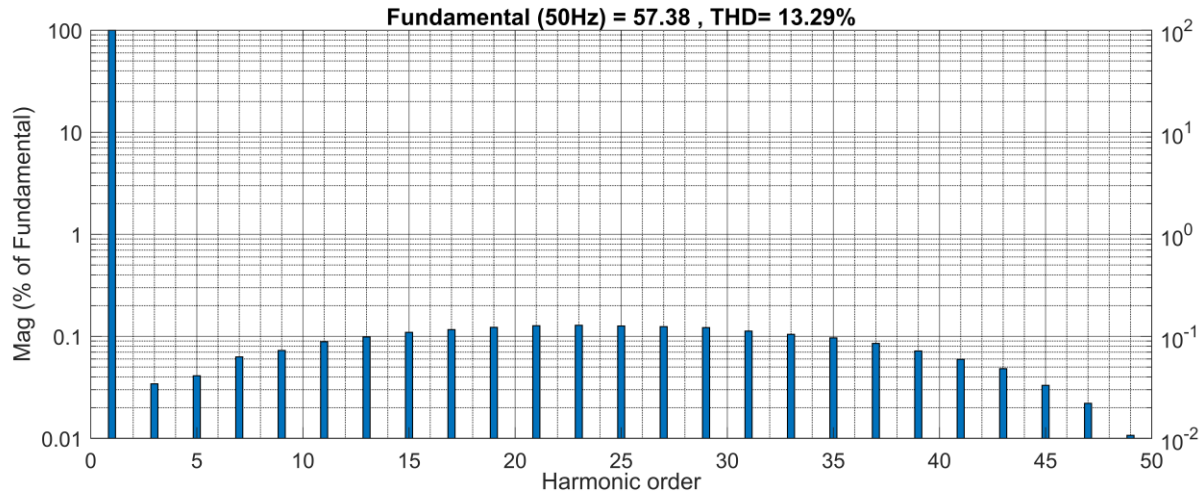


Figura C.1: Espectro armónico de la señal de voltaje del secundario del transformador 2 de la conexión Scott-T bajo condiciones nominales.

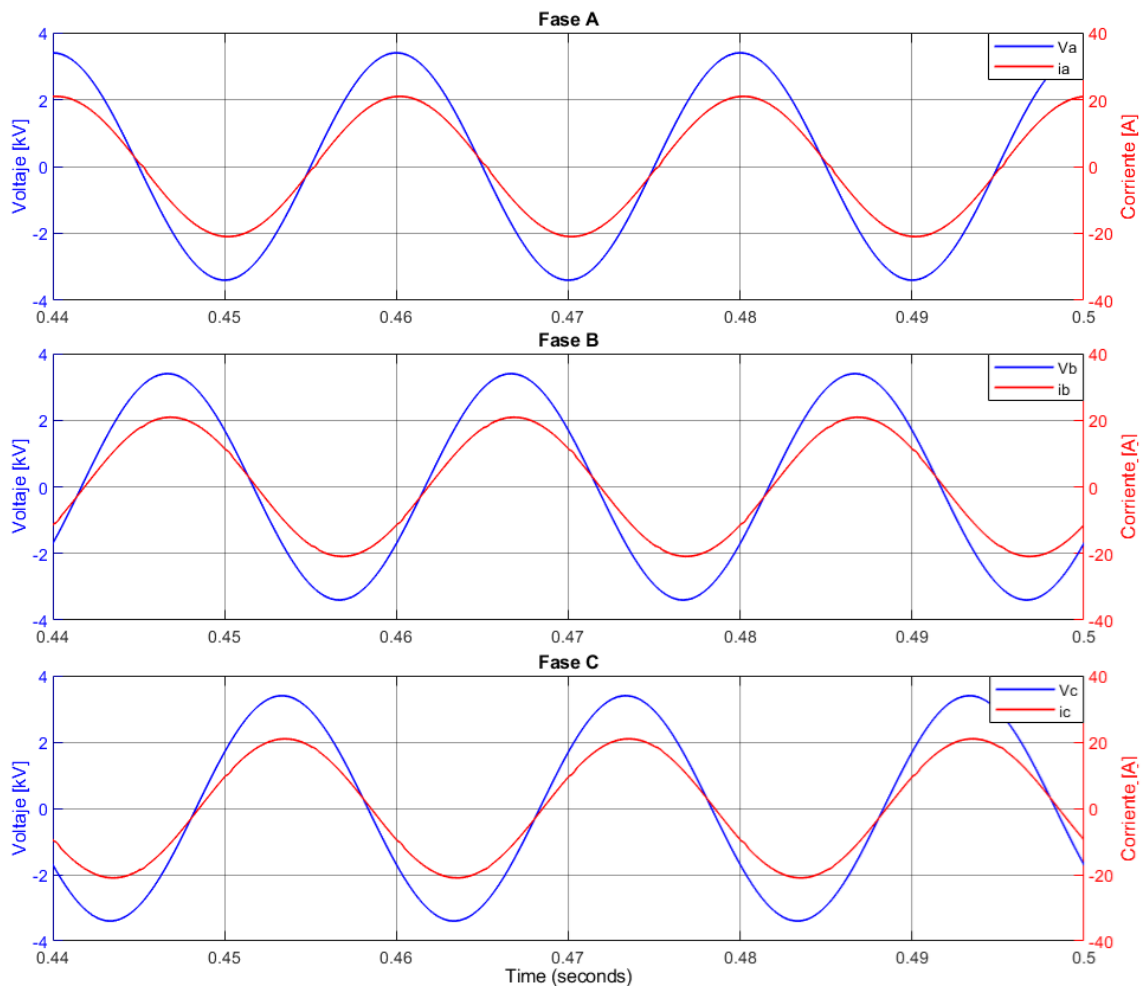


Figura C.2: Voltajes y corrientes de fase para una reducción al 75% de la carga nominal.

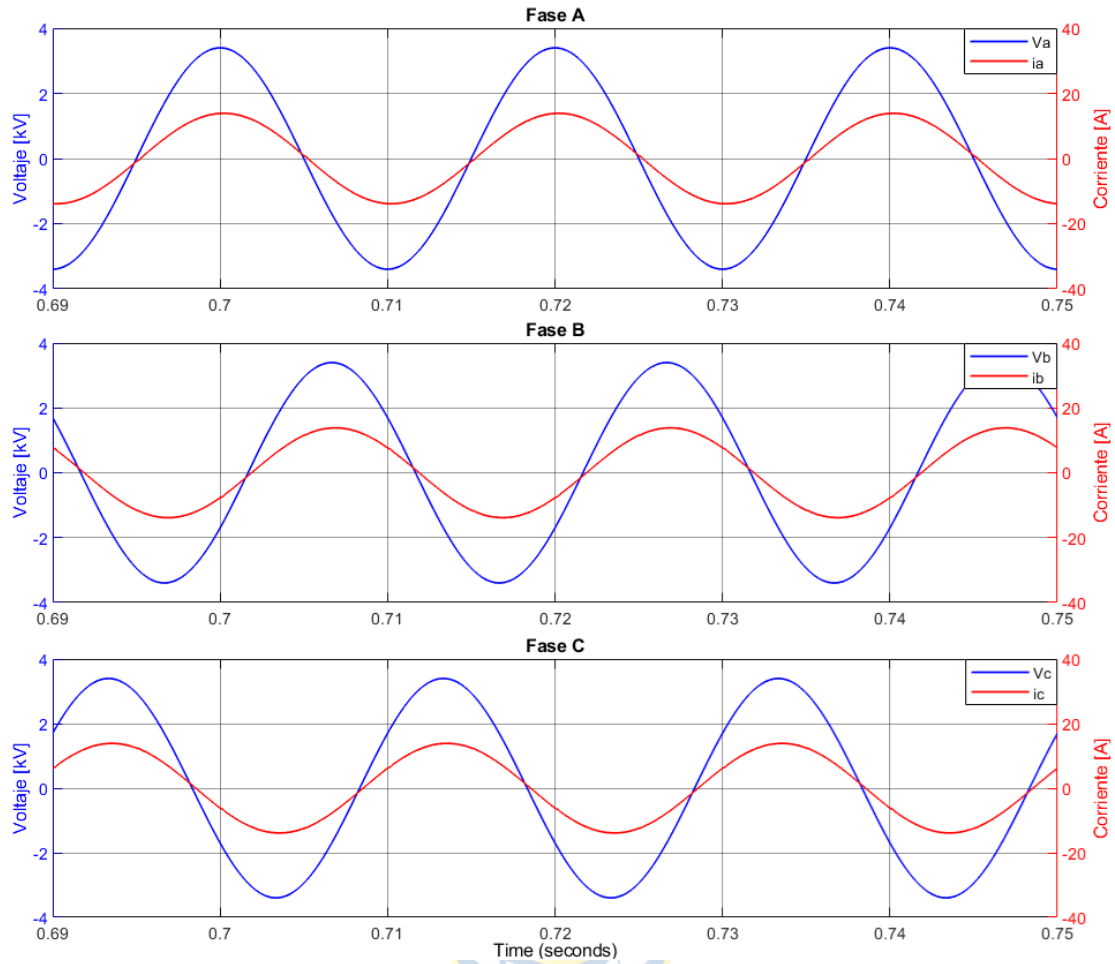


Figura C.3: Voltajes y corrientes de fase para una reducción al 50% de la carga nominal.

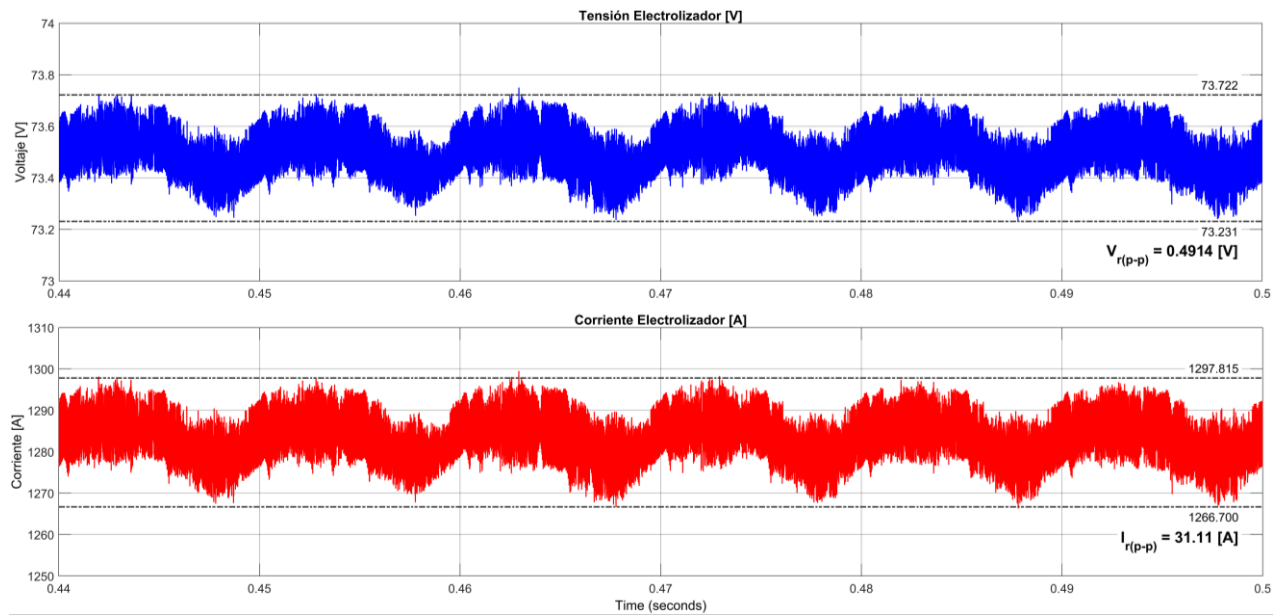


Figura C.4: Acercamiento de las señales de voltaje (azul) y corriente (rojo) en el electrolizador al reducir la carga al 75% de la nominal.

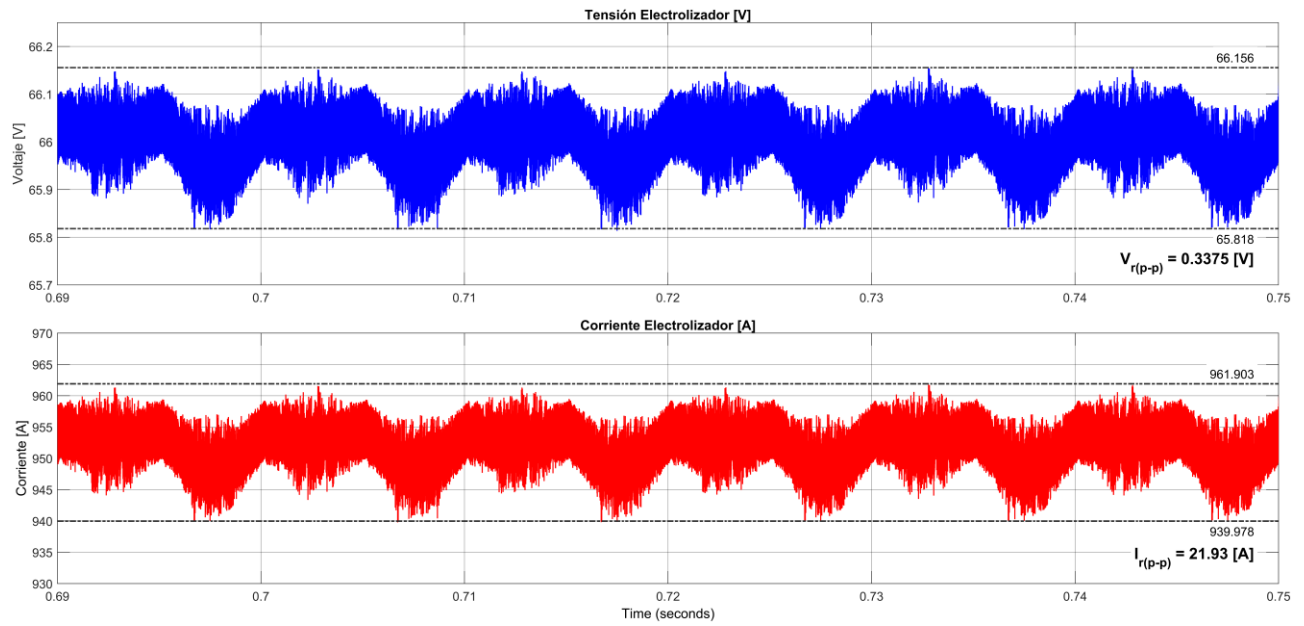


Figura C.5: Acercamiento de las señales de voltaje (azul) y corriente (rojo) en el electroizador al reducir la carga al 50% de la nominal.

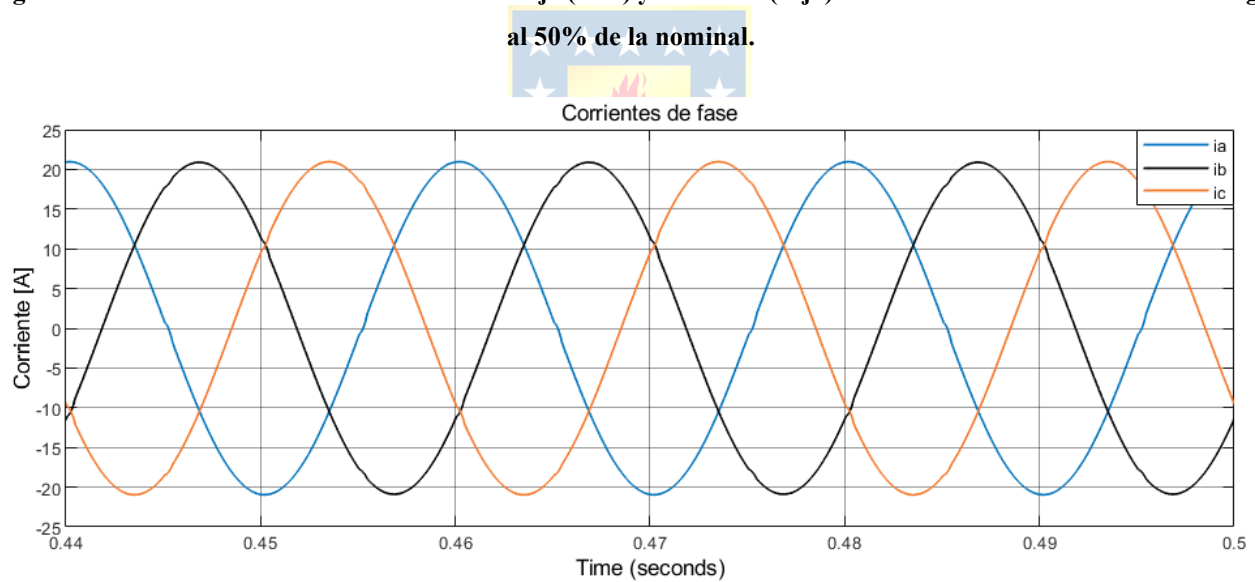


Figura C.6: Corrientes de fase al reducir la carga al 75% de la nominal.

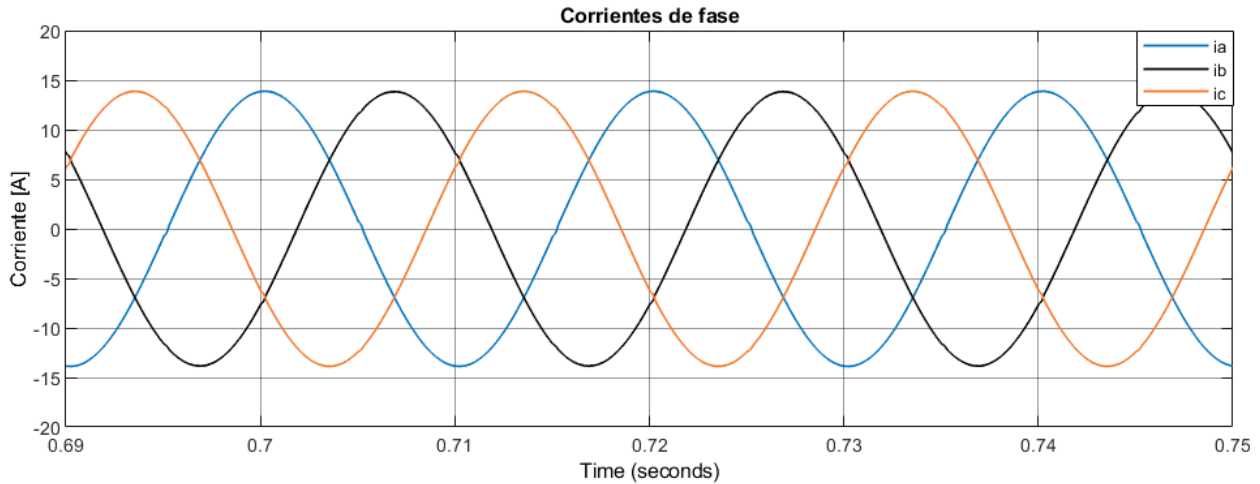


Figura C.7: Corrientes de fase al reducir la carga al 50% de la nominal.

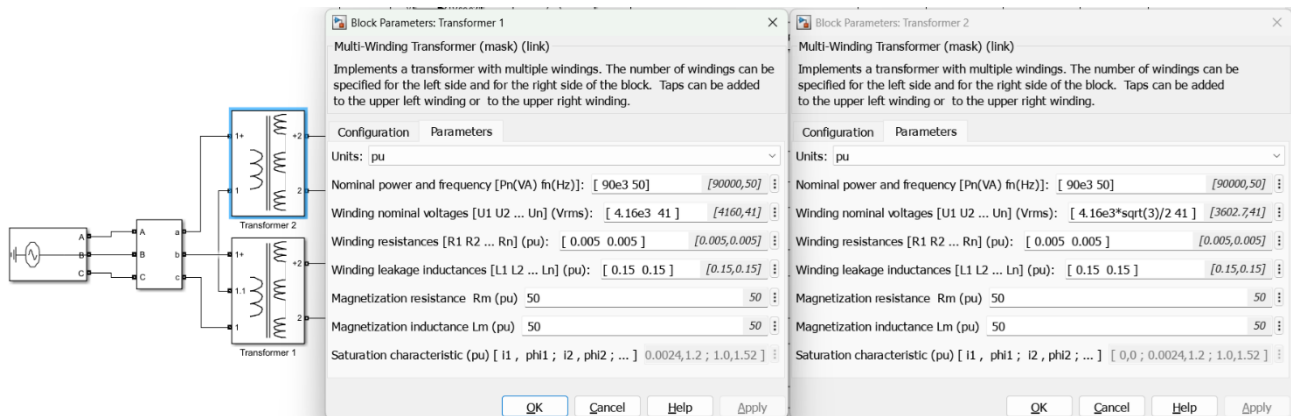


Figura C.8: Nuevos parámetros de la conexión Scott-T para análisis de caso con inductancia de dispersión alta.

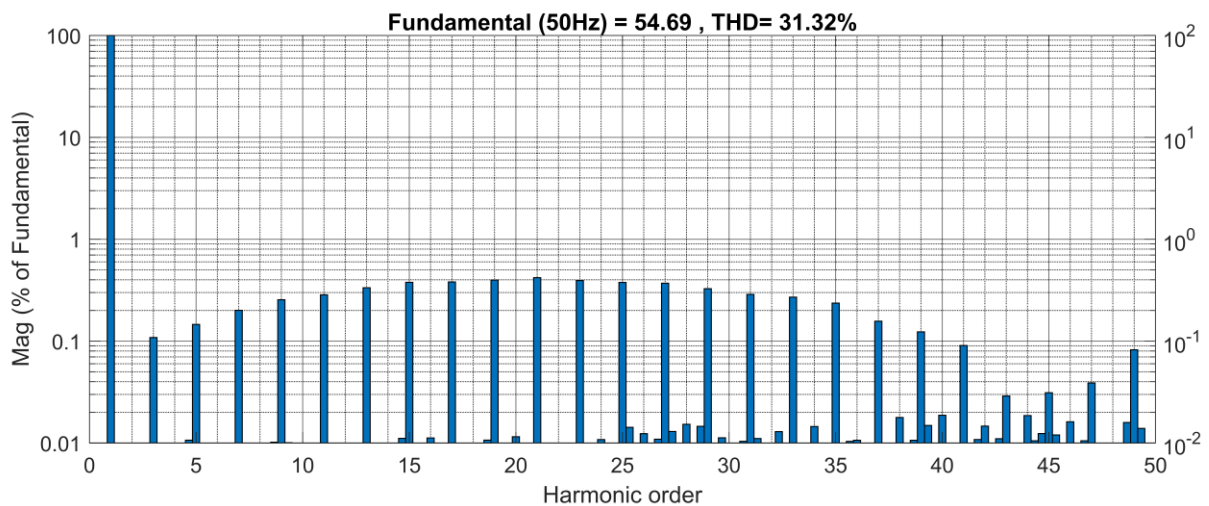


Figura C.9: Espectro armónico de la señal de voltaje del secundario del transformador 2 de la conexión Scott-T al aumentar la inductancia de fuga.