



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DISEÑO DE CARGADORES DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS A PARTIR DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS DE GENERACIÓN E
INTEGRACIÓN CON LA RED ELÉCTRICA DE
POTENCIA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: CRISTIAN FERNANDO LEÓN ZHAGÑAY
BRUNO VINICIO ORTIZ CÁRDENAS**

TUTOR: ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, PhD

Cuenca - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Cristian Fernando León Zhagñay con documento de identificación N° 0302723234 y Bruno Vinicio Ortiz Cárdenas con documento de identificación N° 0106413453 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 8 de enero del 2026

Atentamente,



Cristian Fernando León Zhagñay
0302723234



Bruno Vinicio Ortiz Cárdenas
0106413453

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A
LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Cristian Fernando León Zhagñay con documento de identificación N° 0302723234 y Bruno Vinicio Ortiz Cárdenas con documento de identificación N° 0106413453, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del proyecto técnico: “Diseño de cargadores de vehículos eléctricos a partir de sistemas fotovoltaicos de generación e integración con la red eléctrica de potencia”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 8 de enero del 2026

Atentamente,



Cristian Fernando León Zhagñay
0302723234



Bruno Vinicio Ortiz Cárdenas
0106413453

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N° 0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “Diseño de cargadores de vehículos eléctricos a partir de sistemas fotovoltaicos de generación e integración con la red eléctrica de potencia”, realizado por Cristian Fernando León Zhagñay con documento de identificación N° 0302723234 y por Bruno Vinicio Ortiz Cárdenas con documento de identificación N° 0106413453, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 8 de enero del 2026

Atentamente,



Ing. Jose Manuel Aller Castro, PhD
0151561800

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero agradecer a Dios. Él me dio la sabiduría, el entendimiento y la paciencia para sobrellevar toda mi etapa universitaria, y lo más importante: la vida. Agradezco por mi familia, mis amigos y mis profesores, sin los cuales nada de esto sería posible.

Quiero agradecer a mis padres, Cristian y Cecilia. Sin ellos nada de esto fuera posible, pues gracias a su esfuerzo y sacrificio he tenido la oportunidad de estudiar y culminar mi trabajo de titulación. Han sido mi apoyo incondicional, mis compañeros de vida, siempre presentes cuando más los necesitaba y brindándome un buen consejo en los momentos adecuados.

De igual manera, quiero agradecer a mis hermanas, Erika y María Eugenia, quienes me han apoyado a seguir adelante durante toda mi vida. Han sido un pilar fundamental para alcanzar mis metas y siempre he querido ser un buen ejemplo para ellas como hermano mayor.

También deseo expresar un profundo agradecimiento a mis abuelitos, quienes han sido como segundos padres para mí. Me han apoyado muchísimo en mis estudios y a lo largo de mi vida, siempre estando ahí cuando los necesito.

Quiero agradecer a mis amigos Bruno Ortiz, Bryam Pulla, Nicolás Guevera y Matías Morales, quienes fueron un gran apoyo durante mi etapa universitaria. No solo fueron amigos, sino que, en muchos casos, también fueron como profesores para mí, enseñándome cosas que no sabía o no entendía.

Finalmente, pero no menos importante, quiero expresar mi sincero agradecimiento al Ing. José Manuel Aller, quien nos acompañó durante toda la realización de este trabajo. Sin su paciencia, orientación y conocimientos, este proyecto no habría sido posible.

Cristian Fernando León Zhagñay

Agradezco profundamente a Dios, en especial al Divino Niño de Praga, por guiarme durante toda mi etapa como estudiante, brindándome sabiduría, fortaleza y enseñándome a valorar la vida.

Mi más sincero agradecimiento a mi familia, profesores y a una mujer especial que Dios puso en mi camino, quienes han sido un apoyo fundamental para alcanzar este logro.

De manera muy especial, agradezco a mi madre, Norma Cárdenas, la persona más importante de mi vida. Gracias a su esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional pude estudiar la carrera de Electricidad y culminarla con éxito. Ella ha sido siempre mi pilar, mi guía y mi mayor ejemplo.

Agradezco profundamente a mis abuelos, Hugo y Edelina, por su apoyo moral y económico, por sus consejos de vida y por estar presentes en los momentos más importantes.

Mi agradecimiento también es para Estefanía, por su paciencia, comprensión y apoyo durante la realización de este trabajo de titulación.

A toda mi familia, tíos y primos, gracias por su apoyo constante durante mi etapa universitaria; aunque ya no estemos completos, siempre los llevaré en lo más profundo de mi corazón.

De manera especial, agradezco a mis amigos Cristian León, compañero en este trabajo, así como a Bryam Pulla, Nicolás Guevara y Matías Morales, por su apoyo y compañerismo a lo largo de mis estudios.

Finalmente, expreso mi sincero agradecimiento al Ing. José Manuel Aller, por su paciencia, orientación y conocimientos brindados durante el desarrollo de este proyecto de titulación.

Bruno Vinicio Ortiz Cárdenas

DEDICATORIA

A Dios, quien ha sido un pilar fundamental en mi vida y me ha ayudado a alcanzar una meta más, la culminación de mi trabajo de titulación. Siempre ha estado conmigo, guiándome para superar las adversidades y obstáculos de la vida, y me ha bendecido con muchas cosas: en primer lugar, por permitirme estar aquí realizando este trabajo, por darme una gran familia, sin la cual nada de esto sería posible, y por darme amigos que me han acompañado y apoyado en todo momento.

A mi padre, quien trabajó arduamente para que todo esto fuera posible, siempre apoyándome en todo lo que deseaba lograr y siendo un pilar fundamental en mi vida.

A mi madre, cuyo amor y comprensión fueron esenciales para alcanzar este gran logro.

A mis hermanas, quienes siempre me brindaron apoyo, compañía, entendimiento y cariño para cumplir mis propósitos, y también a mi mascota, que fue un apoyo incondicional.

A todos mis amigos, no solo los que hice en la universidad Bruno Ortiz, Bryam Pulla, Nicolás Guevera y Matías Morales quienes me apoyaron en esta etapa de mi vida, enseñándome, ayudándome y compartiendo risas y anécdotas que quedarán siempre grabadas en mi mente y corazón; sino también a los amigos que he tenido a lo largo de mi vida, que siempre me han respaldado para alcanzar mis metas: Israel Romero, William Ortega, Jorge Sayago y Pedro González. Este trabajo va dedicado a todos ustedes. Siempre cuento con ustedes y deseo que también cuenten conmigo en todo momento.

Cristian Fernando León Zhagñay

A Dios, por darme la vida, la oportunidad de estudiar la carrera de mis sueños y dar un paso más en mi formación profesional, por bendecirme con una madre ejemplar, unos abuelos maravillosos, una familia unida y por poner en mi camino personas muy importantes para mi vida.

A mi madre de manera muy especial, por todo su esfuerzo, sacrificio, amor y comprensión. Gracias a ella fue posible alcanzar este logro, y no solo este trabajo sino esta profesión también es para ella.

A mis abuelos, por su apoyo incondicional, por su educación, consejos y por estar siempre presentes en mi camino.

A Estefanía, por su comprensión, cariño, paciencia y apoyo, incluso en mis peores momentos.

A mis amigos y compañeros Cristian León, Bryam Pulla, Nicolás Guevara y Matías Morales, por su sincera amistad, apoyo y por los momentos compartidos que siempre llevaré conmigo.

A William Guamán, amigo y casi hermano, por no dejarme solo, por estar conmigo en los momentos más difíciles y también en los más importantes de mi vida. Esta dedicatoria es para todos ustedes, con el deseo de que siempre puedan contar conmigo.

Bruno Vinicio Ortiz Cárdenas

RESUMEN

El proyecto se enfoca en el diseño y desarrollo de cargadores para vehículos eléctricos que utilizan sistemas fotovoltaicos como su principal fuente de energía. Estos cargadores aprovechan la energía solar para recargar las baterías de los vehículos eléctricos, ofreciendo una solución sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

El sistema está diseñado para integrarse con la red eléctrica, lo que permite complementar la carga en momentos en que la energía solar no es suficiente, como durante la noche o en días nublados. También facilita la inyección de excedentes de energía a la red, optimizando así la eficiencia y la gestión energética.

Este enfoque contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, promueve el uso de energías renovables y apoya la transición hacia un transporte más limpio y eficiente. El diseño abarca aspectos técnicos, como el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, el control del cargador, así como consideraciones económicas y ambientales que garantizan la viabilidad y sostenibilidad del proyecto.

ABSTRACT

This project focuses on the design of electric vehicle chargers powered by photovoltaic generation systems and their integration with the electrical power grid. The proposed solution harnesses solar energy to provide a sustainable and environmentally friendly charging option for [EVs](#), reducing dependence on conventional fossil fuels. The system incorporates grid connectivity to ensure continuous power supply, enabling energy exchange between the [PV](#) system and the grid to optimize performance and efficiency. Key design aspects include sizing of the [PV](#) array, power electronics for efficient energy conversion, control strategies for charging management.

This integration supports the advancement of clean transportation technologies and promotes the use of renewable energy sources, contributing to environmental conservation and energy sustainability.

PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS

Vehículos eléctricos

Cargadores de vehículos eléctricos

Sistemas fotovoltaicos

Integración a la red eléctrica

Energías renovables

Almacenamiento de energía

Modulación y control

Diseño de sistemas eléctricos

Impacto ambiental

Regulación y normativas eléctricas

ÍNDICE

1	Objetivos	7
1.1	Objetivo General	7
1.2	Objetivos Específicos	7
1.3	Alcance	7
1.4	Metodología	8
2	Marco Teórico	9
2.1	Vehículos Eléctricos	9
2.1.1	Desafíos y tendencias de los vehículos eléctricos en la actualidad	11
2.1.2	Innovación futura de los VE.	11
2.1.3	Componentes del Sistema de Baterías de los VE.	13
2.2	Paneles Solares.	13
2.3	Componentes principales del sistema solar fotovoltaico.	14
2.4	Proceso de Conversión Energética.	15
2.4.1	Eficiencia y Factores de Rendimiento.	17
2.5	Convertidores Buck-Boost	17
2.5.1	Estrategias de control.	18
2.5.2	Aplicaciones de los convertidores Buck-Boost.	18
2.5.3	Beneficios al utilizar estos convertidores.	19
2.5.4	Dificultades al utilizar estos convertidores.	19
2.6	Baterías	19
2.6.1	Ión-Litio.	20
2.6.2	Plomo Ácido.	20
2.6.3	Batería Redox de Vanadio.	20
2.7	Convertidores CC-CA.	20
2.7.1	Topologías y Estrategias de Control.	21
2.7.2	Modulación por ancho de Pulso PWM.	22
2.7.3	Aplicaciones.	22
2.7.4	Consideraciones al aplicar PWM.	23
2.8	Modulación por ancho de Pulso Sinusoidal SPWM.	23
2.8.1	Principio de operación del SPWM.	24
2.8.2	Ventajas al aplicar el SPWM.	24
2.8.3	Desventajas al aplicar el SPWM.	25
2.8.4	Aplicaciones del SPWM.	25
2.9	Bucle de enganche de fase PLL.	25
2.9.1	Componentes Esenciales.	25
2.9.2	Tipos de PLL.	26
2.10	Controlador Proporcional - Integral	27
2.10.1	Componentes del controlador PI	27

2.10.2	Ventajas del controlador PI	27
2.10.3	Sintonización del controlador PI	28
2.10.3.1	Ajuste de parámetros:	28
2.11	Programa ATP/EMTP.	28
2.12	Análisis de vehículos eléctricos para el dimensionamiento del sistema de carga.	29
2.13	Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para un cargador de vehículos eléctricos.	37
2.13.1	Bloque MODELS en ATPDraw	38
2.13.2	Fuente de Voltaje Continuo en ATPDraw.	39
2.13.3	Fuente de Voltaje Alterno en ATPDraw.	40
2.13.4	Bloque Fortran en ATPDraw.	41
2.13.4.1	Ventajas al usar el bloque Fortran:	41
2.13.5	Filtro LCL	42
2.13.6	Filtro pasa bajo.	42
2.13.7	Procedimiento aplicado en la simulación.	43
2.13.7.1	Dimensionamiento del inversor monofásico.	43
2.13.7.2	Modelación de un panel fotovoltaico.	45
2.13.7.3	Modelación del sistema MPPT para el panel fotovoltaico.	49
2.13.7.4	Bloque Generador de Pulsos a partir del <i>Duty Cycle</i> del MPPT.	51
2.13.7.5	Circuito elevador del panel solar fotovoltaico.	52
2.13.7.6	Integración del Panel Solar con el Convertidor elevador y Cálculo de Magnitudes Eléctricas.	53
2.13.7.7	Generación de la onda triangular mediante un bloque MODELS.	54
2.13.7.8	Modelación del SPWM mediante un bloque MODELS en AtpDraw.	57
2.13.7.9	Sistema de disparo de los transistores.	58
2.13.7.10	Potencia activa en la carga.	60
2.13.7.11	Voltaje Efectivo.	63
2.13.7.12	Corriente Efectiva.	63
2.13.7.13	Filtrado de la potencia de la carga.	64
2.13.7.14	Potencia Aparente y Reactiva con su signo correspondiente.	66
2.13.7.15	Controlador PLL	68
2.13.7.16	Controlador PI de la Potencia Activa y Potencia Reactiva.	70
2.13.7.17	Control de la onda de fundamental en amplitud y fase.	71
2.14	Análisis técnico-económico del proyecto.	73
2.14.1	Estimación de costos para el proyecto.	75
2.14.1.1	Costos de mantenimiento anual.	77
2.14.1.2	Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno y Periodo de recuperación de la Inversión.	78
3	Resultados	84
3.1	Resultados de la modelación del sistema fotovoltaico en ATPDraw.	84

3.1.1	Curvas $I - V$ y $P - V$ del arreglo FV.	84
3.1.2	Variación de potencia generada con irradiancia y temperatura.	84
3.1.3	Potencia entregada al inversor.	84
3.1.4	Parámetros para el correcto funcionamiento del inversor.	84
	3.1.4.1 Generación de la onda sinusoidal.	84
	3.1.4.2 Generación de la onda triangular.	88
	3.1.4.3 Generación de la señal del SPWM.	88
	3.1.4.4 Voltaje en el inversor	88
3.1.5	PLL	88
3.1.6	Voltaje del inversor con respecto al voltaje de la red	88
3.1.7	Parámetros Eléctricos del Sistema y Cálculo de Potencias	93
3.1.8	Potencia activa y reactiva controladas	93
4	Análisis de resultados	100
4.1	Resultados de la modelación del sistema fotovoltaico en ATPDraw.	100
4.2	Resultados obtenidos del funcionamiento del inversor.	100
4.3	Resultados obtenidos del PLL.	102
4.4	Análisis comparativo de la tensión en el inversor con respecto al voltaje en la red	102
4.5	Interpretación de los parámetros Eléctricos del Sistema y del Cálculo de Potencias	103
4.6	Evaluación del desempeño de las potencia activa y reactiva controladas	103
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Sistema FV usado para cargar VE.	10
2.2	Vehículo eléctrico.	10
2.3	Curva P-V típica de los paneles solares fotovoltaicos.	14
2.4	Celdas FV.	15
2.5	Módulos FV.	16
2.6	Inversores FV.	16
2.7	Esquema del sistema Buck-Boost.	17
2.8	Esquema convertidor CC-CA.	21
2.9	Forma de onda Modulación por ancho de pulso PWM.	22
2.10	Forma de onda Modulación por ancho de pulso Sinusoidal SPWM.	24
2.11	Bucle de enganche de fase PLL.	26
2.12	Vehículo eléctrico BYD Dolphin.	29
2.13	Vehículo eléctrico BYD Tang EV.	30
2.14	Vehículo eléctrico BYD Yuan Plus.	30
2.15	Vehículo eléctrico BYD Yuan Yuan EV 400.	32
2.16	Vehículo eléctrico Nissan Leaf.	32
2.17	Vehículo eléctrico Renault Twizy.	33
2.18	Vehículo eléctrico Kia EV6.	33
2.19	Vehículo eléctrico Kia Niro.	35
2.20	Vehículo eléctrico Kia EV9.	35
2.21	Vehículo híbrido Toyota Rav4 plug in hybrid.	36
2.22	Vehículo eléctrico JAC E30X.	37
2.23	Vehículo eléctrico JAC e-JS1.	38
2.24	Bloque MODELS en ATPDraw	38
2.25	Fuente DC en ATPDraw.	40
2.26	Fuente AC en ATPDraw.	40
2.27	Bloque Fortran en ATPDraw	41
2.28	Filtro LCL.	42
2.29	Filtro Pasa Bajo.	42
2.30	Ajuste del transformador con relación 1:1	45
2.31	Programación del circuito del inversor en ATPDraw	46
2.32	Modelación del panel Fotovoltaico en ATPDraw	46
2.33	Parámetros de la temperatura para el panel Fotovoltaico en ATPDraw	47
2.34	Parámetros de la irradiancia para el panel Fotovoltaico en ATPDraw	47
2.35	Modelo del MPPT en ATPDraw	49
2.36	Generador de pulso a partir del ciclo de trabajo en ATPDraw	51
2.37	Circuito elevador de voltaje en ATPDraw	53
2.38	Integración del Panel Solar con el Convertidor elevador en ATPDraw	53
2.39	Bloque MODELS encargado de generar de señal triangular.	55

2.40	Modelación del generador de disparo de los transistores mediante el algoritmo SPWM.	57
2.41	Model de control de disparos.	59
2.42	Model de Potencia en la carga.	61
2.43	TAC RMS Voltaje.	63
2.44	TAC RMS Corriente.	64
2.45	Model Potencia Aparente, Reactiva.	66
2.46	MODEL PLL.	69
2.47	Controladores de la Potencia Activa y Reactiva.	71
2.48	Bloque MODELS generador señal sinusoidal.	72
2.49	Periodo de recuperación prolongado de inversión.	83
3.1	Característica $P - V$ del panel FV.	85
3.2	Característica $I - V$ del panel FV.	85
3.3	Temperatura modelada para el panel FV.	86
3.4	Irradiancia modelada para el panel FV.	86
3.5	Potencia obtenida por el panel FV.	87
3.6	Potencia entregada por el panel FV al inversor.	87
3.7	Onda sinusoidal de referencia a 60 Hz	88
3.8	Onda triangular generada.	89
3.9	Generación de la señal SPWM.	89
3.10	Transformada de Fourier de la señal SPWM.	90
3.11	Voltaje en el inversor después del filtro pasa bajo.	90
3.12	Voltaje en el inversor con respecto al SPWM.	91
3.13	Frecuencia monitoreada por el PLL.	91
3.14	Angulo de fase monitoreado por el PLL.	92
3.15	Voltaje del inversor con respecto al Voltaje de la Red.	92
3.16	Voltaje V_{ab} con respecto al Voltaje V_{abrms}	93
3.17	Corriente I_{carga} con respecto a la corriente I_{crms}	94
3.18	Voltaje V_{inv} con respecto al Voltaje V_{invrms}	94
3.19	Potencia Aparente S	95
3.20	Potencia Activa P	95
3.21	Potencia Reactiva Q	96
3.22	Potencias S , P y Q del sistema.	96
3.23	Referencia de las Potencias P y Q . del sistema.	97
3.24	Señal Sinusoidal controlada.	97
3.25	Voltaje del inversor con respecto al voltaje de la red.	98
3.26	Potencia activa P controlada.	98
3.27	Potencia Reactiva Q controlada.	99

Índice de tablas

2.1	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico BYD Dolphin.	31
2.2	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico BYD Tang EV.	31
2.3	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico BYD Yuan Plus.	31
2.4	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico BYD Yuan EV 400.	31
2.5	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico Nissan LEAF.	34
2.6	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico Renault Twizy.	34
2.7	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico Kia EV6.	34
2.8	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico Kia Niro.	34
2.9	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico Kia EV9.	36
2.10	Especificaciones técnicas del vehículo híbrido Toyota Rav4 plug in hybrid.	36
2.11	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico JAC E30X.	37
2.12	Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico JAC e-JS1.	37
2.13	Costos estimados del sistema fotovoltaico residencial.	77
2.14	Costos estimados de mantenimiento anual del sistema fotovoltaico.	77
1	Áreas del Trabajo de Grado	125

GLOSARIO

ATP Por sus siglas en ingles *Alternative Transients Program*.

BESS Sistemas de Almacenamiento de Energía en Baterías.

BMS Sistamas de Gestión de Baterías.

Boost Elevador de voltaje.

BPA Administración de Energía Bonneville.

Buck Reductor de Voltaje.

Buck-Boost Sistema Buck-Boost o sistema elevador-reductor de voltaje.

CA Corriente Alterna.

CC Corriente Continua.

COE Costo de Energía.

DAB Puente Activo Dual.

DCG Grupo de Coordinación de Desarrollo.

EMTP Por sus siglas en ingles *Electromagnetic Transients Program*.

EVs *Electric Vehicles*.

FV Fotovoltaico.

IGBTs Transistores Bipolares de Puerta Aislada.

ki *Ganancia Integral*.

kp *Ganancia Proporcional*.

LFP Fosfato de Hierro de Litio.

Li-ion Ión de Litio.

MMC Convertidores Multinivel Modulares.

MOSFETs Transistores de Efecto de Campo de Óxido Metálico Semiconductores.

MPC Control Predictivo por Modelo.

MPPT *Seguimiento del Punto de Máxima Potencia.*

NCA Níquel Cobalto Aluminio.

NiMH Hidruro Metálico de Níquel.

OPV Células Fotovoltaicas Orgánicas.

PD *Detector de Fase.*

PI *Proporcional-Integral.*

PID Controlador Proporcional-Integral-Derivativo.

PLD Dispositivo Lógico Programable.

PLL *Bucle de Enganche de Fase.*

PMP Punto de Maxima Potencia.

PSC Células Solares de Perovskita.

PV *Photovoltaic.*

PWM Modulación por Ancho de Pulsos.

RMS Valor efectivo.

SPWM *Modulación por Ancho de Pulso Sinusoidal.*

THD Distorsión Armónica Total.

TIR Tasa Interna de Retorno.

VAN Valor Actual Neto.

VCO *Oscilador Controlado por Voltaje.*

VE Vehículos eléctricos.

RESUMEN

El trabajo de titulación desarrolla el diseño y desarrollo de cargadores para vehículos eléctricos que emplean sistemas fotovoltaicos como fuente principal de energía. Estos cargadores aprovechan la energía solar para recargar baterías de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Además, el sistema se integra con la red eléctrica, permitiendo complementar la carga en ausencia de suficiente generación solar y facilitando la inyección de excedentes energéticos a la red. Este enfoque contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, fomenta el uso de energías renovables y apoya la transición hacia un transporte más limpio y eficiente. El diseño incluye aspectos técnicos, económicos y ambientales, garantizando la viabilidad y sostenibilidad del proyecto.

Palabras clave: Cargadores para vehículos eléctricos, sistemas fotovoltaicos, energía solar, integración con la red eléctrica, viabilidad técnica y económica.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad energética se ha convertido en un desafío crucial en el contexto actual de transición hacia fuentes de energía limpias y renovables. Este proceso es esencial para abordar los desafíos del cambio climático y garantizar una fuente de energía sostenible a largo plazo [1]. Con el creciente uso de vehículos eléctricos, se hace imperativo desarrollar soluciones innovadoras que aseguren la eficiencia energética y reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles [2]. En este sentido, el diseño de cargadores para vehículos eléctricos basados en sistemas fotovoltaicos como fuente principal de energía surge como una alternativa prometedora para impulsar tecnologías sostenibles y respetuosas con el medio ambiente [3].

En la actualidad, la preocupación por el cambio climático y la sostenibilidad ha alcanzado niveles sin precedentes, impulsando una transformación significativa en la generación de electricidad y en los modos de movilidad. El uso de combustibles fósiles ha suscitado importantes preocupaciones debido a las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ha llevado a la urgente necesidad de buscar alternativas más limpias y eficientes [4]. Como resultado, han emergido los vehículos eléctricos **VE** y la generación solar fotovoltaica **FV** como dos soluciones efectivas para mitigar este problema [5, 6].

Los **VE** tiene una trayectoria histórica que se remonta a la década de 1830, cuando Ányos Jedlik realizó avances significativos en el desarrollo de uno de los primeros motores eléctricos en 1828, para 1880 se iniciaron las primeras manufacturas de automóviles eléctricos en diversas industrias [7, 8, 9].

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, los **VE** alcanzaron su cúspide de popularidad en Estados Unidos, representando en 1900 más de un tercio del parque automotor en metrópolis como Nueva York, Chicago y Boston [10]. Esta preferencia se atribuye a su operación silenciosa y libre de vibraciones, así como a la ventaja de no requerir cambios de marcha, contrastando favorablemente con los vehículos de combustión interna [7].

La energía solar **FV** ha experimentado un desarrollo significativo, convirtiéndose en una de las fuentes de energía renovable más prometedoras y accesibles. Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico en 1839. Posteriormente, los laboratorios Bell presentaron un dispositivo **FV** solar en 1953 [11, 12]. Tras la presentación de estos

paneles solares **FV** por parte de Bell Labs, este invento comenzó a utilizarse en tecnología espacial, principalmente en satélites, debido a la carrera espacial de aquella época [13]. En la denominada primera generación, estos paneles solares **FV** estaban compuestos por silicio cristalino, que en la década de 1950 ofrecía una eficiencia del 15%. Posteriormente, en la década de 1970, alcanzaron una eficiencia del 17% [14]. En la segunda generación de estos paneles **FV**, se optó por utilizar la tecnología de película delgada, compuesta por los siguientes materiales: silicio amorfo, telurio de cadmio y selenuro de cobre, indio y galio. Esto permitió reducir los costos de producción y aumentar la flexibilidad en las aplicaciones de estos paneles solares [15]. En la tercera generación, se comenzaron a utilizar tecnologías avanzadas, como las células fotovoltaicas orgánicas **OPV** y las células solares de perovskita **PSC**. Las **OPV** se caracterizan por su ligereza y flexibilidad; sin embargo, enfrentan dificultades en términos de eficiencia y estabilidad [16]. Las células solares de perovskita **PSC** han demostrado poseer una 24% de eficiencia [17].

A partir del año 2000, la utilización de estos paneles solares **FV** ha aumentado significativamente, impulsada por potencias mundiales como Alemania, China, Estados Unidos y España, que han liderado en la incorporación de estas tecnologías para la generación de energía. Este crecimiento ha sido notable, registrando una tasa anual del 35% al 40%. Esta tasa indica que el mercado de paneles solares se está expandiendo significativamente en términos de capacidad, demanda y ventas [13]. Es importante señalar que el costo de los sistemas de paneles solares **FV** ha disminuido con respecto a años anteriores de la década del 2010, con una reducción cercana al 60%. Esta disminución se debe a los avances científicos y la aparición de nuevas tecnologías, lo que permite que la generación solar compita con las fuentes de generación de energía convencionales en muchas regiones [18]. Actualmente, la investigación se centra en mejorar la eficiencia y reducir los costos de los paneles solares, explorando el uso de puntos cuánticos y nanocables. Estas innovaciones podrían contribuir de manera significativa a aumentar la eficiencia y la conversión de energía [14]. Es fundamental destacar la curva $P - V$ de los paneles solares **FV**, porque ilustra la relación entre la potencia de salida y el voltaje del panel. Esta curva es esencial para identificar el punto de máxima potencia **PMP**, que señala el momento en que el panel solar funciona con la mayor eficiencia [19]. En la actualidad, se han llevado a cabo estudios que abordan la implementación de un seguidor solar. Este sistema ajusta los paneles solares para que se mantengan perpendiculares a la trayectoria del sol, optimizando así la captación de energía solar [20].

En los sistemas de generación solar, es fundamental contar con convertidores **Buck-Boost**, debido a que desempeñan un papel crucial en la optimización del rendimiento de estos sistemas. Al integrar este tipo de convertidor con paneles solares, se puede ajustar y mantener un voltaje de salida adecuado en diversas

condiciones de irradiación solar y carga. Son especialmente útiles en situaciones de sombreado parcial, donde la producción de energía puede verse comprometida [21, 22]. Estos convertidores Buck-Boost de corriente continua CC tienen la capacidad de aumentar Boost o reducir Buck el voltaje de entrada. Esto permite ajustar el voltaje de salida del convertidor para que sea más alto o más bajo, según sea necesario. Este proceso se realiza al modificar el ciclo de trabajo del interruptor en el interior del convertidor [23] [24]. Estos convertidores Buck-Boost están compuestos por un inductor, un capacitor, un diodo e interruptores. La disposición de estos elementos puede variar, dando lugar a diversas topologías de conexión para estos dispositivos [23, 25]. Las topologías varían según su aplicación específica, y entre ellas se encuentran: no aisladas, aisladas, bidireccionales y basadas en resonancia [26, 27].

De igual manera los convertidores bidireccionales de corriente continua CC a corriente alterna CA son indispensables en sistemas de generación solar FV, debido a que son una tecnología ampliamente utilizada en diversos campos, como sistemas de almacenamiento de energía, vehículos eléctricos y sistemas de energía renovable conectados a la red. El uso de estos convertidores posibilita el flujo de energía en ambas direcciones, lo que favorece una gestión eficiente de la energía e integra de manera efectiva con la red eléctrica. Estos convertidores se componen de varios elementos, incluyendo una batería, un filtro en el lado de CC, un inductor para el almacenamiento de energía, un capacitor de bus, un puente inversor asimétrico, un filtro en el lado de CA y una conexión a la red [28].

Los convertidores bidireccionales modernos presentan una alta eficiencia, alcanzada mediante diseños y topologías innovadoras. Por ejemplo, un arreglo de tótem sin puente puede superar el 99% de eficiencia, lo que lo convierte en una opción adecuada tanto para operaciones aisladas como para la conexión a la red [29].

Actualmente, existen medidores bidireccionales que registran tanto la electricidad consumida de la red local como la que es suministrada por el sistema de generación fotovoltaica [30]. Estos medidores permiten registrar lo siguiente [30]:

1. La energía suministrada, es decir la energía que suministra la red local.
2. La energía neta que genera el sistema FV.
3. Los excedentes que no se utiliza y se envían a la red local.

Las baterías desempeñan un papel fundamental en la integración de instalaciones fotovoltaicas, debido a que poseen la capacidad esencial de almacenar la energía generada por dichos sistemas. Es importante que estas baterías sean compatibles con la red eléctrica existente, lo que facilita una interacción eficiente y efectiva con el sistema energético general.

Para evaluar un banco de baterías que pueda integrarse a un sistema de paneles solares y que, a su vez, sea compatible con la red eléctrica, es esencial examinar varios aspectos significativos, que abarcan los tipos de baterías, las estrategias de integración y los sistemas de gestión.

Los Sistemas de Almacenamiento de Energía en Baterías **BESS** desempeñan un rol fundamental al almacenar el excedente de energía generada por los paneles fotovoltaicos, liberándola en momentos de demanda para garantizar un suministro energético estable y confiable [31, 32, 33].

Para la integración efectiva de estos sistemas fotovoltaicos y de almacenamiento con la infraestructura de la red eléctrica, se implementan Convertidores Multinivel Modulares **MMC**, que proporcionan flexibilidad y control sobre el flujo de energía, optimizando así la gestión de la electricidad [31, 32].

Se utilizan estrategias de control que incorporan algoritmos avanzados para regular el flujo de energía, maximizar el aprovechamiento de los recursos energéticos y mantener la estabilidad de la red, aspectos esenciales para el funcionamiento eficiente de los sistemas energéticos contemporáneos [34].

El Costo de Energía **COE** se considera un factor fundamental para evaluar el impacto económico de distintas tecnologías de almacenamiento en baterías, con el objetivo de identificar las soluciones más eficientes y rentables para la integración de la energía solar en la red eléctrica [35]. De igual manera, la incorporación de fuentes de energía renovable en esta infraestructura desempeña un papel crucial en la disminución de la dependencia de combustibles fósiles, contribuyendo a la mitigación de diversos problemas ambientales y promoviendo un enfoque más sostenible en la generación y el consumo energético [33].

El desarrollo y la optimización de la infraestructura de carga de vehículos eléctricos son fundamentales para la adopción masiva de esta tecnología, la cual ofrece beneficios ambientales significativos, como la reducción de la contaminación del aire y una mayor eficiencia energética [36, 37]. Existen diversos tipos de cargadores para VE, incluyendo los de Nivel 1, Nivel 2 y carga rápida en corriente continua, que se adaptan a diferentes necesidades y escenarios de carga, desde el uso residencial hasta la carga pública rápida [38, 39]. La integración de tecnologías inteligentes, como los sistemas de gestión de energía y la conectividad con la red, mejora la eficiencia y la experiencia del usuario en la carga de los VE [39, 40]. La infraestructura de carga debe expandirse para responder a la creciente demanda, especialmente en el caso de vehículos comerciales de gran tamaño, los cuales actualmente cuentan con opciones públicas limitadas de carga. La ubicación de las estaciones de carga puede optimizarse utilizando patrones históricos de conducción y modelos de simulación, con el fin de asegurar que las áreas de alta demanda estén adecuadamente atendidas [36]. Además, la evolución de los cargadores de VE incluye avances en sistemas de

carga inalámbrica e inductiva, que incrementan la velocidad y la eficiencia de los procesos de carga [39, 40].

La estandarización de los protocolos de carga y la interoperatividad entre diferentes regiones y tipos de vehículos son esenciales para lograr una integración fluida y una mayor comodidad para el usuario. Por ejemplo, los cargadores más comunes en Estados Unidos, la Unión Europea y China son los estándares J1772, Mennekes y GB/T, respectivamente [41]. El crecimiento de los VE también exige abordar los problemas de calidad de la energía, como las emisiones armónicas, que pueden mitigarse mediante diseños avanzados de cargadores, incluyendo aquellos que incorporan redes neuronales artificiales [42].

La integración del VE con la red eléctrica considera el conjunto de estrategias que permiten la operación conjunta del sistema de transporte eléctrico con el sistema de potencia. Este vínculo incluye además de la recarga de baterías, la posibilidad de que los VE apoyen a la red mediante servicios tales como la regulación de frecuencia, el control de voltaje y la gestión de la demanda energética, beneficiando a ambos sectores. Este concepto abarca desde la carga controlada de vehículos eléctricos, donde el proceso de recarga se gestiona de acuerdo con las condiciones de la red, hasta la implementación de la tecnología más avanzada conocida como vehículo a red *V2G*, *Vehicle-to-Grid*. Esta última posibilita un flujo bidireccional de energía, de manera que el VE no solo consume electricidad, sino que también puede entregar energía almacenada a la red, desempeñando el papel de un sistema de almacenamiento distribuido que contribuye al equilibrio y estabilidad del sistema eléctrico [43, 44].

La integración de la tecnología fotovoltaica y los vehículos eléctricos en la red eléctrica presenta tanto desafíos como oportunidades. La variabilidad e incertidumbre de la generación fotovoltaica, sumadas a la demanda fluctuante de la carga de los VE, pueden ocasionar problemas de estabilidad en la red, tales como fluctuaciones de tensión y frecuencia, así como fenómenos de sobretensión y subtensión [45, 46, 47]. Sin embargo, mediante innovaciones estratégicas y sistemas de control avanzados, estos desafíos pueden ser mitigados. Por ejemplo, los sistemas de almacenamiento de energía y los inversores inteligentes aumentan la resiliencia de la red al gestionar los flujos de potencia y estabilizar la tensión [46, 48].

La sinergia entre la generación fotovoltaica y los VE puede optimizarse mediante algoritmos inteligentes de carga y técnicas de gestión de la demanda, que ayudan a equilibrar la oferta y la demanda, reducir pérdidas eléctricas y mejorar la eficiencia global [49, 50, 51]. Asimismo, la incorporación de analítica de grandes datos y algoritmos de aprendizaje por refuerzo refuerza la capacidad de monitoreo, análisis y predicción del comportamiento de la red, garantizando un sistema eléctrico más confiable y eficiente [48, 50].

El objetivo de esta investigación consiste en fomentar el uso de energías renov-

ables en el sector transporte y contribuir a la reducción de emisiones contaminantes, promoviendo un modelo energético más limpio, eficiente y sostenible.

Este proyecto se centra en el diseño de un sistema de cargadores para vehículos eléctricos que aprovecha la energía solar mediante un arreglo fotovoltaico, logrando una integración eficiente con la red eléctrica de potencia. El objetivo principal es que el sistema pueda operar de manera flexible: por un lado, utilizar la energía solar disponible durante las horas de mayor irradiancia para alimentar el proceso de carga, utilizando la red en momentos de baja generación, durante los días nublados o en la noche. De igual forma, cuando exista un excedente de energía, el sistema puede inyectarlo a la red, mejorando la eficiencia global y contribuyendo a una gestión energética más equilibrada.

En el contexto ecuatoriano, la implementación de sistemas fotovoltaicos acoplados a infraestructura de carga para vehículos eléctricos está en pleno desarrollo, y es necesario continuar en esta línea para obtener mayores beneficios ambientales, operativos y económicos que esta alternativa puede ofrecer. Esto representa una oportunidad importante tanto para avanzar hacia una movilidad más limpia como para diversificar las fuentes de generación eléctrica. Por esta razón, el presente trabajo se plantea como un aporte técnico, proponiendo un sistema que integra criterios de diseño, control y análisis económico-ambiental, con el fin de demostrar su factibilidad y su potencial para ser aplicado en escenarios residenciales.

Además, este proyecto desarrolla una base metodológica que permita contemplar futuras soluciones de carga sustentables, aprovechando las capacidades de la energía solar y la infraestructura eléctrica existente, contribuyendo así al proceso de transición hacia energías renovables y movilidad eléctrica en el país.

En este trabajo, después de la presente introducción, se ha dividido este informe técnico en cinco capítulos. En el Capítulo 1 se definen el objetivo general y los objetivos específicos de este proyecto, los cuales orientan el diseño y análisis de un sistema de carga para vehículos eléctricos alimentado por energía fotovoltaica e integrado a la red. En el Capítulo 2 se desarrolla el marco teórico, abarcando los principios de generación fotovoltaica, conversión de potencia, normativas aplicables y criterios de diseño necesarios para garantizar un sistema eficiente y compatible con la red eléctrica. En el Capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones y mediciones del sistema diseñado. En el Capítulo 4 se analizan los resultados, evaluando el desempeño del sistema en términos de eficiencia, estabilidad y calidad de energía, además de discutir desviaciones y sus posibles causas. Finalmente en el Capítulo 5 se desarrollan las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado. Adicionalmente se presentan en los Anexos correspondientes, los contenidos ABET desarrollados en este trabajo así como las consideraciones de los perfiles de salida de la carrera de electricidad, contenidos en la investigación realizada.

CAPÍTULO 1

Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de cargadores para vehículos eléctricos que utilice energía fotovoltaica, con capacidad para su integración con la red eléctrica existente, promoviendo el uso de energías renovables y mejorando la eficiencia en el proceso de carga de vehículos eléctricos.

1.2 Objetivos Específicos

- Modelación del sistema de generación, almacenamiento y suministros de energía en un sistema combinado.
- Análisis o evaluación de diferentes estrategias de control y operación del sistema propuesto.
- Estudio de la factibilidad técnico-económico de la alternativa propuesta.

1.3 Alcance

El presente proyecto se centrará en el diseño preliminar de un sistema de carga para vehículos eléctricos basado en energía fotovoltaica y su integración con la red eléctrica de potencia. El alcance incluye el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, el diseño del cargador que combine energía solar y red eléctrica, y la evaluación de la viabilidad técnica, económica y ambiental mediante el análisis de los costos de implementación del sistema en escenarios residenciales, considerando los componentes principales, las condiciones de operación y el impacto asociado al uso de energía fotovoltaica como fuente de suministro. Además, se analizará la posibilidad de inyectar excedentes de energía a la red, optimizando la gestión energética. Este trabajo se limitará a las etapas de diseño, simulación y análisis, sin incluir la implementación física del sistema.

1.4 Metodología

La metodología empleada en este trabajo se estructura en tres fases: La primera corresponde a la modelación del sistema de generación fotovoltaica, almacenamiento y suministro de energía, integrando la red eléctrica y la carga de vehículos eléctricos en un esquema combinado. La segunda abarca el análisis y evaluación de diferentes estrategias de control y operación del sistema, incluyendo la regulación de potencia activa y reactiva mediante controladores PI, así como la integración segura con la red. La tercera comprende el estudio de factibilidad técnico-económica de la alternativa propuesta, basado en el análisis de los costos de implementación del sistema en un entorno residencial, así como en la evaluación del desempeño energético y del potencial de reducción de impactos ambientales asociados al uso de energía fotovoltaica. Las herramienta de simulación empleada, es el programa especializado ATPDraw.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

En tiempos recientes, el uso de vehículos eléctricos **VE** ha cobrado gran relevancia como respuesta al cambio climático. En este contexto, se han llevado a cabo investigaciones para evaluar la viabilidad de su adopción en diferentes sectores locales. Los resultados de estos estudios indican que la incorporación de vehículos eléctricos conduce a un transporte más eficiente, amigable con el medio ambiente y optimiza el aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles en el país. [52].

El uso creciente de **VE** ha generado un desafío significativo en relación con la carga de sus sistemas de almacenamiento de energía. Para enfrentar esta problemática, se han explorado diversas alternativas. En este caso, se propone un diseño de sistema de energía **FV** que facilite la carga de estos vehículos. Este sistema no solo es capaz de cargar las baterías de los **VE**, sino que también puede aportar potencia a la red eléctrica, la propuesta del diseño se puede observar en la Fig. 2.1.

2.1 Vehículos Eléctricos

El concepto de vehículo eléctrico **VE**, el cual se puede observar en la Fig. 2.2, se remonta a la década de 1830, cuando Joseph Henry presentó el primer motor alimentado por **CC**. Posteriormente, en 1835, el profesor Stratingh desarrolló el primer prototipo de **VE** en los Países Bajos [53]. En 1847, Thomas Davenport, en los Estados Unidos, desarrolló un **VE**, seguido por Moses Farmer, quien diseñó un **VE** para dos pasajeros. [53]. Durante los años de 1865-1881, Gaston Plante desarrolló baterías recargables y posteriormente Camille Faure mejoró las mismas, lo cual hizo que los **VE** sean más viables [53].

En 1890 William Morrison construyó un vehículo eléctrico, y para principios del año 1900 aproximadamente el 40% de vehículos eran eléctricos [54]. Durante principios de 1900 los **VE** alcanzaron una gran popularidad en los Estados Unidos superando en ventas a todos los demás vehículos, debido a sus ventajas, como la ausencia de ruido, vibraciones, olores y la facilidad de conducción sin cambios de marcha [7]. Desde los años 1920, la optimización de la infraestructura vial y el incremento en la producción de vehículos de combustión interna, promovido en ese periodo por



Figura 2.1: Sistema FV usado para cargar VE.



Figura 2.2: Vehículo eléctrico.

Henry Ford, resultaron en una significativa contracción del mercado de los VE. La creciente demanda de automóviles con mayor autonomía y la competitividad de los vehículos propulsados por combustibles fósiles fueron factores determinantes en este declive [7] [8].

En 1930, los VE casi habían desaparecido debido al dominio que tenían los vehículos de gasolina [8]. Durante la década de los 60, los VE resurgieron debido a las preocupaciones ambientales causada por la contaminación de los vehículos con motor de combustión interna [55]. Para los años 2000, los avances tecnológicos, las demandas ambientales y el cambio en las preferencias de los consumidores han llevado a que los VE vuelvan a ser parte del mercado [56]. Los principales fabricantes de automóviles han introducido nuevos modelos de VE, aunque los altos precios han sido un obstáculo para su adopción generalizada [57].

Sin embargo, en la actualidad, se ha manifestado un renovado interés por los VE, impulsado por la necesidad de desarrollar soluciones de transporte más eficientes y sostenibles. Este resurgimiento ha sido facilitado por avances tecnológicos en materiales para máquinas eléctricas, semiconductores de potencia, sistemas de almacenamiento de energía y gestión térmica, lo que ha contribuido a la revitalización del sector [10, 58].

2.1.1 Desafíos y tendencias de los vehículos eléctricos en la actualidad

A través del tiempo, los desafíos en el ámbito electro-químico han constituido una limitación considerable para los VE, siendo la búsqueda de baterías más eficientes y de mayor durabilidad un reto de suma importancia [9, 59].

La escasez de recursos y la insuficiencia de infraestructura de carga adecuada se presentan como un impedimento significativo para la adopción masiva de estos automóviles, lo que subraya la necesidad de optimizar dicha infraestructura para asegurar su viabilidad futura [58, 60].

Aunque los VE son percibidos como una alternativa potencialmente ecológica, es fundamental gestionar de manera rigurosa los impactos ambientales vinculados a la fabricación y reciclaje de baterías, a fin de garantizar que su implementación sea efectivamente sostenible [58, 59].

2.1.2 Innovación futura de los VE.

Para fomentar la innovación en el ámbito de los VE, es fundamental implementar modificaciones sustanciales en la eficiencia de los sistemas de propulsión. Esto incluye la optimización de los motores eléctricos y el desarrollo de algoritmos de control avanzados. La mejora en estos aspectos no solo potenciará el rendimiento general del vehículo, sino que también incrementará su fiabilidad operativa. A través de la

integración de tecnologías de vanguardia en la gestión del rendimiento y la interacción entre componentes, se podrá alcanzar un nivel superior de eficiencia energética y sostenibilidad, contribuyendo así a la evolución del sector automotriz hacia un futuro más eficiente y eco-amigable [58, 61].

Los VE utilizan predominantemente diversos tipos de baterías para satisfacer las demandas de alta densidad de energía, carga eficiente y larga vida útil del ciclo. Tecnologías de baterías más destacadas actualmente utilizadas en los VE:

- Baterías de ion-litio **Li-ion**: Es la batería mas utilizada en los VE, debido a su alta densidad de energía y larga vida útil y eficiencia [62, 63]. Incluye varios subtipos como fosfato de hierro de litio **LFP**, níquel cobalto aluminio **NCA** y baterías de litio-azufre [63, 64].

Ventajas:

1. Alta densidad de energía y salida de potencia [65, 66].
2. Larga vida útil del ciclo y baja tasa de auto-descarga [64, 67].
3. Capacidades de carga rápida [65, 68].

Desventajas:

1. Alto costo y preocupaciones de seguridad, incluidos los riesgos de fuga térmica e incendio [69, 70].
 2. Degradación a lo largo del tiempo, afectando el rendimiento a largo plazo [68].
- Baterías de Hidruro Metálico de Níquel **NiMH**: Anteriormente eran muy utilizadas, en la actualidad son menos comunes en comparación con las baterías de **Li-ion** [71, 72].

Ventajas:

1. Menor costo en comparación con las baterías de **Li-ion** [68, 72].
2. Buen rendimiento en términos de vida útil del ciclo y seguridad [68].

Desventajas:

1. Menor densidad de energía y relación potencia-peso que las baterías de **Li-ion** [68].
- Baterías de Plomo-Ácido: Una de las tecnologías de batería más antiguas, ahora en gran parte reemplazada por las baterías modernas [71, 72].

Ventajas:

1. Bajo costo y alta disponibilidad [72].

Desventajas:

1. Muy baja densidad de energía y corta vida útil del ciclo. [72].

2.1.3 Componentes del Sistema de Baterías de los VE.

- Paquetes de Baterías: Compuestos por múltiples celdas como: cilíndricas, prismáticas o tipo pouch e incluyen componentes como sistemas de refrigeración y sistemas de gestión de baterías BMS para garantizar un rendimiento y seguridad óptimos [64].
- Baterías Auxiliares: Los VE a menudo utilizan baterías secundarias de 12 V y 48 V para sistemas de distribución [73].

2.2 Paneles Solares.

La energía solar FV ha experimentado un notable avance, convirtiéndose en una de las fuentes de energía renovable más prometedoras y accesibles. El efecto FV fue descubierto por Becquerel en 1839. Más tarde, en 1953, los laboratorios Bell introdujeron un dispositivo solar fotovoltaico [11, 12]. Después de que Bell Labs presentó estos paneles solares FV, este invento empezó a aplicarse en tecnología espacial, especialmente en satélites, en el contexto de la competencia espacial de ese tiempo [13]. En lo que se conoce como la primera generación, estos paneles solares FV estaban fabricados con silicio cristalino, el cual ofrecía una eficiencia del 15% en la década de 1950. Más tarde, en la década de 1970, su eficiencia aumentó al 17% [14]. En la segunda generación de estos paneles, se eligió la tecnología de película delgada, que está compuesta por materiales como silicio amorfo, telurio de cadmio y selenuro de cobre, indio y galio. Esta elección permitió disminuir los costos de producción y mejorar la flexibilidad en las aplicaciones de los paneles solares [15]. En la tercera generación, se comenzaron a utilizar tecnologías avanzadas, como las células fotovoltaicas orgánicas OPV y las células solares de perovskita PSC. Las OPV se caracterizan por su ligereza y flexibilidad; sin embargo, enfrentan dificultades en términos de eficiencia y estabilidad [16]. Las células solares de perovskita PSC han demostrado poseer una 24% de eficiencia [17].

Desde el año 2000, el uso de estos paneles solares FV ha crecido de manera considerable, impulsado por potencias globales como Alemania, China, Estados Unidos y España, que han sido pioneras en la adopción de estas tecnologías para la generación de energía. Este crecimiento ha sido destacado, con una tasa anual que oscila entre el 35% y el 40%. Esta cifra refleja que el mercado de paneles solares está

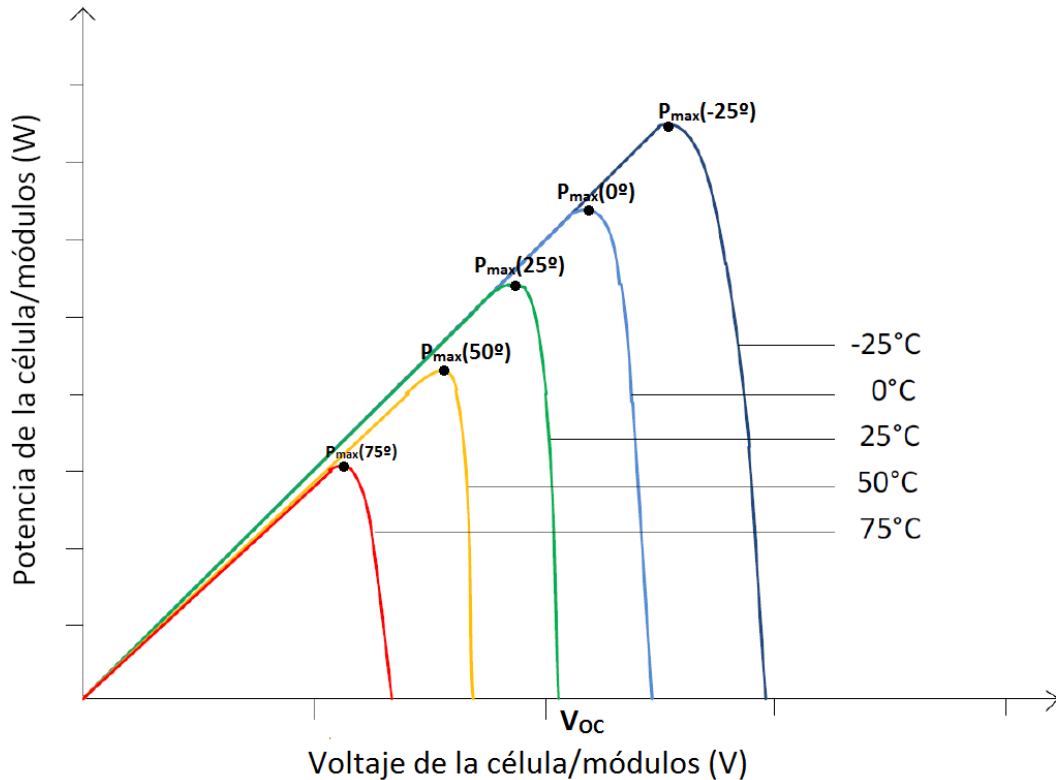


Figura 2.3: Curva P-V típica de los paneles solares fotovoltaicos.

experimentando una significativa expansión en capacidad, demanda y ventas [13]. Es relevante destacar que el costo de los sistemas de paneles solares fotovoltaicos ha bajado en comparación con años anteriores de la década de 2010, con una reducción de aproximadamente el 60%. Esta caída se atribuye a los avances científicos y la introducción de nuevas tecnologías, lo que permite que la generación solar compita con las fuentes convencionales de energía en diversas regiones [18]. Actualmente, la investigación se centra en mejorar la eficiencia y reducir los costos de los paneles solares, explorando el uso de puntos cuánticos y nanocables. Estas innovaciones podrían contribuir de manera significativa a aumentar la eficiencia y la conversión de energía [14]. En la Fig. 3.1 se presenta la curva potencia-voltaje de un panel solar típico. Es fundamental destacar que esta curva determina la relación entre la potencia de salida y el voltaje del panel, identificando el punto de máxima potencia **PMP**, donde el panel solar opera con la mayor potencia [19].

2.3 Componentes principales del sistema solar fotovoltaico.

Las principales componentes de un sistema **FV** son los siguientes:

- **Celdas Fotovoltaicas:** Como se presenta en la Fig. 2.4, son el componente básico de los paneles solares. Están fabricadas materiales semiconductores,



Figura 2.4: Celdas **FV**.

como el silicio o germanio, que absorben la energía de la luz solar y generan electricidad [74, 75].

- **Módulos **FV****: Están constituidos por conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas y encapsuladas en un marco protector [76], como se observa en la Fig. 2.5.
- **Inversores**: Son los dispositivos que convierten la **CC** generada por las celdas solares en **CA**, que es la forma de energía utilizada por la mayoría de los consumidores [77, 78], como se puede observar en la Fig. 2.6.

2.4 Proceso de Conversión Energética.

El proceso de conversión de energía solar en eléctrica se compone de las siguientes fases:

- **Absorción de Luz Solar**: Cuando la luz solar incide sobre una celda **FV**, los fotones de la luz excitan los electrones en el material semiconductor, elevándolos a un nivel de energía más alto [74, 79].
- **Generación de Corriente**: Estos electrones excitados se convierten en portadores de carga que se mueven a través del material semiconductor, creando una corriente eléctrica [74, 79].
- **Creación de Voltaje**: La estructura de la celda, que incluye una unión pn, crea una diferencia de potencial que permite que la corriente fluya en una dirección específica [74] [79].



Figura 2.5: Módulos *FV*.



Figura 2.6: Inversores *FV*.

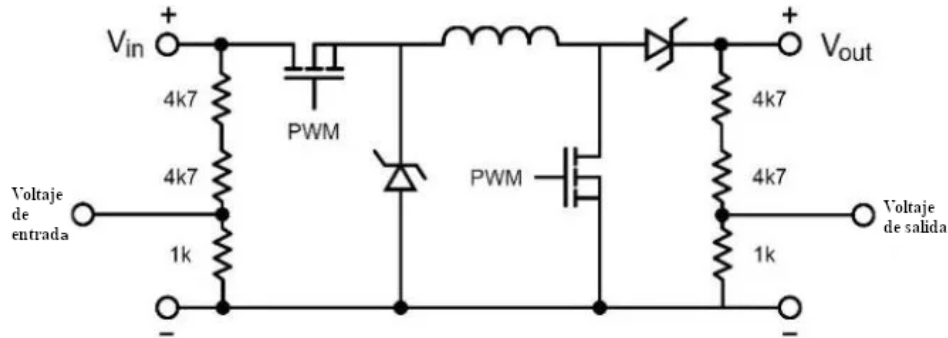


Figura 2.7: Esquema del sistema Buck-Boost.

- **Conversión de Energía:** La CC generada se convierte en CA mediante un inversor, permitiendo su uso en aplicaciones domésticas e industriales [77, 78].

2.4.1 Eficiencia y Factores de Rendimiento.

Los factores fundamentales en la producción de pérdidas y el rendimiento del equipo se pueden considerar como:

- **Eficiencia de Conversión:** Varía entre el 16% y el 35%, dependiendo de la tecnología y los materiales utilizados [80].
- **Temperatura:** La eficiencia de los paneles disminuye con el aumento de la temperatura, por lo que se utilizan sistemas de enfriamiento para mejorar el rendimiento [81, 82].
- **Sistema de Seguimiento Solar:** Este sistema puede aumentar la eficiencia al mantener los paneles orientados lo más cercano posible a la perpendicular con la posición del sol [83, 84].

2.5 Convertidores Buck-Boost

Su esquema se muestra en la Fig. 2.7. En su primera etapa, se desarrollaron convertidores de modulación por ancho de pulso PWM, comenzando con el convertidor Buck. Posteriormente, se centraron en los convertidores Buck-Boost [85, 86]. Estos convertidores han experimentado una evolución significativa, incorporando diversas topologías y nuevas técnicas de control [87]. Muchos de estos avances para estos convertidores se centran en conceptos de celdas canónicas, que son configuraciones estándar utilizadas en el diseño de estos convertidores y en la introducción de filtros LC para mejorar el rendimiento [85, 87].

Las características clave de los convertidores Buck-Boost son las siguientes:

- **Versatilidad:** Los convertidores **Buck-Boost** pueden operar tanto en modo reductor o **Buck**, como en modo elevador o **Boost**, lo que los hace adecuados para aplicaciones con voltajes de entrada variables [23, 88].
- **Mejoras en la Eficiencia:** Los diseños modernos se centran en reducir las pérdidas por conducción y mejorar la eficiencia mediante técnicas como la conmutación-suave, el uso de **MOSFETs** y diodos de bajo voltaje [23, 89, 90].
- **Técnicas de Control:** Se han desarrollado técnicas de control avanzadas, incluyendo ajuste **PID**, compensadores de fase y controladores de retroalimentación no lineales, para mejorar la regulación de voltaje y la estabilidad del sistema [91, 64, 92].
- **Aplicaciones:** Los convertidores **Buck-Boost** se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo sistemas de energía renovable, dispositivos portátiles, vehículos eléctricos y fuentes de alimentación para diversos dispositivos electrónicos [64, 88, 93, 86].

2.5.1 Estrategias de control.

Las estrategias de control disponibles para los convertidores **Buck-Boost** son las siguientes:

- **Control del ciclo de trabajo:** El voltaje de salida del convertidor se regula ajustando el ciclo de trabajo del interruptor. Esta operación requiere un control preciso para garantizar un funcionamiento estable [23, 26, 86].
- **Conmutación suave:** Esta estrategia se utiliza para aumentar la eficiencia de estos convertidores, empleando diversas técnicas que reducen las pérdidas de conmutación y el estrés en los componentes [23, 94].
- **Control en bucle cerrado:** Este método de control se considera una estrategia avanzada, debido a que se emplea para garantizar un funcionamiento estable en un amplio rango de voltajes de entrada y salida [95, 96, 86].

2.5.2 Aplicaciones de los convertidores Buck-Boost.

Las aplicaciones más comunes de los convertidores **Buck-Boost** son:

- Los convertidores **Buck-Boost** se emplean de manera extensiva en sistemas de energía renovable, debido a que son efectivos para gestionar los voltajes de entrada variables que provienen de fuentes de generación, como los paneles solares **FV** [97, 98].

- Se utilizan en los trenes de potencia de vehículos eléctricos para ajustar dinámicamente el voltaje del enlace de CC, lo que permite reducir las pérdidas de conmutación en la etapa del inversor. [95, 99].
- Los convertidores Buck-Boost bidireccionales se utilizan en sistemas de almacenamiento de energía para gestionar de manera eficiente los ciclos de carga y descarga [94].

2.5.3 Beneficios al utilizar estos convertidores.

Beneficios de utilizar estos convertidores son:

1. Puede lograr una eficiencia de hasta el 99% en ciertas configuraciones o topologías de conexión [29].
2. El intercambio directo de energía de estos convertidores, combinado con estrategias de control avanzadas, minimiza las pérdidas energéticas. [100].
3. Las estrategias actuales de diagnóstico de fallos y tolerancia aumentan la fiabilidad de estos convertidores [101].

2.5.4 Dificultades al utilizar estos convertidores.

Desafíos que enfrentan estos convertidores:

1. El diseño y control de estos convertidores puede volverse complejo, lo que exige la implementación de estrategias de control sofisticadas y una selección minuciosa de componentes [28, 100].
2. Implementar estas estrategias de control y diseñar el convertidor con componentes de alta eficiencia puede resultar en un aumento significativo en el costo de estos dispositivos [29].
3. El diseño y control de estos convertidores puede volverse complejo, lo que exige la implementación de estrategias de control sofisticadas y una selección minuciosa de componentes [28, 100].
4. Implementar estas estrategias de control y diseñar el convertidor con componentes de alta eficiencia puede resultar en un aumento significativo en el costo de estos dispositivos [29].

2.6 Baterías

Las principales tecnologías que se utilizan en la actualidad en relación con el almacenamiento de energía en baterías son:

2.6.1 Ión-Litio.

Las baterías de **Li-ion** presentan numerosas ventajas dignas de consideración, tales como su elevada densidad de energía, que permite un mayor almacenamiento en un espacio reducido, así como una prolongada vida útil y un rendimiento notable [102, 103]. Estas características propician una variedad de aplicaciones, siendo predominantes en el almacenamiento de energía a escala de red y en el ámbito de los vehículos eléctricos [104, 105]. No obstante, existen desafíos significativos, entre los cuales destacan el elevado costo de producción y cuestiones relacionadas con la seguridad, particularmente en lo que respecta al riesgo de sobrecalentamiento. Estas preocupaciones demandan una atención meticulosa en su diseño y utilización [106].

2.6.2 Plomo Ácido.

Las baterías de plomo-ácido presentan ventajas significativas, destacándose por su bajo costo y la consolidación de su tecnología, lo que las convierte en una alternativa accesible para diversas aplicaciones [103]. Su uso es predominante en sistemas solares fuera de la red, donde se valoran su fiabilidad y facilidad de mantenimiento [105]. Sin embargo, este tipo de baterías enfrenta desafíos considerables, como una vida útil más corta y una densidad de energía inferior en comparación con las baterías de iones de litio. Estas limitaciones pueden restringir su rendimiento en aplicaciones que demandan una mayor eficiencia energética [103].

2.6.3 Batería Redox de Vanadio.

Las baterías de Redox de Vanadio, también conocidas como baterías de flujo, presentan múltiples ventajas, entre las que se destacan su prolongada vida útil, elevada escalabilidad y capacidad para ofrecer almacenamiento de energía a gran escala, lo que las posiciona como una alternativa viable para aplicaciones que requieren soluciones energéticas eficientes [107] [108]. Estas propiedades las hacen particularmente adecuadas para sistemas fotovoltaicos de gran envergadura, donde tienen la capacidad de mitigar las fluctuaciones en la generación de energía [108]. No obstante, este tipo de baterías enfrenta ciertas desventajas, tales como los costos iniciales elevados y la complejidad inherente al diseño del sistema, lo que podría restringir su adopción en determinados contextos [108].

2.7 Convertidores CC-CA.

Los convertidores de **CC-CA**, también conocidos como inversores, son componentes esenciales en diversas aplicaciones, especialmente en sistemas de energía renovable, vehículos eléctricos y redes eléctricas. Estos convertidores transforman la **CC** en **CA**,

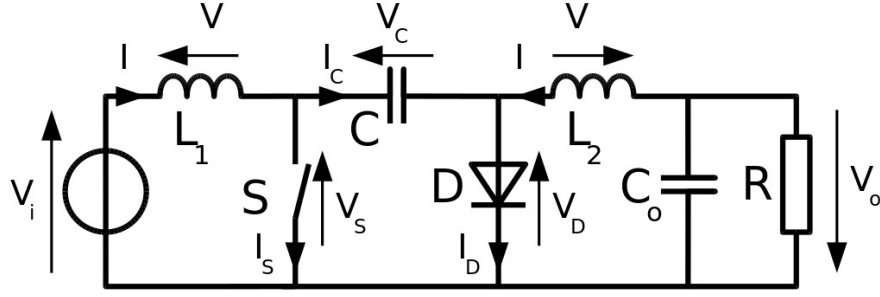


Figura 2.8: Esquema convertidor **CC-CA**.

lo que permite la integración de fuentes de **CC**, como baterías y paneles fotovoltaicos, con cargas y redes de **CA**. Son fundamentales para conectar fuentes de energía renovable, como los sistemas **FV** y las baterías, a la red. Garantizan una entrega de energía eficiente y mantienen la calidad de la potencia [109, 110, 111, 86]. Estos sistemas generalmente están compuestos por: módulos de medición de corriente, módulos de medición de tensión, módulos de transistores **IGBTs**, **PLD**, microcontroladores [112, 86], como se puede observar en la Fig. 2.8.

2.7.1 Topologías y Estrategias de Control.

Las topologías de estos convertidores con las siguientes:

1. **Convertidores de Etapa Única:** Estos convertidores realizan la conversión de **CC** a **CA** en un solo paso, lo que puede mejorar la eficiencia y reducir la complejidad del sistema [109].
2. **Inversores Multinivel:** Estos inversores reducen el número de interruptores, lo que disminuye las pérdidas por conmutación y la complejidad del sistema. Sin embargo, pueden tener una distorsión armónica total **THD** ligeramente más alta en comparación con los inversores en cascada tradicionales [110, 86].
3. **Convertidores de Puente Activo Dual **DAB**:** Estos convertidores se utilizan en aplicaciones que requieren un flujo de energía bidireccional y alta eficiencia. A menudo se combinan con topologías resonantes en serie para mejorar el rendimiento [111, 113].

Las estrategias de control son las siguientes:

1. **Modulación por Ancho de Pulso **PWM**.** La **PWM** es una técnica común utilizada para controlar la conmutación de convertidores de **CC-CA**, asegurando una regulación precisa del voltaje de salida y minimizando la distorsión armónica [114, 115, 86].

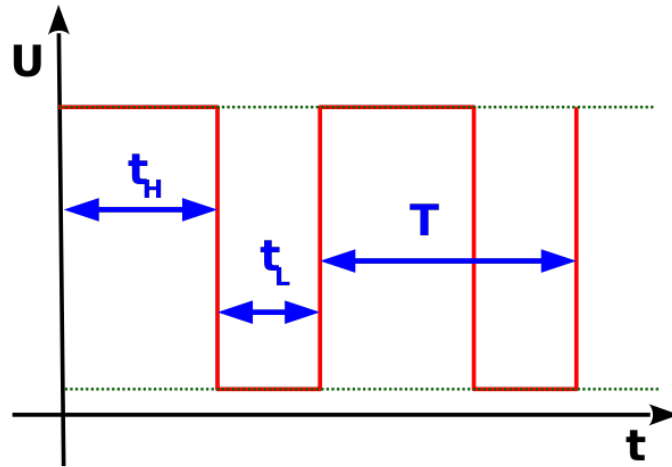


Figura 2.9: Forma de onda Modulación por ancho de pulso PWM.

2. **Control Predictivo por Modelo MPC.** El MPC se emplea para el control avanzado de convertidores multipuerto, optimizando el flujo de energía y manteniendo la estabilidad tanto en modos aislados como conectados a la red [116].

2.7.2 Modulación por ancho de Pulso PWM.

La modulación por ancho de pulso PWM, como se aprecia en la Fig. 2.9 es una técnica de control versátil empleada en una variedad de aplicaciones, como el control de motores, convertidores de energía, amplificadores de audio y sistemas de iluminación. Su funcionamiento se basa en transformar la amplitud de una señal de entrada en el ancho de los pulsos de salida, mientras se mantiene una frecuencia constante [117, 118, 119, 86].

2.7.3 Aplicaciones.

1. **Control de Motores:** La modulación por ancho de pulso es ampliamente empleada en el control de motores de corriente continua, donde las frecuencias más elevadas suelen traducirse en un funcionamiento más suave y preciso. No obstante, frecuencias demasiado altas pueden generar mayores pérdidas por conmutación y disminuir la velocidad del motor debido a efectos de autoinductancia [58].

2. **Electrónica de Potencia:** En el ámbito de la electrónica de potencia, la **PWM** es crucial, debido a que influye en el funcionamiento de los convertidores, el rendimiento del control y la interferencia electromagnética por sus siglas en inglés *EMI*. Métodos como la Modulación por Vector Espacial por sus siglas en inglés *SVPWM* y la Inyección de Tercera Armónica ofrecen un rendimiento superior en términos de distorsión armónica en comparación con técnicas más simples como la Modulación Por Ancho de Pulso Senoidal **SPWM** [120, 121, 122].
3. **Procesamiento de Audio y Señales:** La **PWM** se aplica en el procesamiento de señales de audio y en la conversión de digital a analógico, facilitando la codificación de señales en el dominio del tiempo. La **PWM** multilevel puede ayudar a reducir la distorsión armónica, aunque añade complejidad a la forma de onda [123].

2.7.4 Consideraciones al aplicar PWM.

- Pérdidas por Conmutación: La modulación por ancho de pulso de alta frecuencia puede provocar un incremento en las pérdidas por conmutación, especialmente en circuitos integrados como el L293D, lo que impacta negativamente en la eficiencia general [58].
- Complejidad de Control: Las técnicas avanzadas de **PWM**, tales como las empleadas en inversores de fuente Z cuasi *qZSIs*, demandan estrategias de control complejas para administrar el aumento de voltaje y garantizar la protección ante cortocircuitos [124].
- Distorsión Armónica: Se utilizan métodos como la **PWM** multilevel y la modulación pseudoaleatoria para reducir la distorsión armónica, lo que resulta fundamental para preservar la calidad de la señal [123, 125].

2.8 Modulación por ancho de Pulso Sinusoidal SPWM.

La Modulación por Ancho de Pulso Senoidal, como se indica en la Fig. 2.10 es una técnica ampliamente empleada en electrónica de potencia para el control de inversores y controladores de motores. Funciona al comparar una señal de referencia sinusoidal con una señal portadora triangular para generar los disparos **PWM** [126, 127, 128, 129, 130].

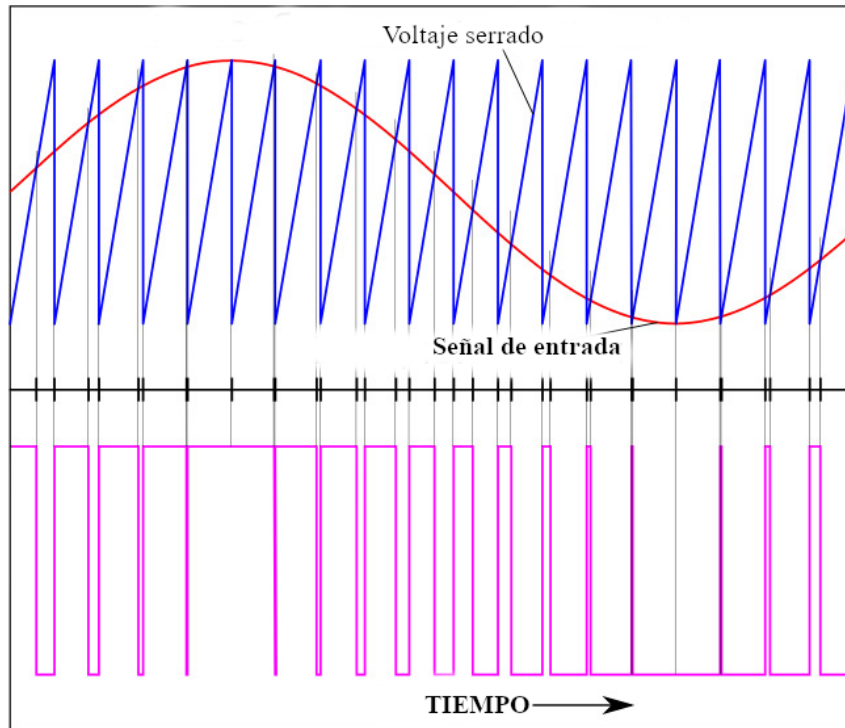


Figura 2.10: Forma de onda Modulación por ancho de pulso Sinusoidal SPWM.

2.8.1 Principio de operación del SPWM.

- **Generación de pulsos:** La señal del **SPWM** se produce al comparar una señal de referencia sinusoidal con una señal portadora triangular. Cuando el valor de la señal sinusoidal supera el de la triangular, se genera un pulso alto; en cambio, cuando la señal triangular es mayor, el pulso es bajo [128, 129].
- **Modulación de Amplitud:** Esta técnica permite modificar el índice de modulación y la frecuencia para ajustar el ancho de los pulsos, lo que impacta directamente en el contenido armónico y la resolución de la señal de salida [131].

2.8.2 Ventajas al aplicar el SPWM.

- **Simplicidad:** La técnica del **SPWM** es fácil de implementar, especialmente en circuitos analógicos [121].
- **Baja Distorsión Armónica:** La **SPWM** puede lograr una baja Distorsión Armónica Total si se optimiza adecuadamente. Por ejemplo, utilizar menos puntos de muestreo y frecuencias de conmutación elevadas puede reducir la **THD** a menos del 0.6% [127].
- **Flexibilidad:** El **SPWM** se puede adaptar a diversas aplicaciones, incluyendo

inversores multinivel y sistemas de prueba para dispositivos de alta potencia. [129, 132, 133].

2.8.3 Desventajas al aplicar el SPWM.

1. **Mayor THD:** En comparación con otras técnicas de PWM, como la Modulación por Ancho de Pulso de Vector Espacial y la Modulación por Inyección de Tercera Armónica, la técnica SPWM generalmente presenta un THD más alto [121, 122].
2. **Frecuencia de Conmutación Inferior:** La SPWM funciona a frecuencias de conmutación más bajas, lo que puede limitar su rendimiento en aplicaciones de alta frecuencia [121].

2.8.4 Aplicaciones del SPWM.

1. **Inversores:** La técnica SPWM se utiliza comúnmente en inversores para sistemas de energía renovable, controladores de motores y sistemas fotovoltaicos conectados a la red [127, 134, 135].
2. **Controladores de Motores:** La técnica del SPWM es eficaz para el control de controladores de motores, proporcionando un funcionamiento suave y eficiente [127, 136].
3. **Corrección del Factor de Potencia:** Las técnicas de SPWM modificadas pueden optimizar el factor de potencia y mejorar la eficiencia eléctrica ajustando el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje [137].

2.9 Bucle de enganche de fase PLL.

Un Bucle de Enganche de Fase o PLL, como se muestra en la Fig. 2.11, es un sistema de control en bucle cerrado que sincroniza la fase y la frecuencia de una señal de salida con una señal de referencia o de entrada. Este sistema se utiliza en muchas aplicaciones electrónicas gracias a su habilidad para mantener una relación constante entre las fases de las señales de entrada y salida [138, 139, 140, 141].

2.9.1 Componentes Esenciales.

1. **Detector de Fase PD:** Compara la fase de la señal de entrada con la señal de retroalimentación del oscilador controlado por voltaje VCO y genera una señal de error que es proporcional a la diferencia de fase [142, 143].

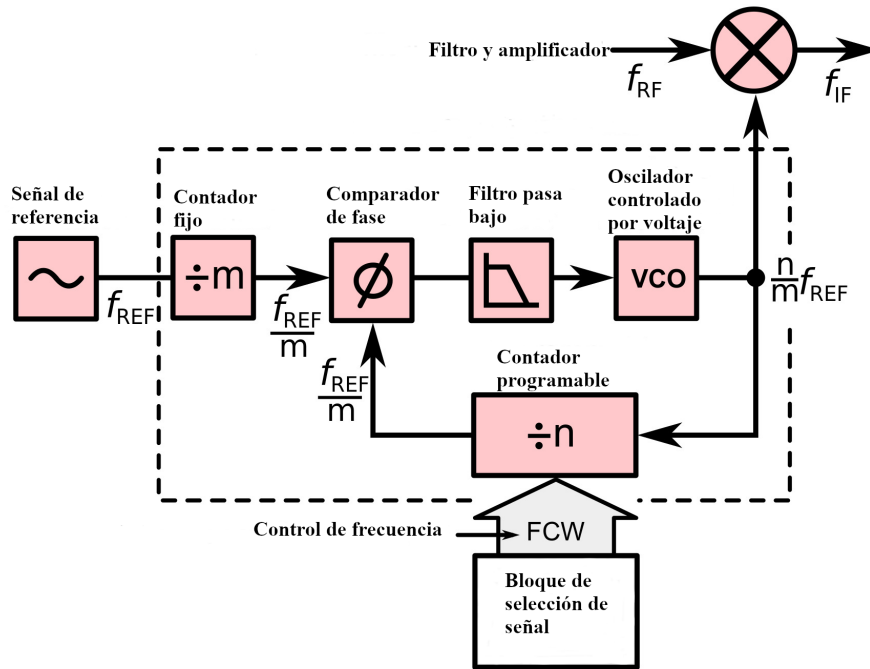


Figura 2.11: Bucle de enganche de fase PLL.

2. **Filtro de Bucle LF :** Filtra la señal de error del detector de fase para producir una señal de control suave para el **VCO**, lo que garantiza una operación estable y reduce el ruido [142, 143].
3. **Oscilador Controlado por Voltaje **VCO**:** Genera una señal de salida cuya frecuencia es determinada por la señal de entrada. La frecuencia de salida del **VCO** se ajusta para alinearse con la fase y frecuencia de la señal de referencia [142, 143].

2.9.2 Tipos de **PLL**.

1. **PLL Analógico:** Emplea componentes analógicos y es más complicado de modificar una vez que ha sido diseñado [140].
2. **PLL Digital:** Es más apropiado para las demandas actuales debido a su bajo consumo energético, tamaño compacto y facilidad de modificación [140, 144].
3. **PLL de Bomba de Carga:** Incorpora una bomba de carga que proporciona un rango de captura más amplio y presenta una estructura relativamente simple [142].

2.10 Controlador Proporcional - Integral

El controlador **PI** constituye una de las estrategias de control más empleadas en el ámbito industrial para la regulación de múltiples variables de proceso, tales como temperatura, presión o caudal. Este tipo de controlador integra dos acciones fundamentales: la proporcional, que responde de manera directa a la magnitud del error, y la integral, que corrige acumulativamente dicho error a lo largo del tiempo. La combinación de ambas permite ajustar de forma continua la señal de control, con el propósito de reducir al mínimo la diferencia entre la variable monitoreada y el valor de referencia establecido [145, 146]

2.10.1 Componentes del controlador **PI**

- Proporcional: La acción proporcional regula la señal de salida del controlador en relación directa con el valor instantáneo del error. Esto implica que, a mayor magnitud del error, mayor será la corrección implementada por el sistema [145, 146].
- Integral: La acción integral ajusta la salida del controlador considerando la suma acumulada de los errores ocurridos en el tiempo. Su función principal es suprimir el error estacionario o residual que podría persistir si únicamente se aplicara la acción proporcional [145, 146]

2.10.2 Ventajas del controlador **PI**

- Simplicidad y estabilidad: Este tipo de controlador destaca por su estructura sencilla y su capacidad para operar de forma confiable bajo un amplio rango de condiciones, lo que lo convierte en una opción versátil para diversas aplicaciones [147].
- Baja susceptibilidad al ruido: En comparación con los controladores **PID**, el controlador **PI** presenta menor sensibilidad ante perturbaciones e interferencias en la señal, lo que lo hace más adecuado en entornos donde se puedan presentar ruidos de medición [148].
- Aplicación en sistemas con modelos desconocidos: Su funcionamiento efectivo no depende de un conocimiento exhaustivo del modelo matemático del proceso, lo que facilita su implementación en sistemas donde la dinámica no esté completamente caracterizada [149].

2.10.3 Sintonización del controlador PI

2.10.3.1 Ajuste de parámetros:

La determinación óptima de los valores de configuración en un controlador PI puede resultar un proceso complejo, en especial cuando se trata de sistemas multivariables que presentan comportamientos no lineales y retrasos temporales en su respuesta. Para optimizar su desempeño, es posible emplear técnicas como la regulación basada en modelos internos o el uso de algoritmos de optimización, los cuales permiten obtener una calibración más precisa y un control más eficiente [150, 151]

2.11 Programa ATP/EMTP.

El programa ATP-EMTP es una herramienta de software ampliamente reconocida utilizada para simular transitorios electromagnéticos en sistemas de energía eléctrica [152]. El EMTP fue desarrollado inicialmente por la Administración de Energía Bonneville BPA en Portland, Oregón, EE. UU., como una herramienta para simular transitorios electromagnéticos en sistemas de energía. El programa se diseñó para permanecer en el dominio público, gestionado por el Grupo de Coordinación de Desarrollo DCG establecido en 1982 [152].

Para 1984, surgieron preocupaciones entre los desarrolladores de la BPA sobre la efectividad del DCG, lo que llevó al Dr. Scott W. Meyer a crear una versión alternativa que se mantuviera libre de explotación comercial. Esto dio lugar al nacimiento del ATP en el otoño de 1984 [152]. El primer curso corto de EMTP en Europa tuvo lugar en Lovaina, Bélgica, en 1984, marcando el inicio de la colaboración internacional y la difusión del programa [152]. La primera reunión anual del Centro EMTP de Lovaina se celebró en 1985, consolidando aún más la presencia internacional y el desarrollo del programa [152].

El programa ATP ha sido ampliamente adoptado debido a su naturaleza no comercial y sus extensas aplicaciones en la simulación de diversos escenarios de fallas en sistemas de energía. Se ha mejorado para soportar simulaciones por lotes y generación automatizada de escenarios de fallos [153]. Últimamente este programa se ha utilizado para desarrollar modelos para estándares emergentes de comunicación por línea eléctrica, como Prime y G3-PLC, demostrando su versatilidad en la evaluación del rendimiento bajo condiciones de red realistas [154].

El programa ATP-EMTP se utiliza ampliamente para analizar fenómenos transitorios en sistemas de energía, proporcionando conocimientos prácticos y soluciones para problemas del mundo real [155]. El programa ha sido fundamental en la simulación y análisis de los efectos de los rayos en las subestaciones, ayudando en el desarrollo de medidas de protección [156]. También se ha aplicado para estudiar las



Figura 2.12: Vehículo eléctrico BYD Dolphin.

características de transmisión de las comunicaciones por línea eléctrica, validando su efectividad a través de pruebas de campo y simulaciones [157].

2.12 Análisis de vehículos eléctricos para el dimensionamiento del sistema de carga.

Con el fin de dimensionar adecuadamente el sistema propuesto, se investigaron las características técnicas de VE comercializados en el Ecuador. Esta recopilación de datos permitió identificar parámetros clave como potencia de carga, capacidad de batería, eficiencia y autonomía, a partir de los cuales se determinó el valor de potencia que deberá suministrar el sistema de carga desarrollado en el presente proyecto de titulación. A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de uno de los modelos analizados como referencia para el diseño.

El primer vehículo analizado corresponde a la marca BYD, modelo Dolphin cuyas características principales se presentan en la Tabla 2.1, el cual se muestra en la Fig. 2.12.

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca BYD, modelo Tang EV, el mismo que tiene las siguientes características principales las cuales se presentan en la Tabla 2.2, el cual se muestra en la Fig. 2.13.

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca BYD, modelo Yuan Plus, el mismo que presenta las siguientes características principales las cuales se presentan en la Tabla 2.3, el cual se puede observar en la Fig. 2.14.

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca BYD, modelo Yuan EV 400, el mismo que contiene las siguientes características principales las cuales se



Figura 2.13: Vehículo eléctrico BYD Tang EV.



Figura 2.14: Vehículo eléctrico BYD Yuan Plus.

Tabla 2.1: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico BYD Dolphin.

Marca	BYD
Modelo	Dolphin
Dimensiones (L x A x H) (mm)	4150 mm × 1770 mm × 1570 mm
Eficiencia (Wh/Km)	11,3 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 8 A, 1170 W
Peso (kg)	1450 kg
Batería (A·h)	Batería de fosfato de hierro y litio, 135 A·h
Autonomía (km)	427 km

Tabla 2.2: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico BYD Tang EV.

Marca	BYD
Modelo	Tang EV
Dimensiones (L x A x H) (mm)	4870 mm × 1950 mm × 1725 mm
Eficiencia (Wh/Km)	17,9 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 8 A, 1170 W
Peso (kg)	2295 kg
Batería (A·h)	Batería de litio de níquel cobalto ácido manganeso, 135 A·h
Autonomía (km)	530 km

Tabla 2.3: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico BYD Yuan Plus.

Marca	BYD
Modelo	Yuan Plus
Dimensiones (L x A x H) (mm)	4455 mm × 1875 mm × 1615 mm
Eficiencia (Wh/Km)	14,9 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 8 A, 1170 W
Peso (kg)	1700 kg
Batería (kW/h)	Batería de LFP (Litio Hierro Fosfato), 60.48 KW/h
Autonomía (km)	480 km

presentan en la Tabla 2.4, el mismo que se presenta en la Fig. 2.15.

Tabla 2.4: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico BYD Yuan EV 400.

Marca	BYD
Modelo	Yuan EV 400
Dimensiones (L x A x H) (mm)	4360 mm × 1785 mm × 1680 mm
Eficiencia (Wh/Km)	16,5 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 8 A, 1170 W
Peso (kg)	1645 kg
Batería (A·h)	Batería de litio-ácido níquel cobalto manganeso, 135 A·h
Autonomía (km)	480 km



Figura 2.15: Vehículo eléctrico BYD Yuan Yuan EV 400.



Figura 2.16: Vehículo eléctrico Nissan Leaf.

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca Nissan, modelo LEAF, el mismo que cuenta con las siguientes características principales las cuales se presentan en la Tabla 2.5, el cual se presenta en la Fig.2.16.

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca Renault, modelo Twizy, el mismo que posee las siguientes características principales las cuales se presentan en la Tabla 2.6, el mismo que se evidencia en la Fig. 2.17.

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca Kia, modelo EV6, el mismo que alberga las siguientes características principales las cuales se presentan en la Tabla 2.7, el cual se evidencia en la Fig. 2.18.

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca Kia, modelo Niro, el mismo que dispone de las siguientes características principales las cuales se presentan en la Tabla 2.7, el cual se refleja en la Fig.2.19.



Figura 2.17: Vehículo eléctrico Renault Twizy.



Figura 2.18: Vehículo eléctrico Kia EV6.

Tabla 2.5: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico Nissan LEAF.

Marca	Nissan
Modelo	LEAF
Dimensiones (L x A x H) (mm)	4479 mm × 1790 mm × 1555 mm
Eficiencia (Wh/Km)	18 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 30 A, 6600 W. Uso doméstico 110 VCA, 60 Hz, 11.82 A, 1300 W, hasta 27 h.
Peso (kg)	1580 kg
Batería (kW/h)	Batería de iones de Litio, 40 kW/h
Autonomía (km)	280 km

Tabla 2.6: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico Renault Twizy.

Marca	Renault
Modelo	Twizy
Dimensiones (L x A x H) (mm)	2377 mm × 1239 mm × 1454 mm
Eficiencia (Wh/Km)	6.1 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 5 A, 1100 W.
Peso (kg)	690 kg
Batería (kW/h)	Batería de iones de Litio, 6.1 kW/h
Autonomía (km)	100 km

Tabla 2.7: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico Kia EV6.

Marca	Kia
Modelo	EV6
Dimensiones (L x A x H) (mm)	4625 mm × 1890 mm × 1570 mm
Eficiencia (Wh/Km)	20.2 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 10.5 kW.
Peso (kg)	2620 kg
Batería (kW/h)	Batería de iones de Litio, 77.4 kW/h
Autonomía (km)	530 km

Tabla 2.8: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico Kia Niro.

Marca	Kia
Modelo	Niro
Dimensiones (L x A x H) (mm)	4420 mm × 1825 mm × 1570 mm
Eficiencia (Wh/Km)	17.1 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 10.4 kW.
Peso (kg)	2200 kg
Batería (kW/h)	Batería de iones de Litio, 64.8 kW/h
Autonomía (km)	460 km

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca Kia, modelo EV9, el mismo que incluye las siguientes características principales las cuales se presentan en la Tabla 2.9, el cual se registra en la Fig.2.20.



Figura 2.19: Vehículo eléctrico Kia Niro.



Figura 2.20: Vehículo eléctrico Kia EV9.

Tabla 2.9: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico Kia EV9.

Marca	Kia
Modelo	EV9
Dimensiones (L x A x H) (mm)	5515 mm × 1980 mm × 1780 mm
Eficiencia (Wh/Km)	22.8 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 10.9 kW.
Peso (kg)	2960 kg
Batería (kW/h)	Batería de iones de Litio, 99.8 kW/h
Autonomía (km)	497 km



Figura 2.21: Vehículo híbrido Toyota Rav4 plug in hybrid.

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca Toyota, modelo Rav4 plug in hybrid, el mismo que presenta las siguientes características principales las cuales se presentan en la Tabla 2.10, el cual se muestra en la Fig 2.21.

Tabla 2.10: Especificaciones técnicas del vehículo híbrido Toyota Rav4 plug in hybrid.

Marca	Toyota
Modelo	Rav4 plug in hybrid
Dimensiones (L x A x H) (mm)	4160 mm × 1695 mm × 1661 mm
Eficiencia (Wh/Km)	18.1 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 15 A, 1800W.
Peso (kg)	2092 kg
Batería (kW/h)	Batería de hidruro avanzado de níquel-metal, 27 kW/h
Autonomía (km)	70 km

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca JAC, modelo E30X, el mismo que cuenta con las siguientes características principales las cuales se presentan en la Tabla 2.11, el cual se evidencia en la Fig. 2.22.

El siguiente vehículo analizado corresponde a la marca JAC, modelo e-JS1, el mismo que cuenta con las siguientes características principales las cuales se presentan



Figura 2.22: Vehículo eléctrico JAC E30X.

Tabla 2.11: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico JAC E30X.

Marca	JAC
Modelo	E30X
Dimensiones (L x A x H) (mm)	4025 mm × 1770 mm × 1560 mm
Eficiencia (Wh/Km)	17.5 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 32 A, 7040 W. Uso doméstico 110 VCA, 60 Hz, 16 A, 1760 W.
Peso (kg)	1735 kg
Batería (kW/h)	Batería de iones de Litio, 41 kW/h
Autonomía (km)	405 km

en la Tabla 2.12, el cual se evidencia en la Fig. 2.23.

Tabla 2.12: Especificaciones técnicas del vehículo eléctrico JAC e-JS1.

Marca	JAC
Modelo	e-JS1
Dimensiones (L x A x H) (mm)	3650 mm × 1670 mm × 1540 mm
Eficiencia (Wh/Km)	15.6 kW·h por cada 100 km
Potencia de carga	Uso doméstico 220 VCA, 60 Hz, 32 A, 7040 W. Uso doméstico 110 VCA, 60 Hz, 16 A, 1760 W.
Peso (kg)	1535 kg
Batería (kW/h)	Batería de iones de Litio, 41 kW/h
Autonomía (km)	300 km

2.13 Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para un cargador de vehículos eléctricos.

Para el desarrollo del presente proyecto, se empleó el programa ATPDraw como herramienta principal de simulación y análisis. Este programa constituye una interfaz



Figura 2.23: Vehículo eléctrico JAC e-JS1.

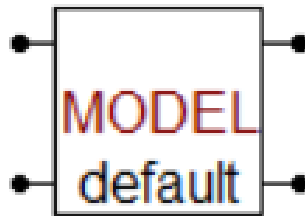


Figura 2.24: Bloque MODELS en ATPDraw

gráfica del paquete [ATP](#), ampliamente utilizado en estudios de sistemas de potencia debido a su capacidad para representar de manera precisa fenómenos eléctricos transitorios y de régimen permanente. La elección de ATPDraw se debe a la facilidad que ofrece para representar distintos elementos del sistema eléctrico, tales como fuentes de energía renovable, inversores, transformadores, líneas de transmisión y cargas. Esta capacidad resulta esencial al momento de analizar un esquema que integra la generación fotovoltaica, la conversión electrónica de potencia y la interconexión con la red eléctrica.

2.13.1 Bloque MODELS en ATPDraw

Un bloque de programación MODELS en ATPDraw, como se observa en la Fig. 2.24, permite definir el comportamiento de un elemento o conjunto de operaciones dentro de la simulación. A diferencia de los componentes circuitales predeterminados, este tipo de bloque ofrece la posibilidad de establecer relaciones matemáticas y lógicas específicas entre las variables de entrada y de salida, lo que lo convierte en una herramienta muy flexible para representar procesos eléctricos o de control que no están incluidos directamente en la librería del software. En este trabajo, el uso de los

bloques MODELS resultó ser fundamental para determinar magnitudes tales como potencias y factores de potencia, así como para implementar funciones de control en el inversor y obtener parámetros clave del sistema de carga.

Las principales secciones de un bloque MODELS en ATPDraw son:

DATA En esta sección se definen los parámetros numéricos que el usuario ingresa al bloque. Estos valores actúan como constantes internas, por ejemplo: coeficientes, tiempos de referencia, límites de operación, etc.

INPUT Aquí se especifican las señales que recibe el bloque desde el resto del circuito simulado. Suelen ser tensiones, corrientes o variables de control que se quieren procesar.

OUTPUT Son las señales que el model entrega como resultado del procesamiento interno. Es la manera de interactuar con otros bloques del esquema (por ejemplo: potencias calculadas, referencias de control, señales de disparo).

VAR Son las variables internas del programa en MODELS. Se utilizan para almacenar resultados intermedios, realizar operaciones matemáticas y simplificar el código.

HISTORY Permite guardar valores anteriores de ciertas variables para utilizarlos en cálculos posteriores, algo útil cuando se trabajan procesos dinámicos o dependientes del tiempo.

INIT En esta sección se ejecuta al inicio de la simulación. Permite asignar valores iniciales a las variables internas, para que el bloque arranque con condiciones coherentes.

EXEC Aquí se programan las ecuaciones y operaciones que el MODELS ejecutará en cada paso de la simulación. Básicamente, es el “motor de cálculo” del bloque.

Las funciones matemáticas tales como todas estas se pueden usar tanto en EXEC como en INIT, se pueden usar funciones como seno, coseno, exponenciales, raíces cuadradas, logaritmos, sumas y multiplicaciones. Esto permite implementar desde relaciones algebraicas simples hasta algoritmos de control más complejos.

2.13.2 Fuente de Voltaje Continuo en ATPDraw.

Cuando se hace referencia a una fuente de voltaje continuo en ATPDraw se muestra en la Fig. 2.25, en realidad nos referimos a un bloque que representa una fuente ideal de corriente continua **CC**. Es decir, es un elemento que entrega un voltaje fijo



Figura 2.25: Fuente DC en ATPDraw.



Figura 2.26: Fuente AC en ATPDraw.

y constante en el tiempo, independiente de la carga conectada o de la corriente que circule.

Características principales:

- Representación ideal: Mantiene el voltaje especificado en todo momento, sin importar variaciones de la carga.
- Parámetros ajustables: En el bloque se puede definir el nivel de voltaje, según sea necesario.
- Uso típico en simulaciones:
 - Modelar la salida de un panel fotovoltaico, cuando se simplifica como fuente [CC](#).
 - Representar la tensión de un banco de baterías.
 - Alimentar la etapa de un inversor que luego convierte a corriente alterna.

2.13.3 Fuente de Voltaje Alterno en ATPDraw.

Una fuente de voltaje [CA](#) en ATPDraw, como se presenta en la Fig. [2.25](#), es un elemento que permite representar una señal alterna dentro de la simulación. Básicamente, se trata de un generador ideal que entrega un voltaje senoidal con los parámetros que se pueden definir, como la amplitud, la frecuencia y el ángulo de fase inicial. Este tipo de fuente resulta muy útil porque sirve para modelar la red eléctrica de potencia a la cual se conecta el sistema de carga. Al ser configurable, puedo establecer, una tensión de 120 V o 220 V a 60 Hz, de manera que el comportamiento de la simulación sea lo más cercano posible a las condiciones reales de operación. Además, el uso de la fuente [CA](#) en ATPDraw da la posibilidad de

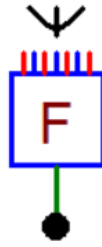


Figura 2.27: Bloque Fortran en ATPDraw .

analizar cómo interactúa el inversor con la red, evaluar el intercambio de potencia activa y reactiva, y verificar la calidad de la energía que se entrega hacia la carga, que en este caso corresponde al [VE](#).

2.13.4 Bloque Fortran en ATPDraw.

El bloque Fortran, que se presenta en al Fig. [2.27](#), sirve como conexión entre la interfaz gráfica de ATPDraw y el lenguaje de programación Fortran, lo que me permite tener más flexibilidad al simular sistemas eléctricos complejos que necesitan una descripción matemática más detallada.

2.13.4.1 Ventajas al usar el bloque Fortran:

- El bloque Fortran da la posibilidad de implementar funciones matemáticas específicas que no existen en los bloques estándar, lo que resulta muy útil para representar modelos dinámicos como sistemas de control o elementos no lineales.
- También se puede acceder y modificar variables internas del circuito mientras se ejecuta la simulación, lo que me permite tener un control mucho más preciso sobre el comportamiento del sistema. Gracias a esto, se pueden analizar fenómenos más avanzados como armónicos, transitorios o efectos no lineales que requieren cálculos más elaborados.
- Además, el bloque se integra con el entorno MODELS de [ATP](#), permitiendo que el código Fortran forme parte del sistema simulado de manera fluida. Los bloques Fortran que se desarrollan pueden guardarse y reutilizarse en distintos proyectos, lo que ayuda a optimizar el tiempo y mejorar la eficiencia en el desarrollo de simulaciones.

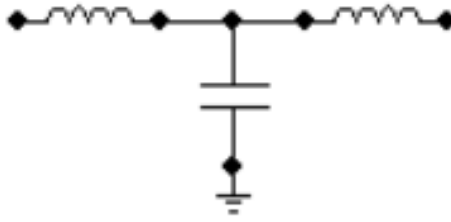


Figura 2.28: Filtro LCL.

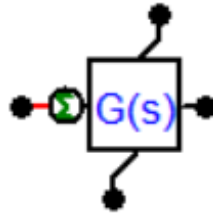


Figura 2.29: Filtro Pasa Bajo.

2.13.5 Filtro LCL

El filtro LCL, el cual se aprecia en la Fig. 2.28 es un elemento indispensable para garantizar que la energía entregada a la red cumpla con los niveles de calidad exigidos. Este filtro está compuesto por dos inductancias y un capacitor intermedio, su función principal es suavizar la señal de salida del inversor, eliminando el contenido armónico de alta frecuencia que se genera por la conmutación de los dispositivos electrónicos [158, 159]. En otras palabras, el LCL actúa como una barrera que atenúa los armónicos y permite que la corriente inyectada hacia la red tenga una forma de onda mucho más cercana a una senoidal pura. De esta manera, no solo se protege al sistema eléctrico de posibles distorsiones, sino que también se mejora la eficiencia global y se asegura un desempeño confiable del cargador de VE. Además, al implementar este filtro en ATPDraw pude evaluar la respuesta dinámica del sistema, verificando tanto la reducción de armónicos como la estabilidad en la conexión con la red. Esto fue clave para demostrar que el diseño planteado es técnicamente viable y respeta las normativas de calidad de energía.

2.13.6 Filtro pasa bajo.

En la simulación se utilizó funciones de transferencia configuradas como filtros pasa bajos, como se evidencia en la Fig. 2.29, con el propósito de procesar y depurar las señales eléctricas obtenidas. Estos filtros se parametrizaron cuidadosamente de acuerdo con las variables que se quería medir, de modo que solo se conservaran los

componentes fundamentales de la señal y se atenuaron las oscilaciones o armónicos indeseados [160]. Gracias a este procedimiento, fue posible trabajar con valores más representativos y estables en el análisis de voltajes, corrientes y potencias. En términos prácticos, los filtros pasa bajos actuaron como una herramienta de refinamiento dentro del entorno de ATPDraw, evitando que las mediciones se vieran afectadas por ruido numérico o distorsiones propias de la conmutación electrónica. De esta forma, la implementación de funciones de transferencia no solo facilitó la correcta interpretación de los resultados, sino que también permitió validar con mayor confiabilidad el comportamiento dinámico del sistema y la calidad de la energía entregada a la red.

2.13.7 Procedimiento aplicado en la simulación.

Etapas de conversión e inversor: Mediante el uso de bloques de control y dispositivos electrónicos se simuló la inyección de potencia activa a la red y la regulación de la potencia reactiva, asegurando que el funcionamiento del sistema se mantenga dentro de lo requerido por la normativa eléctrica.

Modelado de la fuente fotovoltaica: Se construyeron bloques que reproducen el comportamiento eléctrico de los paneles solares, lo que permitió observar la potencia generada en diferentes condiciones de irradiancia y temperatura.

Red de conexión y carga: Se representó la conexión con la red de potencia junto con el perfil de carga asociado al sistema de recarga de VE, permitiendo analizar la interacción del cargador con el sistema eléctrico.

Cálculo de variables fundamentales: Con el apoyo de bloques de tipo Model y TAC, se obtuvieron magnitudes como voltaje eficaz, corriente eficaz, potencias activa, reactiva y aparente del sistema. Estos resultados fueron determinantes para evaluar la eficiencia energética, la calidad del suministro y el efecto del cargador sobre la red.

2.13.7.1 Dimensionamiento del inversor monofásico.

Para el dimensionamiento y validación del sistema se empleó el programa ATPDraw, una herramienta de gran utilidad en los ámbitos académico y profesional gracias a su capacidad para simular con alta precisión circuitos eléctricos y electrónicos de potencia. Este programa dispone de una extensa biblioteca de componentes que facilita la construcción de modelos y permite representar de manera realista los diferentes dispositivos requeridos en la investigación.

El proceso de modelado se inició con la representación del inversor, considerado el elemento central en la etapa de conversión de energía. Para ello, se incorporó un

interruptor electrónico denominados Q1, Q2, Q3 y Q4 como se puede observar en la Fig. 2.31. configurado para emular el comportamiento de un transistor IGBT, el comportamiento secuencial de estos transistores esta comandado por un bloque MODELS denominado 'trig' como se muestra en la Fig. 2.41, este dispositivo es ampliamente utilizado en inversores debido a su elevada capacidad de conmutación y su respuesta eficiente en aplicaciones de potencia. Complementariamente, se integraron un diodo y una resistencia dispuestos en serie y en paralelo con el interruptor, el valor seleccionado para la resistencia conectada en serie con el diodo es de 0.015 ohm, mientras que la resistencia colocada en paralelo presenta el mismo valor, 0.015 ohm., con el fin de reforzar el funcionamiento del sistema al momento de realizar la simulación.

Como medida de protección frente a sobretensiones y transitorios que pudieran afectar la integridad de los semiconductores, se implementó una red snubber. Esta se conformó por una resistencia y un capacitor conectados en serie, cuyos valores son de 1 ohm y 0.01 μF , cuya función es disipar la energía almacenada y atenuar los picos de tensión generados durante los procesos de conmutación, incrementando así la fiabilidad y la vida útil del circuito.

En las pruebas iniciales, destinadas a evaluar el desempeño del inversor, se empleó en el lado de alimentación una fuente de corriente continua de 120 V, utilizada como representación equivalente de un panel [FV](#). Esta configuración permitió analizar la interacción entre la fuente renovable y el inversor, así como evaluar el proceso de conversión de corriente continua a corriente alterna. Posteriormente, con el propósito de realizar un análisis más práctico, se decidió modelar un panel solar utilizando valores típicos de temperatura e irradiancia. A partir de estas condiciones se obtiene una señal de voltaje y corriente continua, la cual servirá como fuente de alimentación principal para todo el sistema.

En cuanto a la carga, se modeló una red de corriente alterna con el valor de 159.79 V corresponde al voltaje máximo de la señal, lo que equivale a un voltaje eficaz de aproximadamente 120 V, acompañada de una resistencia y una inductancia conectadas en serie, con un valor de 0.05 ohm y 0.00005 mH, con el fin de reproducir un comportamiento típico de carga. Sobre esta red se implementó un filtro de tipo LLC como se evidencia en la Fig. 2.28, cuya función principal es mitigar el ruido eléctrico y atenuar las componentes de alta frecuencia generadas por la conmutación del inversor, el valor de la inductancia del filtro es de 1000E-3 mH y el valor del capacitor es de 50E-3 μF . La elección de este filtro se fundamenta en que sus reactancias presentan bajas pérdidas de energía, lo que permite un mejor aprovechamiento de la potencia y garantiza una salida de corriente alterna más estable y de mayor calidad.

También se optó por utilizar un transformador con una relación de transforma-

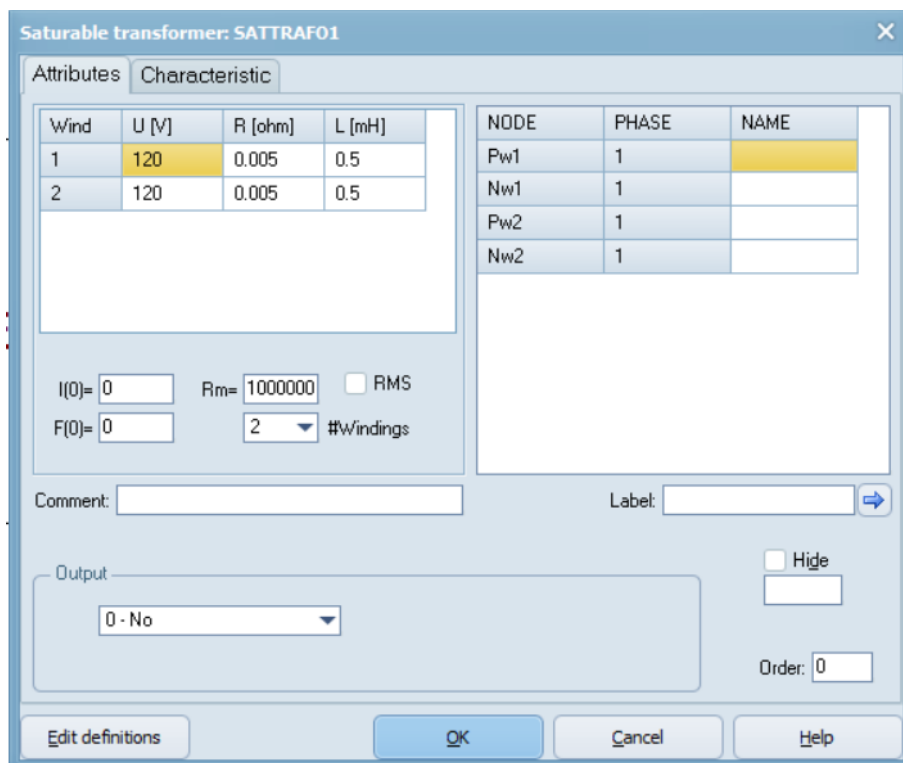


Figura 2.30: Ajuste del transformador con relación 1:1

ción 1:1 el mismo que se ajustó como se observa en la Fig. 2.30, el cual actúa como un elemento de filtrado dentro del sistema. Este componente contribuye a mejorar el comportamiento de la corriente, reduciendo posibles distorsiones y facilitando una forma de onda más estable. Gracias a ello, se obtiene una base más precisa para el posterior cálculo de las potencias activas y reactivas del sistema, garantizando así resultados más confiables en el análisis y la simulación.

El esquema desarrollado en ATPDraw, el cual se muestra en la Fig. 2.31 permitió modelar de manera adecuada el comportamiento del sistema inversor, considerando tanto los dispositivos semiconductores como los elementos de protección y filtrado, lo que proporcionó resultados confiables para el análisis y la validación del modelo teórico planteado en la investigación.

2.13.7.2 Modelación de un panel fotovoltaico.

Para modelar el panel solar **FV** se consideran como variables fundamentales la temperatura y la irradiación solar, debido a que ambas condicionan directamente el comportamiento eléctrico del módulo. La potencia generada depende de los valores instantáneos de estas dos magnitudes: variaciones en la irradiancia modifican la corriente producida, mientras que cambios en la temperatura influyen principalmente en el voltaje del panel.

En el modelo implementado, el cual se observa en la Fig. 2.32, se emplean bloques

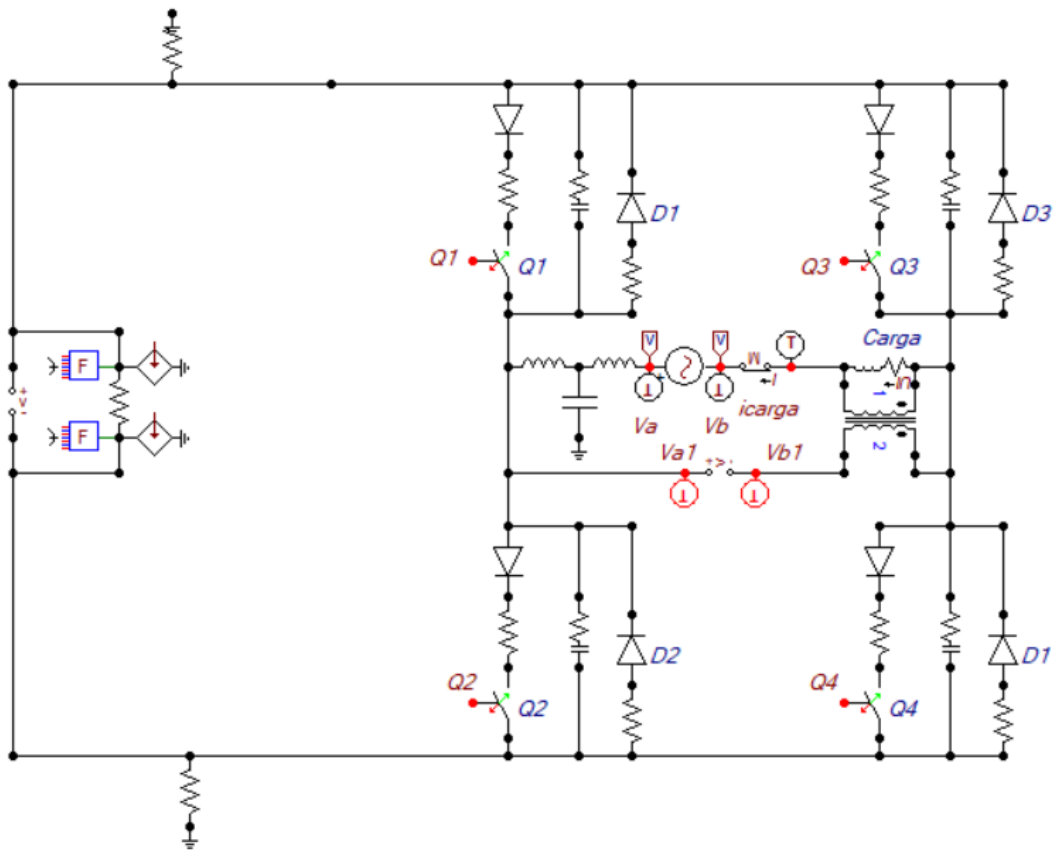


Figura 2.31: Programación del circuito del inversor en ATPDraw

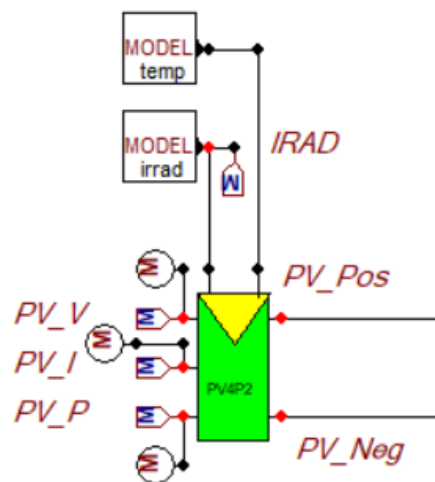


Figura 2.32: Modelación del panel Fotovoltaico en ATPDraw

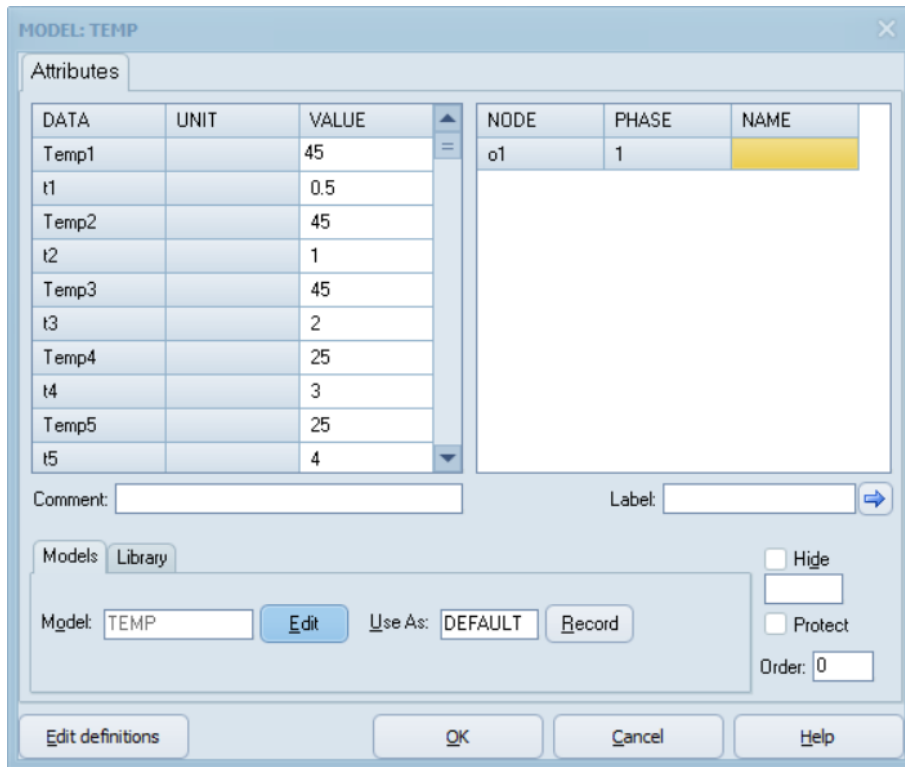


Figura 2.33: Parámetros de la temperatura para el panel Fotovoltaico en ATPDraw

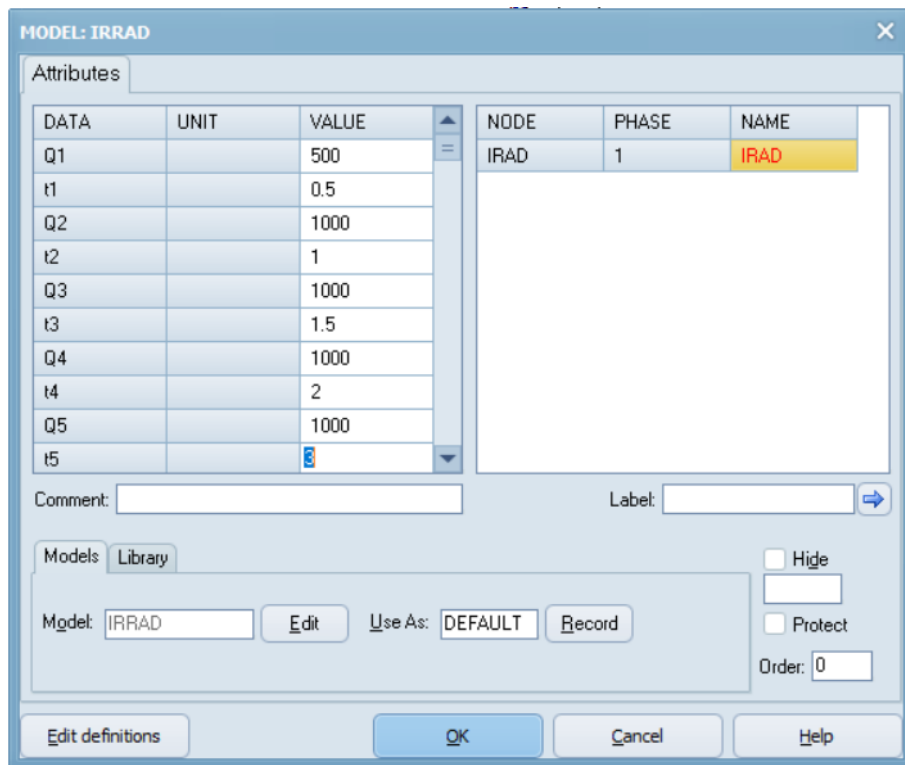


Figura 2.34: Parámetros de la irradiancia para el panel Fotovoltaico en ATPDraw

MODEL que proporcionan las señales de temperatura, la cual se encuentra definida según lo presentado en el listado 2.1, mientras que los valores de temperatura utilizados se ilustran en la Fig. 2.33, e irradiancia, de igual manera, se encuentra definida conforme a lo presentado en el listado 2.2, y los parámetros empleados se ilustran en la Fig.2.34, las cuales actúan como entradas dinámicas del panel fotovoltaico. Adicionalmente, el modelo recibe las señales $PV - V$, $PV - I$ y $PV - P$, que corresponden al voltaje, corriente y potencia eléctrica del panel, respectivamente; estas variables permiten representar con mayor precisión la respuesta eléctrica del módulo frente a las condiciones ambientales.

Como resultado del modelo, se obtienen las señales $PV_{positiva}$ y $PV_{negativa}$, que representan las salidas eléctricas del panel en sus terminales positivo y negativo, permitiendo su integración con el resto del sistema de conversión e inyección de potencia.

```

1 MODEL TEMP
2 DATA Temp1 , t1 , Temp2 , t2 , Temp3 , t3 , Temp4 , t4 , Temp5 , t5
3 --INPUT i1 , i2
4 OUTPUT o1
5 VAR o1
6 INIT
7   o1 :=25
8 ENDINIT
9 EXEC
10 if t<t1 then
11   o1:=Temp1
12 elseif t>=t1 and t<t2 then
13   o1:=((Temp2-Temp1)/(t2-t1))*(t-t1)+Temp1
14 elseif t>=t2 and t<t3 then
15   o1:=((Temp3-Temp2)/(t3-t2))*(t-t2)+Temp2
16 elseif t>=t3 and t<t4 then
17   o1:=((Temp4-Temp3)/(t4-t3))*(t-t3)+Temp3
18 elseif t>=t4 and t<t5 then
19   o1:=((Temp5-Temp4)/(t4-t4))*(t-t3)+Temp4
20 elseif t>=t5 then
21   o1:=Temp5
22 endif
23 ENDEXEC
24 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.1: MODELS Temperatura

```

1 MODEL IRRAD
2 DATA Q1,t1,Q2,t2,Q3,t3,Q4,t4,Q5,t5,Q6,t6,Q7
3 --INPUT i1,i2
4 OUTPUT IRAD
5 VAR IRAD
6 INIT
7   IRAD:=0
8 ENDINIT
9 EXEC
10 if t<t1 then
11   IRAD:=Q1
12 elseif t>=t1 and t<t2 then
13   IRAD:=((Q2-Q1)/(t2-t1))*(t-t1)+Q1
14 elseif t>=t2 and t<t3 then
15   IRAD:=((Q3-Q2)/(t3-t2))*(t-t2)+Q2
16 elseif t>=t3 and t<t4 then
17   IRAD:=((Q4-Q3)/(t4-t3))*(t-t3)+Q3
18 elseif t>=t4 and t<t5 then
19   IRAD:=((Q5-Q4)/(t5-t4))*(t-t4)+Q4
20 elseif t>=t5 and t<t6 then
21   IRAD:=((Q6-Q5)/(t6-t5))*(t-t5)+Q5
22 elseif t>=t6 then
23   IRAD:=Q6
24 endif
25
26 ENDEXEC
27 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.2: MODELS Irradiancia

2.13.7.3 Modelación del sistema MPPT para el panel fotovoltaico.

En este caso, el algoritmo [MPPT](#) se implementó mediante un bloque MODELS. El [MPPT](#) es un método de control que permite que el panel [FV](#) opere en el punto donde entrega la máxima potencia posible frente a las variaciones de temperatura e irradiancia, optimizando así el aprovechamiento energético del sistema.

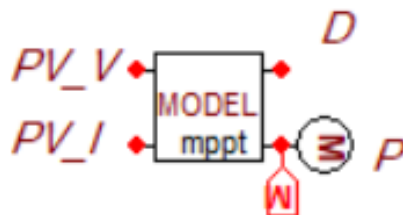


Figura 2.35: Modelo del MPPT en ATPDraw

El bloque MODELS contiene la programación correspondiente al algoritmo, cuyo listado se presenta en 2.3 y cuya representación gráfica se muestra en la Fig 2.35.

```

1 MODEL Mppt
2 INPUT vpv, ipv    -- Voltaje y corriente del panel fotovoltaico
3 OUTPUT D, P      -- Ciclo de trabajo (duty cycle) ajustado
4 VAR Dinit, Dmax, Dmin, deltaD, Vold, Pold, Dold, dV, dP, P, D
5 INIT
6 D:=0.58          -- Inicializa el duty cycle con un valor de 0.4
7 Dinit:=0.58     -- Valor inicial del duty cycle
8 Dmax:=0.9       -- Valor maximo permitido para el duty cycle
9 Dmin:=0.1       -- Valor minimo permitido para el duty cycle
10 deltaD:=2e-3    -- Paso de ajuste para el duty cycle (20
    microvoltios)
11 Vold:=0         -- Inicializa el voltaje anterior en 0
12 Pold:=0         -- Inicializa la potencia anterior en 0
13 Dold:=Dinit     -- Establece el duty cycle anterior al valor
    inicial
14 ENDINIT
15 EXEC
16 P:=vpv * ipv    -- Calcula la potencia actual del panel (P = V * I)
17 dV:=vpv - Vold -- Calcula la diferencia de voltaje entre el paso
    actual y el anterior
18 dP:=P - Pold    -- Calcula la diferencia de potencia entre el paso
    actual y el anterior
19 -- Ajusta el duty cycle basado en las diferencias de potencia y
    voltaje
20 if dP <> 0 then -- Si la potencia ha cambiado
21     if dP > 0 then -- Si la potencia ha disminuido
22         if dV < 0 then -- Si el voltaje ha disminuido
23             D:=Dold + deltaD -- Reduce el duty cycle
24         else
25             D:=Dold - deltaD -- Aumenta el duty cycle
26         endif
27     elsif dV < 0 then -- Si la potencia ha aumentado y el voltaje ha
        disminuido
28         D:=Dold + deltaD -- Aumenta el duty cycle
29     else
30         D:=Dold - deltaD -- Aumenta el duty cycle (aunque el
        voltaje haya aumentado)
31     endif
32 else
33     D:=Dold -- Mantiene el duty cycle actual si no hay cambio en la
        potencia
34 endif
35 -- Controla los limites del duty cycle para evitar valores no
    deseados

```

```

36 if D >= Dmax or D <= Dmin then
37     D:=Dold {max:0.6 min:0.4} -- Restringe el duty cycle al valor
        anterior si excede los limites
38 endif
39 -- Actualiza las variables para el proximo ciclo
40 Dold:=D    -- Actualiza el duty cycle anterior
41 Vold:=vpv  -- Actualiza el voltaje anterior
42 Pold:=P    -- Actualiza la potencia anterior
43 --P:=1000
44 --D:=0.5
45 ENDEXEC
46 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.3: MODELS MPPT.

2.13.7.4 Bloque Generador de Pulsos a partir del *Duty Cycle* del MPPT.

La señal resultante del algoritmo [MPPT](#) se obtiene a través del bloque MODEL llamado `pulsGen`, como se observa en la Fig. [2.36](#), cuya salida corresponde a la variable D , que representa el *duty cycle* o ciclo de trabajo requerido para el circuito elevador. Esta variable es utilizada como referencia para generar la señal de conmutación del interruptor electrónico del convertidor. Para ello, D ingresa a un segundo bloque programado denominado `pulsGen`, el cual recibe dos señales: la primera es una onda diente de sierra normalizada con amplitud unitaria, que actúa como portadora, y la segunda es el propio ciclo de trabajo proveniente del [MPPT](#).

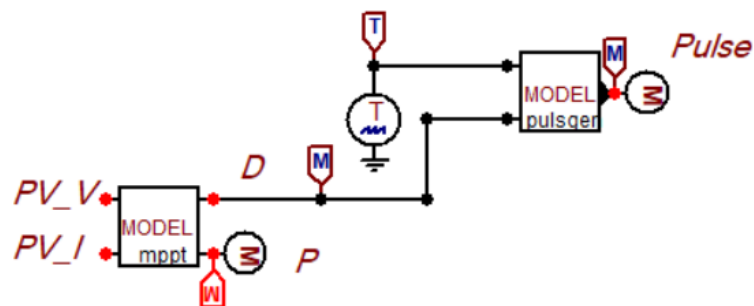


Figura 2.36: Generador de pulso a partir del ciclo de trabajo en ATPDraw

El bloque compara continuamente el valor instantáneo de la portadora con el valor de D ; cuando el *duty cycle* es mayor o igual que la portadora, el modelo asigna un uno lógico a la salida pulso, generando así un pulso de activación para el interruptor del convertidor [Boost](#). En caso contrario, la salida se mantiene en cero, como el algoritmo que se muestra en el listado [2.4](#). Este procedimiento implementa digitalmente la técnica clásica de modulación por ancho de pulso [PWM](#), permitiendo

que el convertidor opere con la relación de conducción requerida para transferir la energía desde el panel fotovoltaico hacia la etapa de potencia de forma eficiente y conforme al valor óptimo determinado por el [MPPT](#).

```

1 MODEL pulsGen    -- Define el modelo llamado 'pulsGen'
2 --DATA d1,d2    -- Comentario para datos adicionales, no usados en
   este modelo
3 INPUT p, D      -- Define las variables de entrada:
4                 -- p: Valor de la portadora (referencia para el
   duty cycle)
5                 -- D: Duty cycle (ciclo de trabajo)
6
7 OUTPUT pulso    -- Define la variable de salida:
8                 -- pulso: Senal de salida que se ajustara segun el
   duty cycle
9
10 VAR pulso      -- Declara la variable utilizada dentro del modelo
11                -- pulso: Almacena el valor de la senal de salida
12 INIT
13 pulso := 0     -- Inicializa la variable 'pulso' a 0 al inicio del
   modelo
14 ENDINIT
15 EXEC
16 -- Comienza la seccion de ejecucion del modelo
17 if D >= p then -- Si el duty cycle 'D' es mayor o igual a la
   portadora 'p'
18     pulso := 1  -- Asigna el valor 1 a 'pulso'
19 else
20     pulso := 0  -- De lo contrario, asigna el valor 0 a 'pulso'
21 endif
22 -- Fin de la seccion de ejecucion del modelo
23 ENDEXEC
24 ENDMODEL      -- Fin del modelo

```

Algoritmo 2.4: MODELS PulsGen.

2.13.7.5 Circuito elevador del panel solar fotovoltaico.

El pulso generado por el bloque pulsGen se aplica directamente al interruptor electrónico del convertidor [Boost](#), el cual se observa en la Fig. [2.37](#), cuyo propósito es incrementar el nivel de voltaje proveniente del arreglo [FV](#) hasta un valor adecuado para la etapa posterior del inversor o del sistema de acondicionamiento de potencia. En este convertidor, el ciclo de trabajo D determina la relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida, de modo que un incremento en el ciclo de trabajo provoca un mayor tiempo de conducción del interruptor y, consecuentemente, un aumento del voltaje de salida. Esta característica permite que el convertidor [Boost](#)

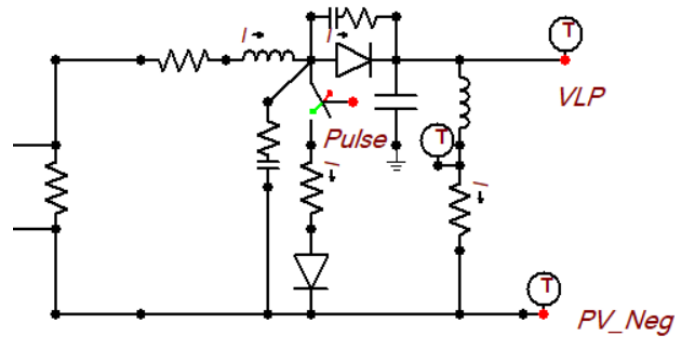


Figura 2.37: Circuito elevador de voltaje en ATPDraw

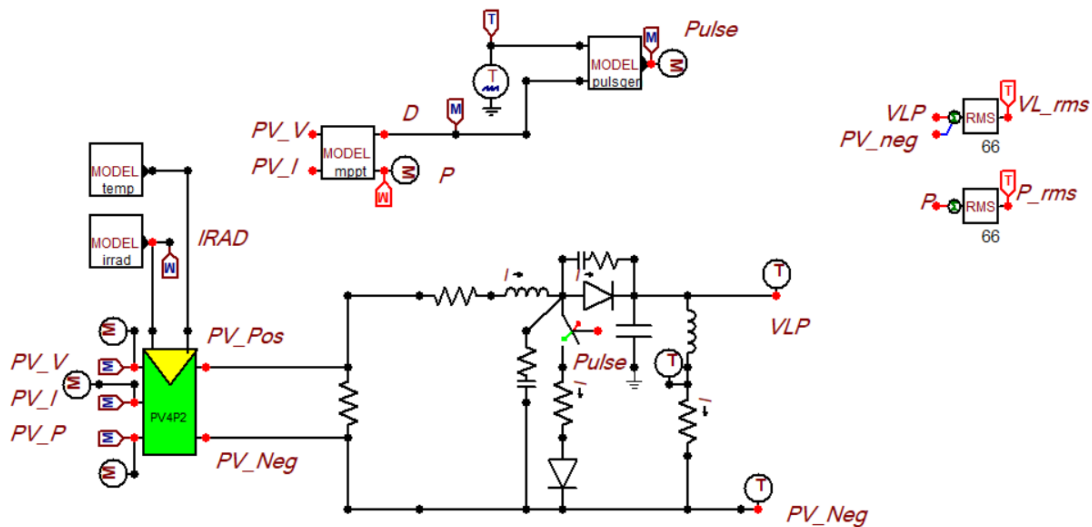


Figura 2.38: Integración del Panel Solar con el Convertidor elevador en ATPDraw

actúe de manera coordinada con el algoritmo **MPPT**, mientras el **MPPT** ajusta dinámicamente el valor óptimo de D para extraer la máxima potencia disponible del panel solar, el convertidor ejecuta físicamente dicho ciclo mediante la modulación **PWM**. Así, se asegura que la energía sea transferida al sistema con un nivel de voltaje regulado, estable y adecuado para la operación del inversor y los requerimientos de la carga o de la red.

2.13.7.6 Integración del Panel Solar con el Convertidor elevador y Cálculo de Magnitudes Eléctricas.

El sistema parte del modelo **FV**, el cual recibe como entradas las condiciones ambientales de temperatura y radiación solar, generadas mediante bloques independientes que reproducen el comportamiento dinámico del recurso solar. A partir de estos parámetros, el modelo **PV** entrega las variables eléctricas fundamentales del generador: $PV - V$ se refiere al voltaje, $PV - I$ corriente y $PV - P$ potencia instantánea.

Estas variables se utilizan como entrada del algoritmo **MPPT**, que determina el valor óptimo del ciclo de trabajo D requerido para maximizar la potencia extraída del módulo **FV**. El valor de D se envía posteriormente al bloque generador de pulsos **pulsGen**, el cual produce la señal **Pulse** que controla el interruptor del convertidor elevador mostrado en la Fig. 2.37.

El convertidor **Boost** recibe la energía desde los nodos PV_{Pos} y PV_{Neg} , elevando el voltaje de entrada hasta un nivel superior denominado VLP , que corresponde al voltaje de salida del convertidor antes de ser procesado por las etapas posteriores del sistema. Tanto VLP como PV_{Neg} se utilizan como referencias para evaluar el desempeño del convertidor, por lo que estas señales se envían a un bloque tipo Fortran encargado de calcular su valor eficaz o RMS . El resultado de este procesamiento entrega los valores VL_{rms} , que representa el voltaje RMS en la salida del circuito elevador, y PV_{negrms} si se requiere analizar la referencia negativa.

De manera similar, la potencia instantánea generada por el panel y calculada por el **MPPT**, P se dirige también a un bloque RMS , el cual obtiene el valor eficaz de la potencia $P - rms$, permitiendo cuantificar de forma clara y estable la potencia real suministrada por el generador fotovoltaico bajo las condiciones de operación establecidas. La obtención de los valores RMS para voltaje y potencia facilita el análisis energético del sistema y permite evaluar la eficiencia del convertidor **Boost** y del algoritmo **MPPT** en condiciones dinámicas. El circuito completo, junto con todos los componentes que lo integran, se muestra en la Fig. 2.38.

2.13.7.7 Generación de la onda triangular mediante un bloque **MODELS**.

Para garantizar el disparo adecuado de los transistores IGBT en la secuencia requerida, primero se genera una onda triangular 2.39 que se compara con una señal sinusoidal. De esta comparación, el bloque **Model PWM ??** produce una señal **SPWM**, la cual se encarga de activar los transistores en el orden correcto, asegurando así el funcionamiento sincronizado del inversor.

Para generar la señal triangular requerida en el proceso de modulación, se empleó un bloque de tipo **Model** en el software **ATPDraw** 2.39. Este bloque cuenta con una entrada de señal senoidal y genera como salida la señal triangular. El **model** se encarga de generar una señal triangular continua que actúa como portadora dentro de la modulación sinusoidal por ancho de pulso **SPWM**. La frecuencia de esta señal se ajusta a partir de la frecuencia fundamental de la senoidal $ftri$ y del número de triángulos por semiciclo $ntri$, lo que permite controlar la frecuencia de conmutación del inversor. El algoritmo realiza de forma iterativa el cálculo del incremento de la señal triangular según el paso de tiempo dt y la pendiente $slope$, invirtiendo la dirección de la rampa cuando alcanza los límites superior e inferior. Además,

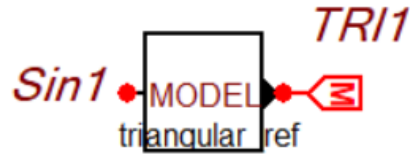


Figura 2.39: Bloque MODELS encargado de generar de señal triangular.

el signo de la señal triangular cambia según el semiciclo de la referencia senoidal *sref*, generando así una portadora con polaridad controlada que mantiene la sincronización entre ambas señales y garantiza un comportamiento simétrico durante el proceso de modulación, como se observa en el algoritmo de programación 2.5.

De esta manera, la correcta elaboración de la onda triangular no solo permite implementar la técnica de modulación, sino que además asegura que la secuencia de conmutación mantenga la forma de onda deseada en la salida, optimizando la calidad de la señal aplicada a la carga y reduciendo los niveles de distorsión.

```

1 MODEL TRIANGULAR_REF
2 DATA ftri, Atri, n_tri
3 INPUT s_ref
4 OUTPUT tri_mod
5 VAR tri, slope, sgn, t_old, dt, tri_mod
6 INIT
7   tri := 0
8   t_old := 0
9   slope := 4 * ftri * Atri * n_tri
10  tri_mod := 0
11  sgn := 1
12 ENDINIT
13 EXEC
14 -- Este modelo genera una senal triangular modulada.
15 -- Usa la frecuencia (ftri), amplitud (Atri) y numero de triangulos
   por semiciclo (n_tri).
16 -- La salida "tri_mod" es una onda triangular que cambia de signo
   segun "s_ref".
17 dt := T - t_old           -- Calcula el paso de tiempo
18 t_old := T
19 tri := tri + slope * dt   -- Integra la pendiente para formar la
   rampa
20 IF (tri >= Atri) THEN     -- Invierte la pendiente al llegar al
   maximo
21   tri := 2*Atri - tri
22   slope := -slope
23 ENDIF
24 IF (tri <= 0) THEN        -- Invierte la pendiente al llegar al
   minimo
25   tri := -tri
26   slope := -slope
27 ENDIF
28 IF (s_ref >= 0) THEN     -- Define el signo de la salida segun
   s_ref
29   sgn := 1
30 ELSE
31   sgn := -1
32 ENDIF
33 tri_mod := tri * sgn     -- Salida triangular modulada en signo
34 ENDEXEC
35 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.5: Model Señal Triangular

2.13.7.8 Modelación del SPWM mediante un bloque MODELS en Atp-Draw.

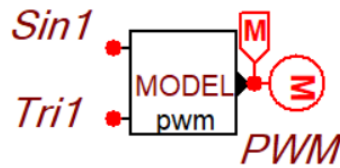


Figura 2.40: Modelación del generador de disparo de los transistores mediante el algoritmo SPWM.

La técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal por sus siglas en inglés **SPWM**, se basa en la comparación entre una señal de referencia senoidal y una señal portadora triangular de frecuencia considerablemente mayor. Para el desarrollo de la simulación, esta técnica se implementó mediante un bloque de tipo Model en el programa ATPDraw ??, este bloque recibe como entradas dos señales previamente generadas y sincronizadas: la primera es la señal de referencia senoidal, que define la forma de onda deseada en la salida, y la segunda es la señal triangular, que actúa como portadora para determinar los instantes de conmutación. A partir de la comparación entre ambas señales, el bloque genera como salida una señal compuesta por pulsos modulados, que constituyen la base para el control de disparo de los dispositivos de conmutación.

El funcionamiento del bloque se basa en la comparación continua de las dos señales de entrada. Cuando el valor instantáneo de la señal triangular supera a la señal senoidal, la salida se mantiene en un nivel bajo, generando un pulso con ancho mínimo al inicio del ciclo de modulación. A medida que la señal triangular desciende por debajo de la señal de referencia senoidal, los pulsos modulados aumentan progresivamente su ancho. Este comportamiento permite que la secuencia de pulsos se ajuste a la forma de onda senoidal deseada, reflejando indirectamente su variación mediante la duración de los intervalos de conmutación, como se observa en el algoritmo de programación 2.6.

Bajo este principio se determinan los anchos de pulso adecuados para el control de los transistores IGBT que conforman el inversor. La variación en la duración de cada pulso asegura que los dispositivos de conmutación se activen y desactiven en los instantes precisos, permitiendo que la señal de salida en la carga se aproxime lo más posible a una onda senoidal. De esta manera, se reduce el contenido armónico y se optimiza la calidad del voltaje suministrado, aspecto fundamental para el correcto funcionamiento de sistemas eléctricos alimentados por inversores.

```

1 MODEL PWM
2 --DATA dTri{Dflt:0.02}
3 INPUT Sin1, Tri1
4 OUTPUT PWM
5 VAR PWM
6 INIT
7   PWM:=0
8 ENDINIT
9 EXEC
10  PWM:=0
11  -- Este modelo genera una senal PWM comparando dos se#ales:
12  -- "Sin1" (onda senoidal de referencia) y "Tri1" (onda triangular
13  -- portadora).
14  -- Si la diferencia (Sin1 - Tri1) es positiva, la salida PWM vale
15  -- 1.
16  -- Si la diferencia (Sin1 - Tri1) es negativa, la salida PWM vale
17  -- -1.
18  -- De esta forma se obtiene una senal de modulacion por ancho de
19  -- pulso bipolar.
20 IF Sin1 > 0 AND (Sin1-Tri1)>0 THEN
21   PWM:= 1
22 else if Sin1 <= 0 AND (Sin1-Tri1)<0 then
23   PWM:=-1
24 endif
25 endif
26 ENDEXEC
27 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.6: Model SPWM

2.13.7.9 Sistema de disparo de los transistores.

Para obtener la forma de onda y el nivel de voltaje requeridos en la salida del inversor, así como en la etapa de carga, resulta esencial establecer un control preciso sobre los instantes de activación de los transistores IGBT que conforman el circuito inversor. Este control define los distintos modos de operación, clasificados en tres estados principales: positivo, negativo y de referencia o estado cero. La adecuada coordinación y activación de estos estados permite que la señal de salida reproduzca de manera eficaz una onda de voltaje alterno con las condiciones de amplitud y contenido armónico requerido por las normativas [161, 162].

Para llevar a cabo la síntesis del voltaje requerido se utilizó la técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal SPWM [86], reconocida como uno de los métodos de control armónico más empleados en el campo de la electrónica de potencia. Mediante esta técnica, los pulsos de conmutación definen con precisión los

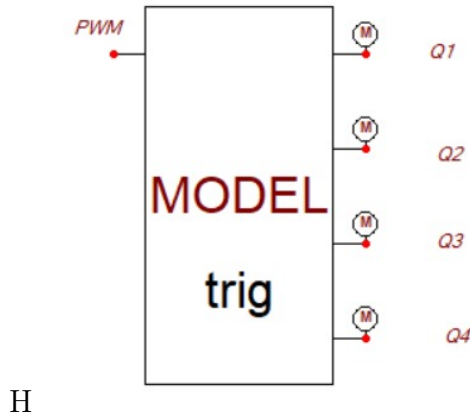


Figura 2.41: Model de control de disparos.

instantes en que cada transistor debe activarse o desactivarse, garantizando así un control adecuado del inversor.

El esquema de control fue implementado en el programa ATPDraw mediante la programación de un bloque de tipo MODELS 2.41. En este bloque se programó un bucle encargado de recibir como entrada la señal modulada generada mediante la técnica SPWM, para posteriormente entregar como salidas las señales de disparo correspondientes a cada uno de los transistores IGBT. Los dispositivos de conmutación fueron identificados con Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4 , lo que permitió organizarlos sistemáticamente y facilitar la programación de los disparos del puente.

El mecanismo de activación de los transistores se estructuró en función de los tres estados previamente descritos. En el estado positivo, se disparan dos transistores dispuestos en diagonal dentro del puente inversor, lo que asegura que la corriente fluya en el sentido requerido hacia la carga. Para el estado negativo, se activan los transistores ubicados en la diagonal opuesta, permitiendo invertir el flujo de corriente y modificar su dirección de circulación. Finalmente, en el estado cero se disparan dos transistores situados de manera horizontal, lo que genera un nivel de referencia en la salida del inversor sin transferencia de potencia hacia la carga, estableciendo así un punto neutro de operación, tal como se observa en el algoritmo de programación 2.7.

Gracias al control basado en la técnica SPWM, el inversor es capaz de generar una forma de onda de salida que se aproxima a la senoidal ideal, minimizando distorsiones y mejorando la calidad del voltaje suministrado. Asimismo, la implementación de esta estrategia en el entorno de simulación ATPDraw permitió verificar la correcta secuencia de disparo y confirmar que el comportamiento dinámico del inversor cumpliera con los requerimientos del sistema, constituyendo una etapa esencial antes de su implementación en una aplicación real.

```

1 MODEL Trig
2 --DATA d1,d2
3 INPUT PWM
4 OUTPUT Q1,Q2,Q3,Q4
5 VAR Q1,Q2,Q3,Q4
6 INIT
7   Q1:=0
8   Q2:=0
9   Q3:=0
10  Q4:=0
11 ENDINIT
12 EXEC
13  -- Este modelo genera las se#ales de disparo (Q1 a Q4)
14  -- La senal PWM determina que transistores estan activados:
15  -- Si PWM > 0 activa Q1 y Q4 (mitad positiva del ciclo)
16  -- Si PWM < 0 activa Q2 y Q3 (mitad negativa del ciclo)
17  -- Si PWM = 0 mantiene Q2 y Q4 encendidos por defecto
18  if PWM > 0 then
19    Q1:=1
20    Q2:=0
21    Q3:=0
22    Q4:=1
23  else
24    if PWM<0 then
25      Q1:=0
26      Q2:=1
27      Q3:=1
28      Q4:=0
29    else
30      Q1:=0
31      Q2:=1
32      Q3:=0
33      Q4:=1
34    endif
35  endif
36 ENDEXEC
37 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.7: Model Trigger

2.13.7.10 Potencia activa en la carga.

Con el fin de analizar el comportamiento del sistema y evaluar la energía transferida hacia la carga, se realizaron mediciones en puntos estratégicos del circuito. Se registró la tensión en ambos extremos de la fuente, que representa a la red eléctrica o a la carga, obteniendo información precisa sobre la diferencia de potencial aplicada.

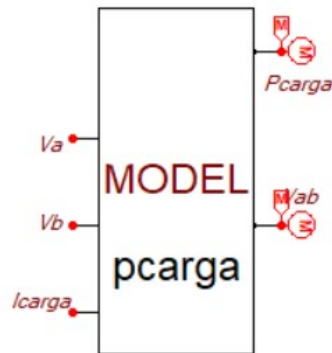


Figura 2.42: Model de Potencia en la carga.

De manera simultánea, se midió la corriente que circula a través de la carga, dato indispensable para el cálculo posterior de la potencia.

El procedimiento para determinar la potencia activa en la carga se implementó mediante un bloque de tipo Model en el programa ATPDraw. 2.42. Este bloque fue configurado para recibir como entradas las señales de corriente de la carga y los valores de voltaje previamente medidos. A partir de estas entradas, el bloque genera como salidas la diferencia de potencial entre ambos extremos de la carga y la potencia activa correspondiente a dicho elemento.

El algoritmo implementado dentro del bloque Model realiza el cálculo de manera sencilla pero eficiente. En primer lugar, se determina la diferencia entre los voltajes medidos en los terminales de la carga, obteniendo así la tensión efectiva aplicada. Posteriormente, este valor se multiplica por la corriente registrada, generando la potencia instantánea en la carga. Esta operación refleja de manera precisa la relación fundamental entre tensión, corriente y potencia eléctrica, asegurando que los resultados de la simulación sean consistentes con el comportamiento esperado en un sistema físico real, como se observa en el algoritmo de programación 2.8.

De esta manera, el uso del bloque programado en ATPDraw proporcionó un método confiable y automatizado para la medición de la potencia, evitando cálculos externos adicionales y suministrando información precisa para el análisis del desempeño del inversor y de la red de carga conectada.

```

1 MODEL Pcarga
2 --DATA d1,d2
3 INPUT Va, Vb, Icarga      -- Entradas: tensiones Va y Vb,
   corriente de carga
4 OUTPUT Pcarga,Vab        -- Salidas: potencia y voltaje entre Va
   y Vb
5 VAR Pcarga, Vab
6 INIT
7   Vab:=0                  -- Inicializa el voltaje en 0
8 ENDINIT
9 EXEC
10  Vab:=(Va-Vb)           -- Calcula el voltaje entre las dos
   fases
11 ENDMODEL
12  Pcarga:= Vab*Icarga    -- Calcula la potencia instantanea (V *
   I)
13 ENDEXEC
14 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.8: Model Potencia en la carga

El bloque Pcarga 2.8, tiene como propósito determinar el voltaje aplicado a la carga y la potencia instantánea que esta demanda. Para ello, el modelo recibe como entradas los valores de tensión en los nodos V_a y V_b , junto con la corriente instantánea de la carga I_{carga} . En primer lugar, el algoritmo calcula la diferencia de potencial entre los dos nodos, obteniendo así el voltaje que efectivamente actúa sobre la carga. Esta operación se expresa mediante,

$$V_{ab} = V_a - V_b, \quad (2.1)$$

donde V_{ab} representa el voltaje entre las fases o terminales consideradas. Este valor es fundamental para caracterizar el comportamiento eléctrico de la carga dentro del sistema.

Posteriormente, conociendo el voltaje aplicado y la corriente que circula por la carga, se evalúa la potencia instantánea mediante la relación básica de la teoría de circuitos,

$$P_{carga} = V_{ab}I_{carga}. \quad (2.2)$$

Esta ecuación 2.2 corresponde a la definición convencional de potencia eléctrica instantánea, la cual permite cuantificar el flujo de energía en cada instante del proceso de simulación. La magnitud obtenida es de relevancia para el análisis dinámico del sistema, debido a que constituye la entrada para módulos posteriores, tales como filtros de potencia media.

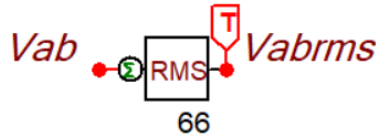


Figura 2.43: TAC RMS Voltaje.

En conjunto, el modelo implementa un procedimiento directo y eficiente para la obtención de variables esenciales en la caracterización energética del sistema eléctrico simulado.

2.13.7.11 Voltaje Efectivo.

Con el fin de determinar el valor del voltaje eficaz presente en la carga, se utilizó un bloque de tipo TAC en el software ATPDraw 2.43. Este componente de simulación está diseñado para recibir una señal de corriente alterna y calcular directamente su magnitud en términos de valor eficaz, también conocido como RMS. Este parámetro es de gran importancia en el análisis de sistemas eléctricos, debido a que permite representar una señal de corriente alterna mediante un valor equivalente que refleja su verdadera capacidad de producir trabajo o transferir potencia activa a la carga.

En el procedimiento desarrollado, el bloque TAC recibió como entrada la señal de voltaje de la carga. A partir de esta señal, el bloque calculó su valor eficaz, que matemáticamente se obtiene dividiendo el valor de voltaje máximo entre la raíz de dos, entregando como resultado el voltaje RMS de salida. Este valor constituye un indicador fundamental para evaluar el desempeño del inversor, debido a que el voltaje eficaz representa la magnitud que tiene efectos prácticos sobre los elementos de la carga, a diferencia de los valores instantáneos de la señal alterna, los cuales varían de manera continua.

El uso de este bloque dentro de la simulación permitió automatizar y simplificar el cálculo del voltaje RMS, evitando la necesidad de realizar operaciones matemáticas externas. De esta manera se aseguró la confiabilidad de los resultados y se contó con un parámetro esencial para analizar el desempeño del sistema, así como la calidad de la señal eléctrica generada en la salida del inversor.

2.13.7.12 Corriente Efectiva.

Para calcular el valor eficaz de la corriente que circula por la carga, se empleó un bloque TAC en el programa ATPDraw 2.44. Este bloque fue configurado para recibir la señal instantánea de corriente proveniente de la simulación y, a partir de ella, calcular de manera automática su magnitud eficaz, también conocida como corriente RMS. Este valor constituye un parámetro fundamental en el análisis eléctrico, de-

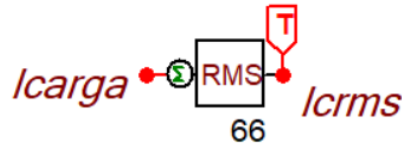


Figura 2.44: TAC RMS Corriente.

bido a que permite representar la corriente alterna mediante una corriente continua equivalente que produciría la misma disipación de potencia sobre una resistencia determinada.

Gracias a la utilización de este bloque se logró obtener una medición confiable y precisa de la corriente en la carga, lo que aportó información esencial para la evaluación del comportamiento del sistema. El valor eficaz obtenido no solo permitió verificar el correcto desempeño del inversor en la etapa de simulación, sino que también resultó indispensable para complementar los cálculos de potencia en conjunto con el voltaje RMS. De esta forma se consiguió un análisis más completo y representativo de la calidad de la señal entregada a la carga.

2.13.7.13 Filtrado de la potencia de la carga.

Se implementó un filtro para la señal de potencia de la carga, cuyo propósito era obtener el valor promedio de la potencia, el cual se consideró como la potencia activa del sistema. A partir de este valor, se calcularon la potencia aparente y la potencia reactiva mediante la utilización de un modelo adicional, que permitió realizar las correspondientes estimaciones y mediciones necesarias para el análisis del comportamiento de la carga.

Este programa implementa un filtro pasa-bajo de segundo orden, el cual toma como entrada la señal de potencia instantánea P_{carga} y entrega como salida P_{med1} , que representa la potencia media o suavizada del sistema. Su principal función es atenuar las variaciones rápidas y eliminar las oscilaciones presentes en la señal de entrada, permitiendo que solo los cambios lentos y relevantes sean visibles en la salida, como se observa en el algoritmo de programación 2.9.

```

1 MODEL filtro_Pmedia
2 DATA wn, zeta          -- Parametros: frecuencia
   natural y factor de amortiguamiento
3 INPUT Pcarga           -- Entrada: potencia
   instantanea
4 OUTPUT Pmed1           -- Salida: potencia filtrada (
   promedio)
5 VAR x1, x2, dx1, dx2, Pmed1
6 INIT
7   x1 := 0.4            -- Inicializacion de las
   variables del filtro
8   x2 := 0.4
9   Pmed1 := 0.4
10  dx1 := 0.4
11  dx2 := 0.4
12 ENDINIT
13 HISTORY
14 integral(dx1) {dflt:0.4} -- Definicion del integrador
   para dx1
15 dx1 {dflt:0.4}
16 integral(dx2) {dflt:0.4} -- Definicion del integrador
   para dx2
17 dx2 {dflt:0.4}
18 EXEC
19   -- Filtro pasa-bajo de segundo orden aplicado a Pcarga
20   dx1 := x2            -- Primera ecuacion diferencial
21   dx2 := wn*wn*Pcarga - 2*zeta*wn*x2 - wn*wn*x1 -- Segunda
   ecuacion diferencial
22
23   x1 := integral(dx1)  -- Integra dx1 para obtener x1
24   x2 := integral(dx2)  -- Integra dx2 para obtener x2
25   Pmed1 := x1          -- La salida es la potencia
   media filtrada
26 ENDEXEC
27 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.9: Potencia media de la Potencia de la carga

El filtro implementado en el algoritmo 2.9 corresponde a un filtro pasa-bajo de segundo orden, cuya finalidad es obtener una estimación suavizada de la potencia instantánea de la carga P_{carga} , eliminando las oscilaciones de alta frecuencia presentes en la señal. Este filtro se describe mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales,

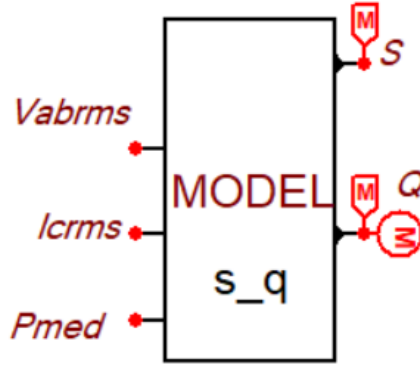


Figura 2.45: Model Potencia Aparente, Reactiva.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \omega_n^2 P_{carga} - 2\zeta\omega_n x_2 - \omega_n^2 x_1 \end{cases} \quad (2.3)$$

donde ω_n es la frecuencia de corte y ζ el factor de amortiguamiento del filtro.

La variable x_1 representa el estado principal del sistema y se utiliza como salida filtrada, es decir,

$$P_{med} = x_1 \quad (2.4)$$

Al combinar ecuaciones diferenciales 2.3, el filtro puede expresarse como una única ecuación diferencial de segundo orden, equivalente a la forma estándar de un sistema dinámico lineal amortiguado,

$$\ddot{P}_{med} + 2\zeta\omega_n \dot{P}_{med} + \omega_n^2 P_{med} = \omega_n^2 P_{carga} \quad (2.5)$$

La expresión 2.5 evidencia que la salida P_{med} responde suavemente a la potencia instantánea de entrada, atenuando las variaciones rápidas y preservando únicamente los cambios lentos asociados al comportamiento real del sistema eléctrico.

2.13.7.14 Potencia Aparente y Reactiva con su signo correspondiente.

Para determinar los valores de potencia activa, reactiva, aparente presentes en la carga, se empleó un bloque de tipo Model en el programa ATPDraw como se observa en la Fig.2.45, diseñado específicamente para procesar las variables eléctricas fundamentales del sistema. Este bloque recibe como entradas el valor eficaz del voltaje aplicado a la carga, el valor eficaz de la corriente que la atraviesa y la potencia activa instantánea. A partir de estas señales, el bloque calcula y entrega como resultados el valor promedio de la potencia activa, la magnitud de la potencia reactiva, la potencia aparente y el factor de potencia del sistema bajo análisis.

El funcionamiento interno del bloque se fundamenta en un algoritmo que aplica las definiciones clásicas de la teoría de potencias en corriente alterna. En primera instancia, se calcula el valor promedio de la potencia activa, considerando que esta variable presenta una variación senoidal. Es necesario utilizar un valor medio que represente de manera precisa la energía efectiva transferida a la carga. Posteriormente, la potencia aparente se determina mediante la multiplicación del voltaje eficaz por la corriente eficaz, conforme a la expresión tradicional utilizada en sistemas eléctricos para evaluar la magnitud total de potencia suministrada, como se observa en el algoritmo de programación 2.10. La potencia reactiva se obtiene mediante la relación matemática del triángulo de potencias, calculándose como la raíz cuadrada de la diferencia entre el cuadrado de la potencia aparente y el cuadrado de la potencia activa.

La implementación de este procedimiento permitió realizar un análisis detallado de las potencias características de la carga. De este modo, además de cuantificar la energía consumida, se logró evaluar la calidad del suministro eléctrico y el desempeño del sistema. Asimismo, contar con las magnitudes de potencia activa, reactiva y aparente, permitió realizar una valoración más completa de la eficiencia del inversor y del grado de aprovechamiento de la energía suministrada a la carga como se definió en la expresión 2.7.

En este modelo, la potencia reactiva Q , se calcula a partir de la potencia aparente y la potencia activa, mediante la expresión,

$$Q = \text{sgn}(V_{inv} \cos(\phi_{red}) - V_{ab}) \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.6)$$

Para calcular la potencia reactiva utilizando la expresión (2.6), primero se obtiene el valor de la potencia reactiva Q , asegurando que su valor sea mayor o igual que cero, mediante la expresión:

$$|Q| = +\sqrt{S^2 - P^2}. \quad (2.7)$$

Posteriormente, el signo de Q se determina a través de la comparación entre el voltaje del inversor V_{inv} y el voltaje de la red V_{ab} , considerando además el desfase entre ambas señales ϕ_{red} , como se definió en la expresión 2.6.

La expresión 2.6 indica si la tensión del inversor está adelantada o atrasada respecto a la red. Por lo tanto, si $Q > 0$, el inversor fotovoltaico esta enviando potencia reactiva hacia la red eléctrica y si $Q < 0$, la red esta entregando potencia al inversor fotovoltaico quien la inyectará a las baterías del vehículo.

La expresión 2.6 determina el signo correcto de la potencia reactiva Q , reflejando si el flujo de potencia reactiva es hacia o desde la red, de acuerdo con el desfase ϕ_{red} y la magnitud relativa de las tensiones.

En el Listado 2.10 se presenta el cálculo de la potencia reactiva entregada o recibida por el inversor en el ambiente MODELS de ATPDraw.

```

1 MODEL S_Q
2 DATA Vred
3 INPUT Vabrms, Icrms, P2, Vinvrm, fase
4 OUTPUT S, Q
5 VAR S2, S, Q2, Q, sig
6 INIT
7   S2:=1
8 ENDINIT
9 EXEC
10  S:= Vabrms*Icrms    -- Calcula la potencia aparente S = V * I
11  IF ABS(S) < 1 Then
12    S := 1              -- Evita valores muy peque#os que
13    causen inestabilidad
14  endif
15  S2:= S**2           -- Calcula S^2
16  Q2:= S2-P2*P2       -- Obtiene Q^2 usando S^2 = P^2 + Q^2
17  sig:=Vinvrm*cos(fase)-Vabrms  -- Determina direccion del flujo
18  reactivo
19  IF Q2 < 0 Then
20    Q2:=0              -- Corrige errores numericos si Q^2
21    sale negativo
22  endif
23  Q:= (sign(Vinvrm*cos(fase)-Vabrms))*sqrt(Q2)  -- Calcula Q con
24  su signo correcto
25 ENDEXEC
26 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.10: Model Potencia Aparente y Reactiva

2.13.7.15 Controlador PLL

El PLL por sus siglas en ingles *Phase-Locked Loop* como se observa en la Fig. 2.46, es un sistema de control que permite sincronizar la fase y la frecuencia del inversor con las de la red eléctrica. Su función principal es detectar con precisión el ángulo de fase y la frecuencia instantánea del voltaje de la red, garantizando que la energía generada por los paneles fotovoltaicos sea inyectada de manera segura, estable y en concordancia con los parámetros de la red. De esta forma, el PLL asegura que el inversor mantenga una correcta sincronización durante el proceso de acoplamiento, evitando desfasamientos que podrían provocar corrientes no deseadas, pérdidas de potencia o inestabilidad en el sistema.

El modelo del PLL, cuyo algoritmo de programación se visualiza en el Listado

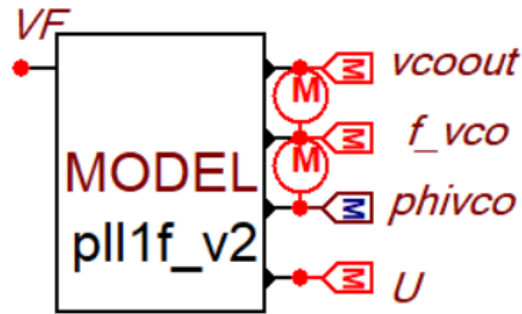


Figura 2.46: MODEL PLL.

2.11, implementa un bucle de enganche de fase digital de una sola fase, utilizado para sincronizar el inversor con la señal de la red eléctrica.

El sistema toma como entrada la señal de voltaje de la red vin y genera una señal de salida $vco - out$ cuya frecuencia y fase se ajustan automáticamente para coincidir con las de la red.

El funcionamiento se basa en los siguientes bloques lógicos:

- Detector de fase: Calcula el error de fase el cual representa la diferencia entre la señal de entrada y la del oscilador controlado por tensión **VCO**.
- Controlador **PI**: A partir del error de fase, el controlador k_p , k_i genera la señal de control u , que ajusta la frecuencia del oscilador para corregir el desfase.
- Oscilador controlado por tensión **VCO**: Actualiza la frecuencia instantánea $f - vco$ y la fase $phi - vco$ del PLL según la señal de control u .
- Señal sincronizada: La salida $vco - out$ corresponde a una referencia senoidal sincronizada con la red, que puede emplearse para la generación de señales de referencia en el control del inversor.

```

1 MODEL PLL1F_v2
2 DATA kp {dflt:20}, ki {dflt:1000}, fr0 {dflt:60}, kvco {dflt:1},
   kpd {dflt:1} -- Parametros del PLL: ganancias PI, frecuencia
   base y constantes de VCO
3 INPUT vin -- Entrada: se#al de voltaje de la red
4 OUTPUT vco_out, f_vco, phi_vco, u -- Salidas: se#al senoidal
   sincronizada, frecuencia, fase y control
5 VAR vco_out, f_vco, phi_vco, e_phi, int_error, u, omega
6 INIT
7 phi_vco:=0 -- Fase inicial del VCO
8 e_phi:=0 -- Error de fase inicial
9 int_error:=0 -- Componente integral inicial
10 u:=0 -- Se#al de control inicial
11 ENDINIT
12 HISTORY
13 phi_vco -- Historial de la fase del VCO
14 int_error
15 integral(e_phi) {dflt:0} -- Inicializacion del integrador del
   error de fase
16 e_phi {dflt:0}
17 integral(omega) {dflt:0} -- Inicializacion del integrador de la
   velocidad angular
18 omega {dflt:0}
19 EXEC
20 e_phi:=vin*cos(phi_vco) -- Detector de fase: calcula el error
   entre la red y el VCO
21 int_error:=integral(e_phi) -- Integra el error de fase
22 u:=kp*e_phi+ki*int_error -- Controlador PI que genera la senal
   de control
23 f_vco:=fr0+u -- Ajusta la frecuencia instantanea del VCO
24 omega:=2*pi*f_vco*kvco -- Convierte la frecuencia a velocidad
   angular
25 phi_vco:=integral(omega) -- Integra para obtener la fase del VCO
26 vco_out:=sin(phi_vco) -- Se#al de salida sincronizada (senoidal)
27 ENDEXEC
28 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.11: Model Potencia Aparente y Reactiva

2.13.7.16 Controlador PI de la Potencia Activa y Potencia Reactiva.

El controlador **PI** se emplea para regular las variables de control del sistema, buscando minimizar el error entre la referencia y la se#al medida. Este tipo de controlador combina una acci#n proporcional, que responde de forma inmediata al error presente, y una acci#n integral, que elimina el error en estado estacionario al con-

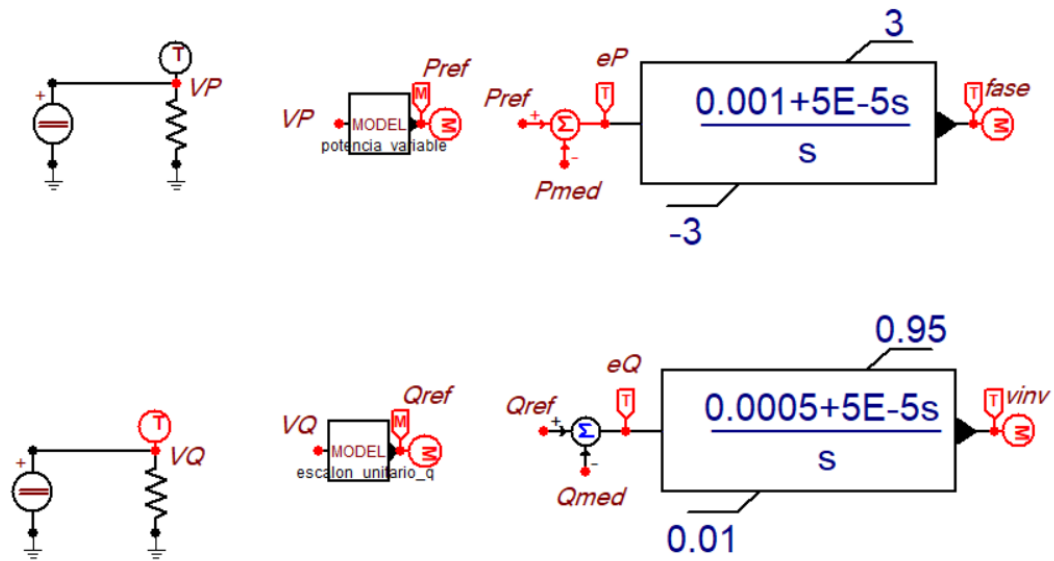


Figura 2.47: Controladores de la Potencia Activa y Reactiva.

siderar la acumulación de errores a lo largo del tiempo.

Para la sintonización de los parámetros k_p y k_i , se utilizó un método empírico de prueba y error, debido a la naturaleza no lineal y acoplada de las dinámicas del sistema. Este procedimiento consistió en ajustar progresivamente los valores de las ganancias hasta obtener una respuesta dinámica estable, con bajo sobrepaso y rápido tiempo de establecimiento.

Durante este proceso se observó el comportamiento de la variable controlada, en este caso las potencias activa y reactiva, evaluando la estabilidad, el error en estado estacionario y la rapidez de respuesta del sistema. De esta forma, se determinó un conjunto de parámetros que garantizan un equilibrio adecuado entre rapidez, precisión y robustez, cumpliendo los objetivos de sincronización e inyección eficiente de potencia hacia la red.

2.13.7.17 Control de la onda de fundamental en amplitud y fase.

Una vez determinados los valores óptimos de k_p y k_i para los controladores asociados tanto a la potencia activa como a la potencia reactiva, se procedió a regular dichas magnitudes mediante los lazos de control correspondientes. Para la potencia activa P se estableció una referencia variable en el tiempo, con el fin de emular una curva característica de demanda propia de una carga real. En cuanto a la potencia reactiva Q , se fijó una referencia cercana a cero, buscando mantener un factor de potencia próximo a la unidad, lo cual garantiza una operación eficiente y con mínimos intercambios de potencia reactiva con la red, como se observa en la Fig. 2.47.

Como se observa en la Fig. 2.47 el controlador de potencia activa proporciona como salida la variable *fase*, la cual se envía a un bloque MODELS encargado de

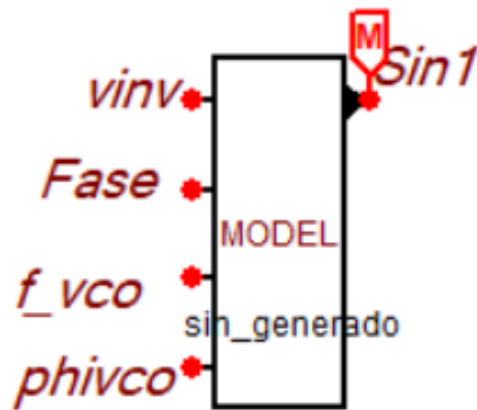


Figura 2.48: Bloque MODELS generador señal sinusoidal.

generar la señal sinusoidal de referencia. Esta señal adopta la fase entregada por el controlador de P , permitiendo ajustar el desfase necesario para regular la potencia activa inyectada. Por su parte, el controlador de potencia reactiva entrega la variable v_{inv} , que también ingresa al mismo bloque generador de la señal sinusoidal y actúa como la amplitud de dicha señal, permitiendo ajustar el nivel de tensión requerido para mantener la potencia reactiva cercana al valor de referencia.

El bloque MODELS encargado de generar la onda sinusoidal, el cual se observa en la Fig. 2.48 recibe la fase $phivco$ y la frecuencia f_{vco} , provenientes del sistema PLL, garantizando que la señal generada permanezca sincronizada con la red eléctrica, el algoritmo de programación de dicho bloque se puede observar en el listado 2.12. La señal sinusoidal resultante se envía posteriormente al modelo encargado de generar la onda triangular, con la cual se realiza la comparación para producir la modulación SPWM. Finalmente, esta señal controla la etapa de operación del inversor, haciendo posible que el sistema entregue los valores de potencia activa y reactiva establecidos como referencia, y asegurando un funcionamiento estable y conforme a los objetivos de regulación del sistema.

```

1 MODEL Sin_generado
2 --DATA FREC    -- (No se utiliza en este modelo)
3 INPUT Ampli, Phase, FPLL, phivco
4 -- Ampli: amplitud de la se#al sinusoidal.
5 -- Phase: angulo de fase entregado por el controlador de P.
6 -- FPLL: frecuencia obtenida del PLL.
7 -- phivco: fase proveniente del PLL (no se usa directamente en la
   ecuacion final).
8 OUTPUT Sin1
9 -- Sin1: se#al sinusoidal generada.
10 VAR Sin1, A, f, Theta
11 -- A: variable interna para almacenar la amplitud.
12 -- f: variable interna para almacenar la frecuencia.
13 -- Theta: variable interna para almacenar la fase.
14 INIT
15   Sin1:= 0      -- Inicializa la salida en cero.
16 ENDINIT
17 EXEC
18   A := Ampli    -- Asigna la amplitud de entrada a la variable
   interna A.
19   f := FPLL     -- Toma la frecuencia proveniente del PLL.
20   Theta := Phase -- Toma el valor de fase generado por el
   controlador.
21   -- Genera la se#al sinusoidal:
22   -- donde:
23   --   A define la amplitud,
24   --   f define la frecuencia de la onda,
25   --   Theta aplica el desfase correspondiente.
26   Sin1 := A*sin(2*PI*f*t - Theta)
27 ENDEXEC
28 ENDMODEL

```

Algoritmo 2.12: Model Generador señal sinusoidal

2.14 Análisis técnico-económico del proyecto.

El presente proyecto propone el diseño de cargadores para vehículos eléctricos alimentados por sistemas fotovoltaicos, integrados de forma segura y normativa a la red eléctrica de potencia. La solución planteada combina un arreglo FV diseñado para maximizar la generación local con una cadena de conversión y control capaz de priorizar el suministro solar, complementar con energía de red cuando sea necesario e inyectar excedentes a la red bajo condiciones controladas. El núcleo energético lo constituye el generador FV, cuyo dimensionamiento considera curva $I - V$ y $P - V$ del módulo, condiciones locales de irradiancia y temperatura, y la necesidad de op-

erarse continuamente en el punto de máxima potencia mediante un algoritmo MPPT implementado en la etapa CC/CC.

La energía generada por los paneles FV pasa primero por un proceso de conversión y control que permite obtener un bus de CC estable. Este bus CC funciona como un punto intermedio común que integra de forma coordinada a todos los subsistemas del proyecto. Por un lado, recibe la energía del campo fotovoltaico, por otro lado alimenta al inversor que inyecta energía a la red eléctrica y adicionalmente suministra potencia al cargador del VE. En otras palabras, el bus CC permite que tanto el inversor como el cargador se abastezcan desde una misma fuente regulada, asegurando continuidad, estabilidad de tensión y una gestión más eficiente del flujo energético. Se incorporan lazos de control PI en lazo de potencia activa para regular el desfase y otro lazo para potencia reactiva que ajuste la magnitud del voltaje y una etapa de sincronización con el PLL para garantizar que la inyección o absorción de energía cumpla los requisitos de estabilidad y las normas de interconexión.

El cargador para vehículos puede implementarse como estación de carga CA para cargas residenciales. En todos los casos se prioriza la seguridad eléctrica con estándares como IEC 61851, la cual nos da el algoritmo de gestión de la demanda conforme para la carga de vehículos eléctricos [163], y la normativa de interconexión aplicable como la normativa IEEE std 1547-2018, la cual da a conocer los parámetros para la interconexión e interoperabilidad de recursos energéticos distribuidos con sistemas de energía eléctrica asociados. [162], De igual manera, se consideró el cumplimiento de la norma IEEE std 1262-1995, en la cual establece los procedimientos y especificaciones recomendadas para pruebas de calificación que están estructuradas para evaluar módulos fotovoltaicos destinados a aplicaciones de generación de energía [164]. Por último, se consideró la norma IEEE std 2030.1.1-2021, la cual establece las especificaciones técnicas para cargadores rápidos de corriente continua, incluyendo su operación bidireccional para aplicaciones en vehículos eléctricos [165]. Además, el diseño incluye filtrado para reducción de THD y dimensionamiento del puente DC para limitar el rizado de tensión y garantizar la estabilidad ante variaciones de irradiancia.

La integración energética considera modos de operación que van desde la carga exclusivamente con energía solar, pasando por operación híbrida con apoyo de la red, hasta la inyección controlada de excedentes. La lógica de control gestiona prioridades según la demanda del vehículo, el estado de carga del FV y las restricciones de la red, minimizando costos operativos y emisiones. Finalmente, el proyecto incorpora análisis de eficiencia y respuesta dinámica mediante simulaciones realizadas en ATPDraw, así como cumplimiento de normativa técnica y criterios de seguridad, con el objetivo de entregar una solución robusta, escalable y económicamente viable.

2.14.1 Estimación de costos para el proyecto.

El análisis se centra exclusivamente en un escenario de carga residencial, donde el usuario dispone de un punto de carga con una potencia típica cercana a 8 kW , destinado al suministro energético de un **VE**. Se plantea un sistema **FV** doméstico capaz de cubrir una fracción significativa de la energía requerida para la carga diaria del **VE**, reduciendo la dependencia de la red eléctrica y optimizando el costo operativo del usuario.

Para ello, se considera un sistema **FV** de 6 kW , suficiente para aportar entre un 40% y 60% del consumo anual del vehículo en zonas de irradiancia moderada del Ecuador. El sistema incluye:

1. Generador fotovoltaico
2. Inversor híbrido
3. Protecciones **CA/CC**
4. Cableado y canalizaciones
5. Punto de carga
6. Mano de obra e ingeniería.

Los costos se evaluarán dependiendo de la calidad de los equipos y del proveedor, por lo que se considerará tres escenarios: económico, estándar y Profesional. Como se muestra en la tabla 2.13.

La estimación de costos presentada en la tabla 2.13, se construyó considerando referencias de mercado obtenidas de proveedores locales, catálogos comerciales y rangos típicos reportados para instalaciones fotovoltaicas residenciales y comerciales con capacidad similar. Para cada componente se establecieron tres categorías de costo como son: económica, estándar y profesional con el fin de reflejar las variaciones reales asociadas a la calidad de los equipos, la eficiencia, las certificaciones y el nivel de servicio técnico ofrecido.

1. Paneles fotovoltaicos con una potencia de 6 kW : El rango económico corresponde a módulos policristalinos o monocristalinos de gama básica, usualmente con eficiencias moderadas y garantías más limitadas. La categoría estándar considera módulos de mejor rendimiento y con certificaciones más amplias, mientras que la categoría profesional incluye paneles de alta eficiencia, larga vida útil y respaldo técnico especializado, cuyo costo por watt suele ser superior.

2. Inversor bidireccional de 5 a 7 kW : Los valores económicos se asocian a equipos de marcas emergentes con funcionalidad esencial de conversión e interacción con la red. La categoría estándar incorpora inversores bidireccionales más confiables y con mejores protecciones. La categoría profesional agrupa inversores con mayor capacidad de gestión energética, certificaciones internacionales y soporte técnico avanzado.
3. Cargador de 8 kW : Los costos varían en función de la marca, el tipo de protocolo de carga y las funcionalidades adicionales como: comunicación, protecciones internas, control dinámico de potencia, entre otros. La gama económica corresponde a cargadores residenciales básicos; la estándar incorpora mayor robustez y características inteligentes; y la profesional considera cargadores certificados para uso continuo, con integración avanzada a sistemas fotovoltaicos y gestión de carga.
4. Protecciones AC/DC: La categoría económica incluye dispositivos básicos de protección contra sobrecorrientes y sobretensiones. La estándar considera protecciones de mejor calidad y mayor capacidad de interrupción, mientras que la gama profesional agrupa equipos certificados para aplicaciones fotovoltaicas críticas y con mayor durabilidad.
5. Estructura y montaje: Los rangos económicos reflejan estructuras de aluminio estándar y montaje básico. La categoría estándar considera sistemas de anclaje con mayor resistencia mecánica y procedimientos de instalación más eficientes. La categoría profesional incorpora estructuras certificadas, protección anticorrosiva avanzada y mano de obra especializada.
6. Cableado y canalizaciones: Los costos varían según el tipo de conductor, su sección, el material de aislamiento y la calidad de las canalizaciones. El rango económico contempla materiales convencionales; la gama estándar utiliza conductores solares certificados y tuberías de mejor calidad; mientras que la gama profesional emplea soluciones con mayor resistencia UV, térmica y mecánica.
7. Personal: La categoría económica corresponde a instalaciones realizadas por técnicos con experiencia básica. La categoría estándar considera personal con certificación o mayor trayectoria en sistemas fotovoltaicos. La categoría profesional incluye mano de obra altamente calificada, con costos asociados a ingeniería, pruebas, puesta en marcha y documentación técnica.

En conjunto, estos valores permiten establecer un rango realista de inversión para distintos niveles de calidad y sofisticación del sistema, considerando la variabil-

idad que existe actualmente en el mercado tanto en componentes como en servicios asociados.

Tabla 2.13: Costos estimados del sistema fotovoltaico residencial.

Componente	Eco. USD	Est. USD	Prof. USD
Paneles FV 6 kW	3000–4200	4800–6000	7000–9000
Inversor bi. 5 – 7 kW	1300–1800	2000–2600	3000–3500
Cargador 8 kW	500–700	800–1100	1200–1500
Protecciones AC/DC	200–350	350–600	600–900
Estructura y montaje	400–700	700–1000	1200–1500
Cableado y canalizaciones	200–300	300–600	700–1000
Personal	500–1000	1000–1700	1800–2500
Costo total estimado	6100 – 9050	10000 – 13600	15500 – 19900

Por lo que se considera un rango de precio para el proyecto de 6000 USD a 20000 USD.

2.14.1.1 Costos de mantenimiento anual.

Además del costo inicial de instalación del sistema fotovoltaico y del cargador para el VE, es necesario considerar los costos de mantenimiento anual, debido a que estos influyen directamente en la sostenibilidad económica del proyecto a largo plazo. En un sistema residencial típico, los gastos de mantenimiento incluyen: limpieza y mantenimiento de paneles solares, revisión del inversor y protecciones eléctricas, Inspección estructural y cableado, servicio técnico y mano de obra, como se muestra en la tabla 2.14, es importante mencionar que se debe cambiar el inversor cada 10 o 12 años y tiene un costo aproximado de 1200 USD a 2500 USD.

Tabla 2.14: Costos estimados de mantenimiento anual del sistema fotovoltaico.

Concepto	Costo anual USD
Limpieza y mantenimiento de paneles solares	40 – 120
Revisión del inversor y protecciones eléctricas	30 – 80
Inspección estructural y cableado	20 – 60
Servicio técnico y mano de obra	50 – 150
Costo total estimado	140 – 410

2.14.1.2 Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno y Periodo de recuperación de la Inversión.

Con los valores estimados del costo de inversión y del mantenimiento, se procede a realizar una evaluación económica mediante indicadores ampliamente utilizados en proyectos energéticos: Valor Actual Neto **VAN**, Tasa Interna de Retorno **TIR** y Periodo de Recuperación de la Inversión o *Payback*. Estos indicadores permiten determinar si el sistema de carga fotovoltaico es realmente viable bajo un escenario residencial típico y si la inversión tiene sentido desde el punto de vista financiero.

El **VAN** se utiliza para cuantificar cuánto valor económico genera el proyecto considerando los flujos de ahorro energético a lo largo de toda su vida útil. En términos simples, el **VAN**, como se muestra en la ecuación 2.8, permite determinar si el dinero recuperado con el tiempo compensa la inversión inicial. La fórmula general empleada es:

$$VAN = \sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0, \quad (2.8)$$

donde:

F_t es el flujo de ahorro por energía generada en el año t .

r es la tasa de descuento utilizada en el análisis.

N es la vida útil considerada del sistema en años.

I_0 representa la inversión inicial.

i representa el número de periodo o año considerado en el análisis financiero.

Una vez obtenidos todos los valores del **VAN**, se comparan con la inversión inicial, si el **VAN** resultó positivo, el sistema fotovoltaico genera un beneficio económico neto durante su vida útil, por otro lado si es negativo, la inversión no se recupera adecuadamente.

La Tasa Interna de Retorno **TIR** representa el rendimiento que iguala los costos del proyecto con los beneficios futuros. Dicho de forma práctica, la **TIR** indica qué tan rentable es instalar el sistema fotovoltaico. Valores más altos indican un mayor atractivo económico. Su definición matemática se expresa como la tasa i que satisface:

$$0 = \sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - I_0, \quad (2.9)$$

en la ecuación 2.9, se resuelve de forma iterativa o mediante software especializado, debido a que no tiene una solución cerrada. Para el caso analizado, la **TIR**

permite comparar el rendimiento del sistema fotovoltaico con otras alternativas de inversión; si la **TIR** supera la tasa mínima de retorno aceptable, entonces el proyecto es financieramente viable.

El *Payback* representa el tiempo estimado necesario para recuperar la inversión inicial únicamente mediante los ahorros generados por el sistema. Aunque no considera el valor del dinero en el tiempo, es útil para propietarios que desean conocer cuántos años deben transcurrir antes de que el sistema empiece a generar beneficios netos. La expresión básica utilizada es:

$$Payback = \frac{I_0}{A_{neto}}, \quad (2.10)$$

donde A_{neto} corresponde al ahorro anual promedio generado por el sistema fotovoltaico. Para este caso, el Payback se determinó dividiendo la inversión inicial entre el ahorro promedio anual, como se muestra en la expresión 2.10, permitiendo identificar el año en el que el sistema compensa completamente su costo y comienza a generar beneficios económicos directos.

Con el propósito de comparar de manera uniforme los escenarios Económico, Estándar y Profesional, se establecen los mismos supuestos operativos y tarifarios en todos los casos. Esto permite observar exclusivamente el efecto del nivel de inversión sobre la rentabilidad del sistema fotovoltaico destinado a la carga parcial de un vehículo eléctrico.

Condiciones de evaluación consideradas en el análisis financiero:

Con el fin de establecer un marco coherente para la evaluación financiera de los tres escenarios de inversión, Económico, Estándar y Profesional, se definieron un conjunto de condiciones base que representan el funcionamiento típico de un sistema fotovoltaico acoplado a un cargador residencial de vehículo eléctrico en Ecuador. Estos supuestos permiten estimar de manera consistente los flujos energéticos y económicos asociados, garantizando comparabilidad entre alternativas y coherencia con las condiciones tarifarias vigentes.

Los valores adoptados consideran el patrón de uso del vehículo eléctrico, la capacidad de generación anual del sistema **FV** y los costos operativos asociados, todo ello acorde con la tarifa establecida en el pliego tarifario ecuatoriano.

A continuación, se detallan los supuestos técnicos y económicos utilizados en el análisis:

1. Distancia anual recorrida por el vehículo eléctrico: 22000 *km/año*
2. Consumo promedio del vehículo eléctrico: 0,20 *kWh/km*

3. Demanda anual de energía para movilidad eléctrica:

$$(22000 \text{ km/año}) (0,20 \text{ kWh/km}) = 4400 \text{ kWh/año} \quad (2.11)$$

4. Tarifa residencial vigente según pliego tarifario Ecuador del 2025: 0,099 USD/kWh

5. Costo anual de cargar el vehículo usando únicamente la red eléctrica:

$$(4400 \text{ kWh}) (0,099 \text{ USD/kWh}) = 435,6 \text{ USD/año} \quad (2.12)$$

6. Producción anual del sistema **FV** 6 kW: 8400 kWh/año Valor representativo considerando irradiancia del rango entre 4,2 a 4,5 kWh/m al día.

7. Porcentaje de la demanda del **VE** cubierto por el sistema **FV**: 70 %

8. Ahorro bruto anual generado por el sistema **FV**:

$$(4400 \text{ kWh}) (0,099 \text{ USD/kWh}) \cdot 70\% \approx 204,9 \text{ USD/año} \quad (2.13)$$

9. Costo anual de mantenimiento del sistema **FV**: 100 USD/año

10. Ahorro neto anual:

$$A_{neto} = 304,9 - 100 \approx 204,9 \text{ USD/año} \quad (2.14)$$

Valores financieros a analizar:

1. Horizonte de evaluación: 25 años

2. Tasa de descuento r : 10 %

3. Factor de anualidad descontada para 25 años:

$$\frac{1 - (1 + r)^{-N}}{r} \approx 9,077 \quad (2.15)$$

4. Inversión inicial en cada escenario:

- Escenario Económico: 7 575 USD
- Escenario Estándar: 11 800 USD
- Escenario Profesional: 17 700 USD

Tiempos de recuperación para cada escenario:

1. Escenario Económico;

- Inversión: 7 575 USD
- Ahorro neto anual: ≈ 205 USD
- Payback aproximado:

$$\frac{7575}{205} \approx 37 \text{ años} \quad (2.16)$$

2. Escenario Estándar:

- Inversión: 11 800 USD
- Ahorro neto anual: ≈ 205 USD
- Payback aproximado:

$$\frac{11800}{205} \approx 58 \text{ años} \quad (2.17)$$

3. Escenario Profesional:

- Inversión: 17 700 USD
- Ahorro neto anual: ≈ 205 USD
- Payback aproximado:

$$\frac{17700}{205} \approx 86 \text{ años} \quad (2.18)$$

Con la tarifa eléctrica residencial vigente en Ecuador, los ahorros obtenidos por sustituir parcialmente la energía de red mediante un sistema fotovoltaico resultan relativamente limitados. Bajo estas condiciones, ninguno de los sistemas residenciales analizados logra recuperar su inversión en un horizonte de 15 años si únicamente se considera la energía destinada a la carga del vehículo eléctrico.

Por este motivo, se incorpora un beneficio adicional en el análisis: el sistema fotovoltaico no solo atenderá la demanda del cargador del vehículo, sino también una fracción del consumo eléctrico de la vivienda. Esta ampliación del alcance permite incrementar los ahorros anuales y, en consecuencia, mejorar los indicadores económicos del proyecto. Por lo que se supone que el sistema FV cubre aprox. 30 % de la demanda doméstica, generando ahorros adicionales de 350 USD/año aproximadamente, por lo que el ahorro neto sería de:

$$A_{neto} = 205 + 350 = 555 \text{ USD/año} \quad (2.19)$$

Por lo tanto, considerando la inversión inicial previamente establecida y el nuevo valor de ahorro neto anual, se determinó el tiempo de retorno de la inversión para cada uno de los escenarios analizados:

1. Escenario económico:

$$\frac{7575}{555} \approx 13,6 \text{ años} \quad (2.20)$$

2. Escenario estándar:

$$\frac{11800}{555} \approx 21,3 \text{ años} \quad (2.21)$$

3. Escenario profesional:

$$\frac{17700}{555} \approx 31,9 \text{ años} \quad (2.22)$$

El tiempo extendido necesario para recuperar la inversión se justifica por una combinación de factores técnicos, económicos y regulatorios propios del contexto ecuatoriano. En primer lugar, la tarifa residencial de energía eléctrica en Ecuador es relativamente baja 0,099 USD/kWh, lo que limita significativamente el nivel de ahorro que un sistema fotovoltaico puede generar frente al costo de abastecer directamente la demanda desde la red. En términos prácticos, cuanto menor es el costo de la energía convencional, menor es el incentivo económico para sustituirla por generación propia, aun cuando esta sea más sostenible.

A ello se suma que la demanda energética asociada a la carga del vehículo eléctrico en un entorno residencial es moderada, especialmente si se considera que el sistema fotovoltaico solo cubre una fracción del consumo total. Esto implica que el volumen anual de energía compensada y por tanto los ahorros efectivos crece de forma lineal y relativamente lenta a lo largo del tiempo.

Por otro lado, la inversión inicial correspondiente a módulos fotovoltaicos, inversor, protecciones, estructura de montaje y mano de obra concentra un costo elevado en el año cero, cuya recuperación no es inmediata. Mientras el gasto en electricidad de la red evoluciona linealmente con el consumo anual, la curva de recuperación de la inversión tiene un comportamiento más lento, dado que los ahorros acumulados se incrementan gradualmente año tras año.

Finalmente, el análisis se ve influenciado por la naturaleza del sistema monofásico propuesto. En este tipo de instalaciones, la potencia activa y la potencia reactiva presentan variaciones más significativas en comparación con sistemas trifásicos, lo que puede introducir ineficiencias adicionales en la operación del inversor y en la inyección de energía. Estas fluctuaciones reducen ligeramente el rendimiento energético anual efectivo, contribuyendo también al incremento del tiempo de amortización.

En conjunto, estos factores explican por qué, aun con un adecuado desempeño técnico del sistema, el periodo de recuperación económica resulta prolongado, sobrepasando en algunos casos la vida útil del propio sistema fotovoltaico. Sin embargo, desde una perspectiva ambiental, de calidad de suministro y de reducción de la dependencia energética, la implementación del sistema sigue siendo justificable.

La Fig. 2.49 muestra la comparación entre el costo inicial del sistema fotovoltaico residencial y los ahorros acumulados a lo largo de 15 años. En la gráfica se observa que:

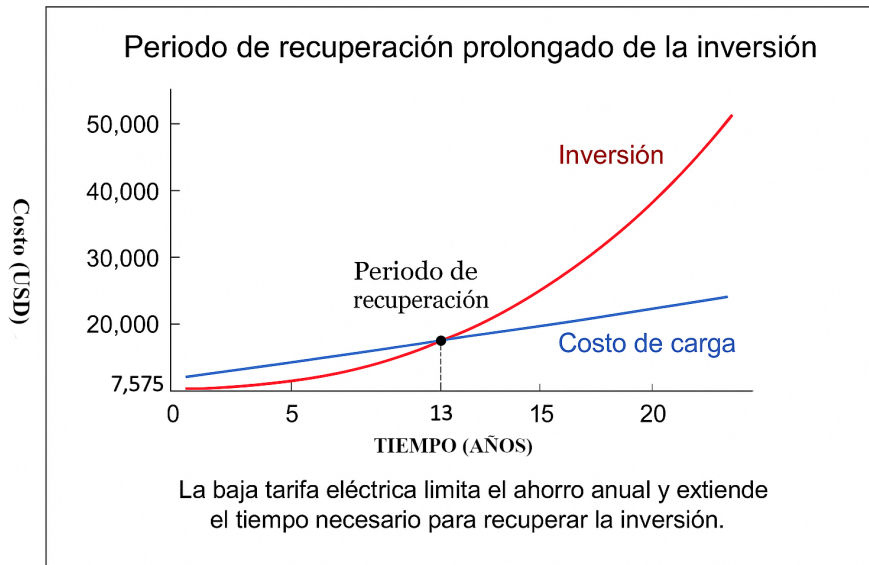


Figura 2.49: Periodo de recuperación prolongado de inversión.

1. La línea roja representa la inversión inicial, que es un valor alto desde el inicio.
2. La línea azul muestra los ahorros energéticos acumulados año tras año gracias al sistema [FV](#).

Este comportamiento refleja que, bajo las condiciones del caso ecuatoriano tarifas eléctricas relativamente bajas, el sistema recupera solo una parte de la inversión, ofreciendo beneficios más alineados con:

- Reducción del impacto ambiental, al disminuir el consumo de energía proveniente de la red.
- Mejora en la calidad de suministro, ya que parte de la demanda se abastece localmente.
- Independencia parcial energética, sobre todo en horas de alta irradiancia.

Es decir, la imagen demuestra por qué el periodo de retorno es largo: la generación [FV](#) es limitada, los ahorros por *kWh* son modestos y el costo inicial domina sobre el beneficio económico directo.

CAPÍTULO 3

Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas en el programa ATPDraw. Dichas simulaciones permiten evaluar el desempeño del sistema **FV**, del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia **MPPT**, del control **PI** propuesto para la potencia activa P y la potencia reactiva Q . Los resultados se organizan de forma estructurada, mostrando tanto las curvas características como las variables eléctricas relevantes para el análisis del comportamiento del sistema integrado a la red.

3.1 Resultados de la modelación del sistema fotovoltaico en ATPDraw.

3.1.1 Curvas $I - V$ y $P - V$ del arreglo **FV**.

En la Fig. 3.1 se muestra la curva $P - V$ del panel solar, mientras que en la 3.2 se muestra la curva $I - V$ del panel **FV**.

3.1.2 Variación de potencia generada con irradiancia y temperatura.

Se configuro los valores de la temperatura y se obtuvo una curva como se muestra en la Fig. 3.3, de igual manera se realizo la curva del comportamiento de la irradiación como se observa en la Fig. 3.4, y se obtuvo los resultados de la potencia generada por el panel que se evidencia en la Fig. 3.5.

3.1.3 Potencia entregada al inversor.

En la Fig. 3.6, se observa la Potencia que entrega el panel solar al inversor.

3.1.4 Parámetros para el correcto funcionamiento del inversor.

3.1.4.1 Generación de la onda sinusoidal.

En la Fig. 3.7, se observa la onda sinusoidal generada, la misma que ingresa al bloque MODELS tri.

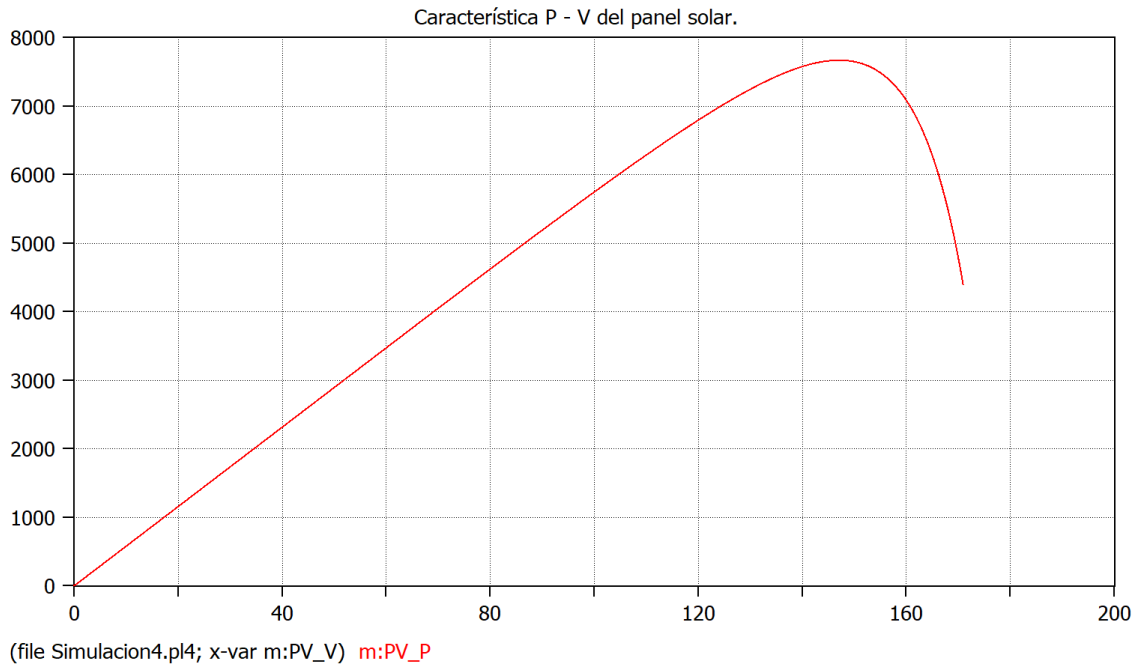


Figura 3.1: Característica $P - V$ del panel FV.

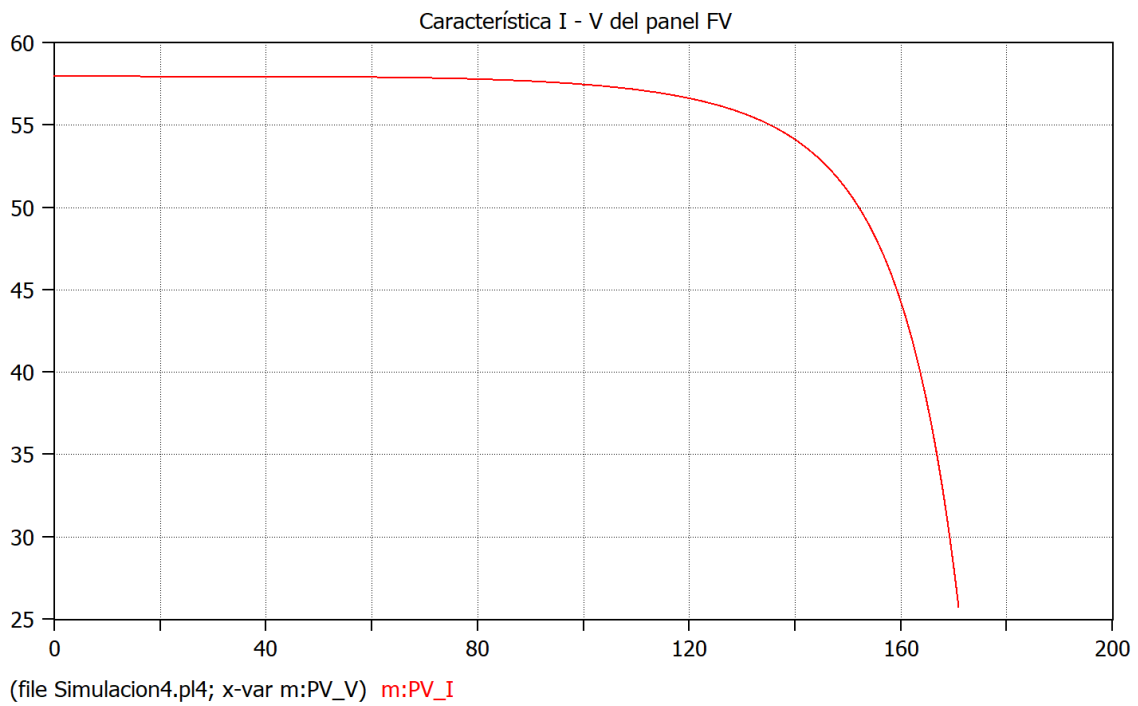


Figura 3.2: Característica $I - V$ del panel FV.

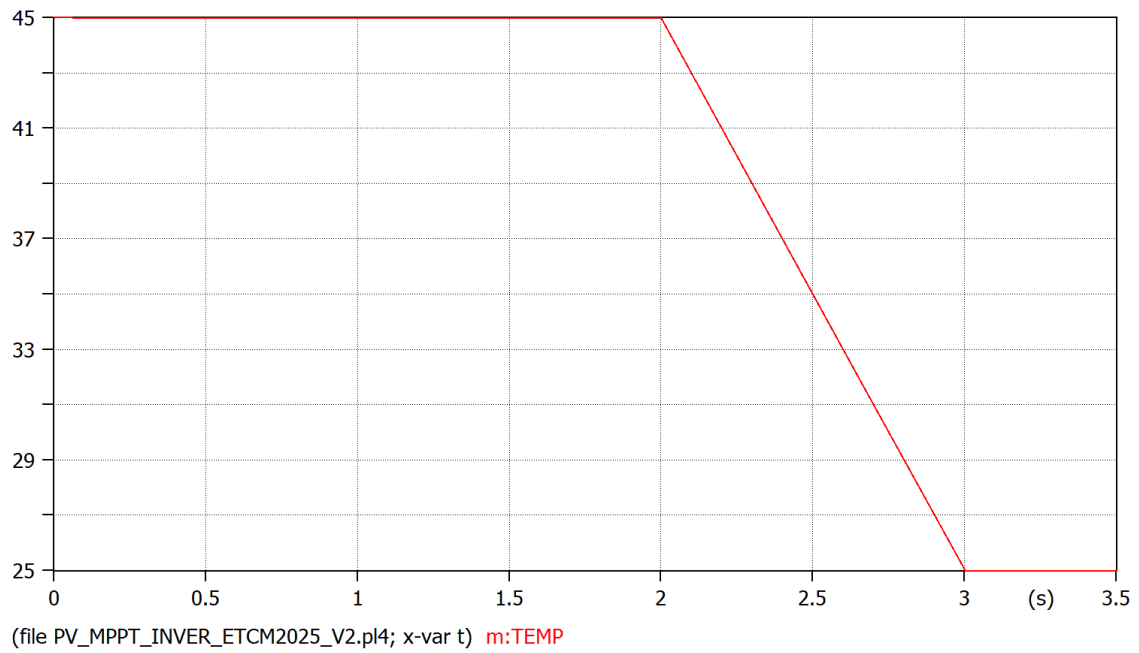


Figura 3.3: Temperatura modelada para el panel FV.

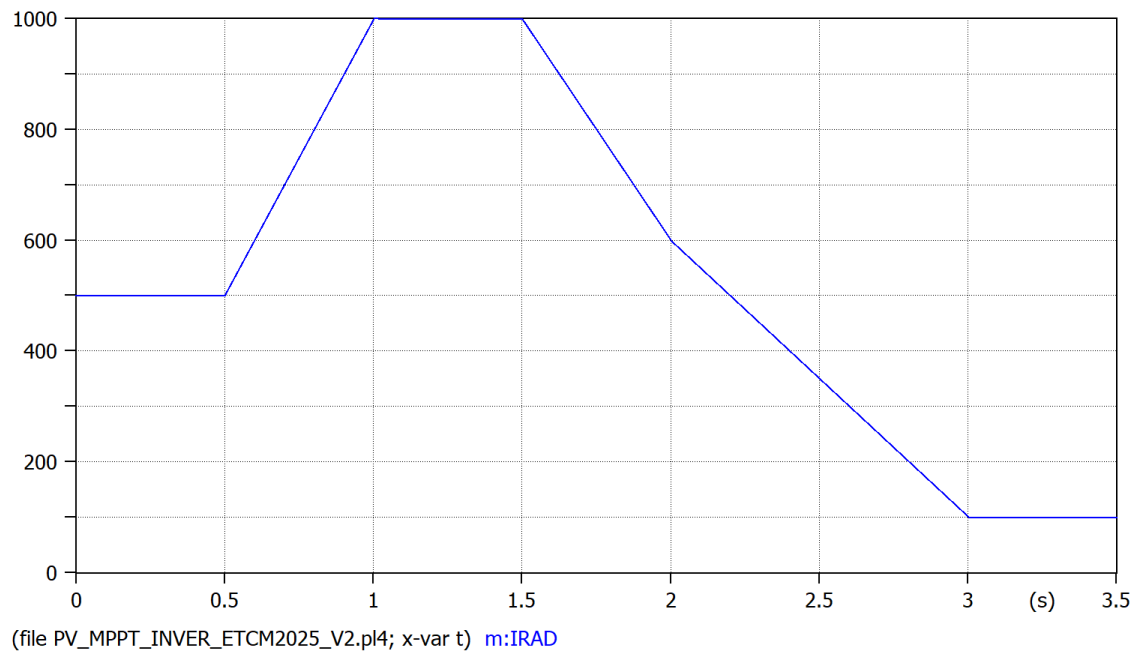


Figura 3.4: Irradiancia modelada para el panel FV.

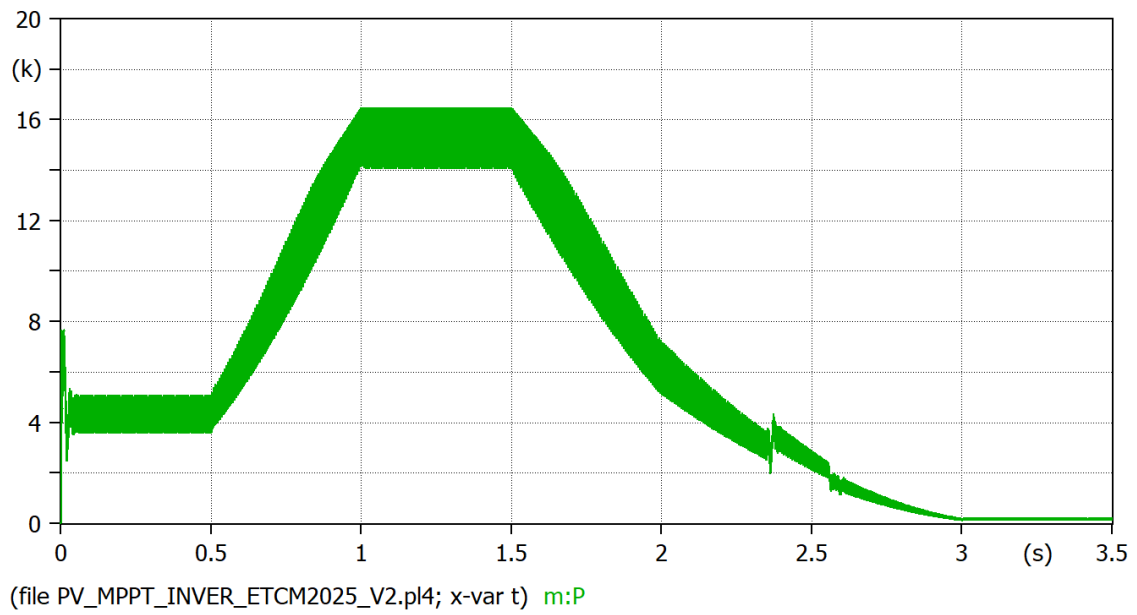


Figura 3.5: Potencia obtenida por el panel FV.

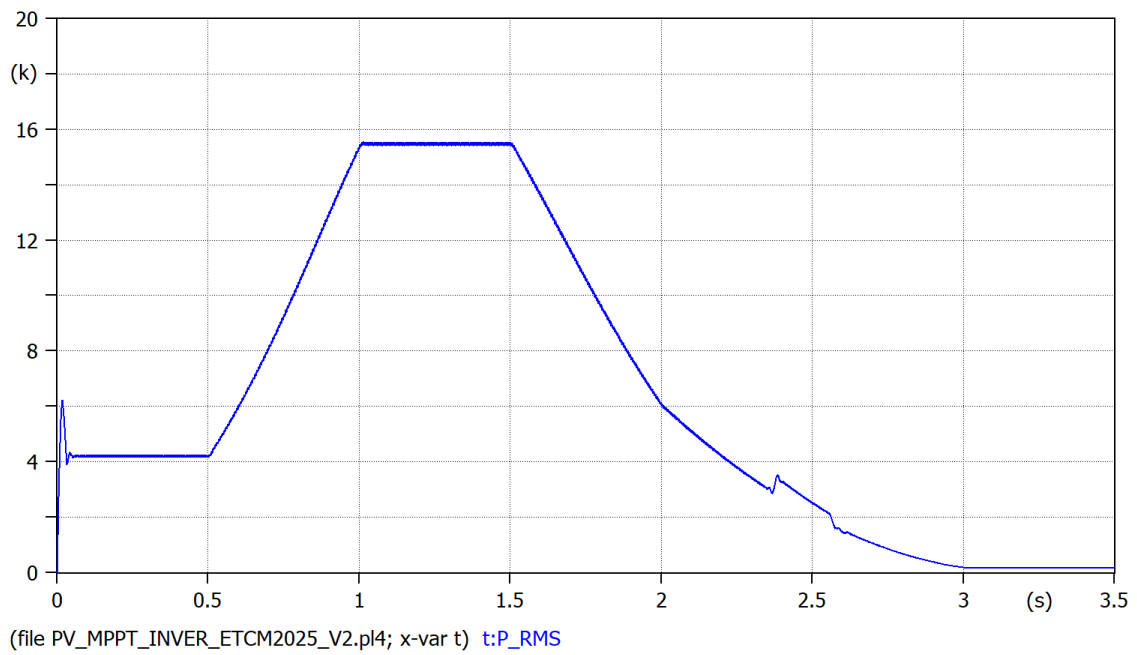


Figura 3.6: Potencia entregada por el panel FV al inversor.

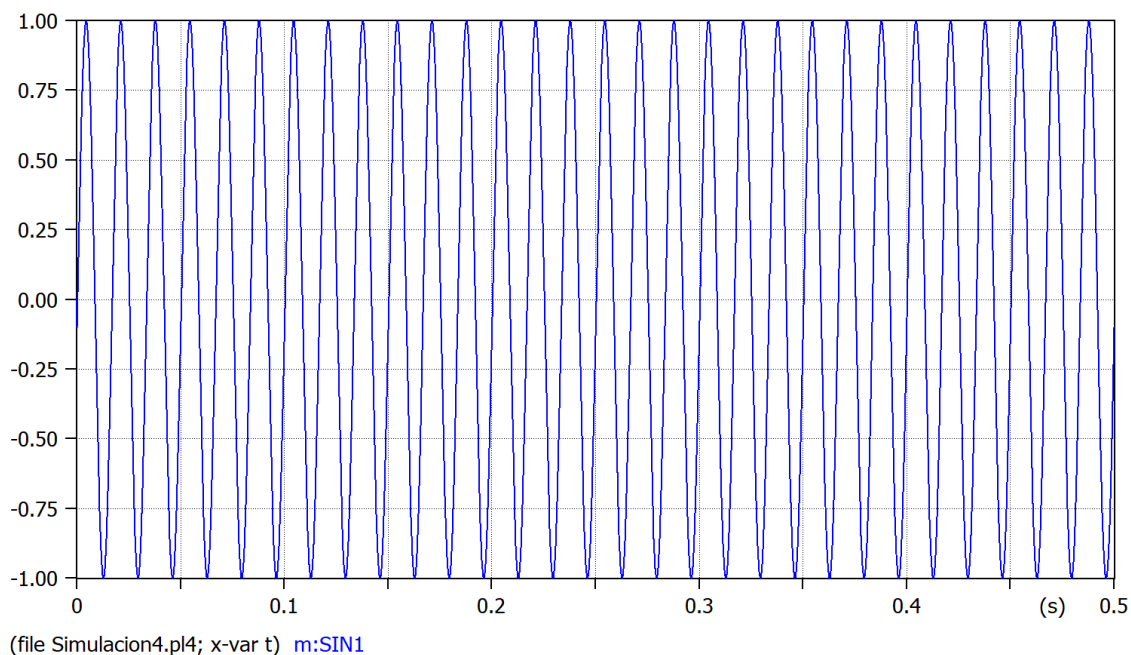


Figura 3.7: Onda sinusoidal de referencia a 60 Hz

3.1.4.2 Generación de la onda triangular.

En la Fig. 3.8, se muestra la onda triangular generada que ingresa al bloque MODELS PWM.

3.1.4.3 Generación de la señal del SPWM.

En la Fig. 3.9, se evidencia la onda obtenida mediante el bloque PWM, la cual activa los transistores. En la Fig. 3.10, se muestra los armónicos mediante la transformada de Fourier de la señal del SPWM.

3.1.4.4 Voltaje en el inversor

En la Fig. 3.11, se muestra el voltaje que se obtiene en el inversor.

En la Fig. 3.12, se observa el voltaje del inversor con respecto al SPWM.

3.1.5 PLL

Los parámetros monitoreados por el PLL corresponden a la frecuencia, presentada en la Fig 3.13, y a la fase, mostrada en la Fig 3.14.

3.1.6 Voltaje del inversor con respecto al voltaje de la red

En la Fig. 3.15, se observa el voltaje del inversor con respecto al voltaje de la red.

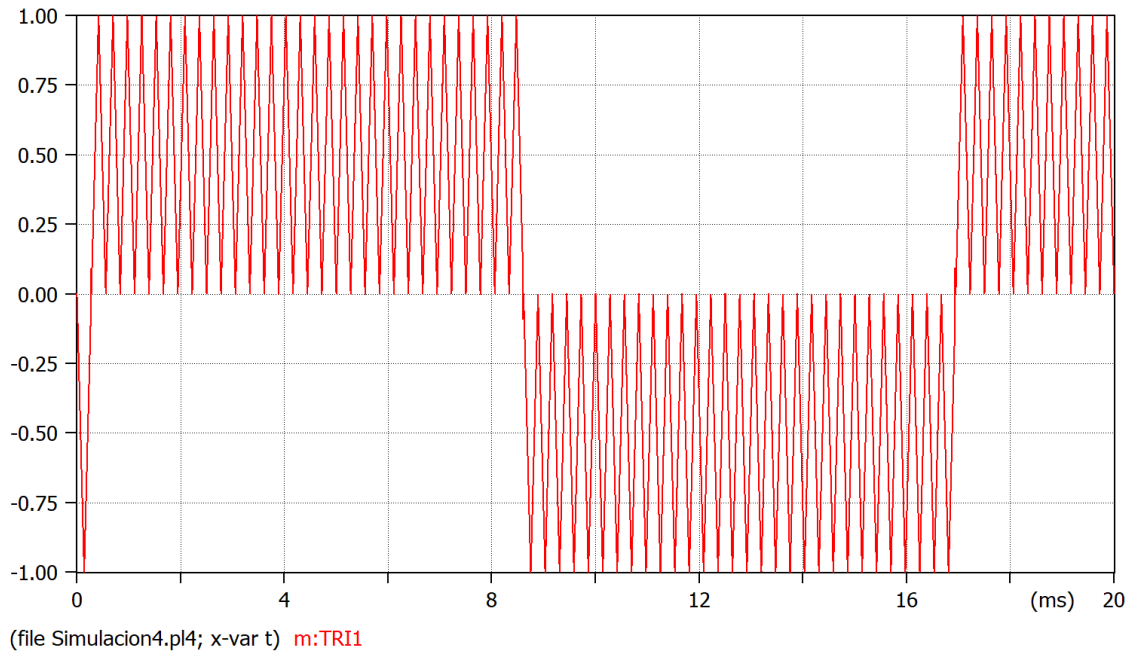


Figura 3.8: Onda triangular generada.

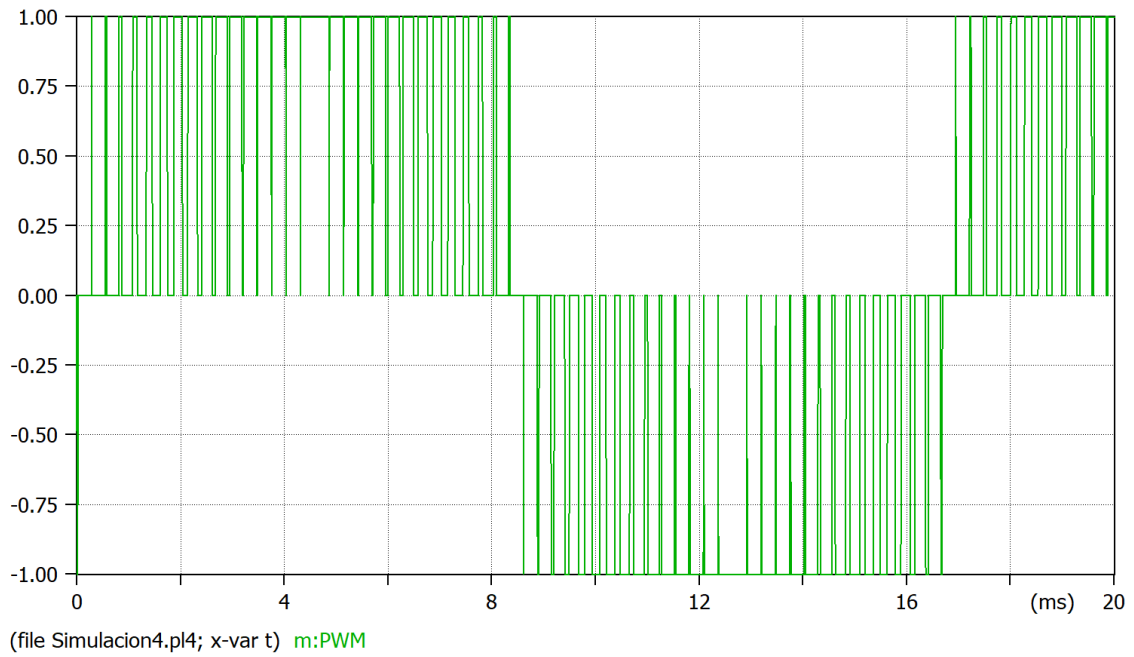


Figura 3.9: Generación de la señal SPWM.

File: Simulacion4.pl4; Variable: m:PWM
t1: 1; t2: 1.1 - Amplitude: peak value

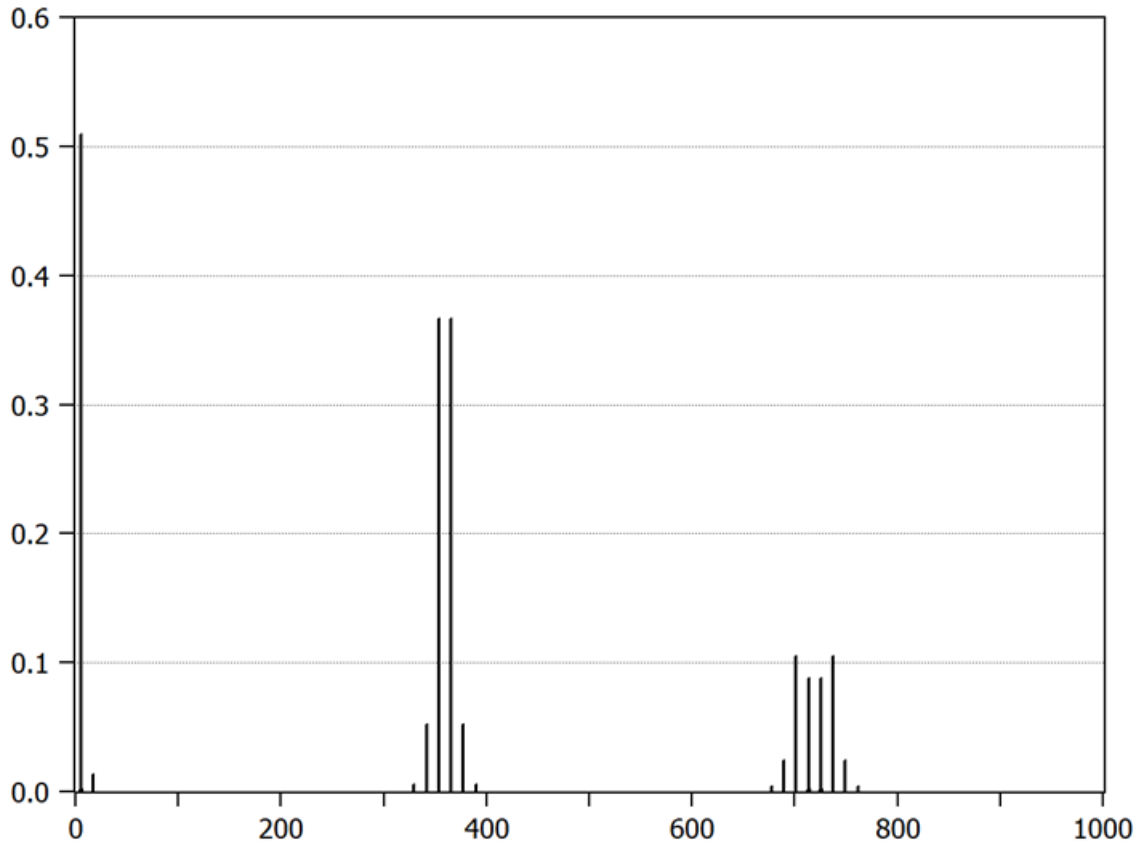


Figura 3.10: Transformada de Fourier de la señal SPWM.

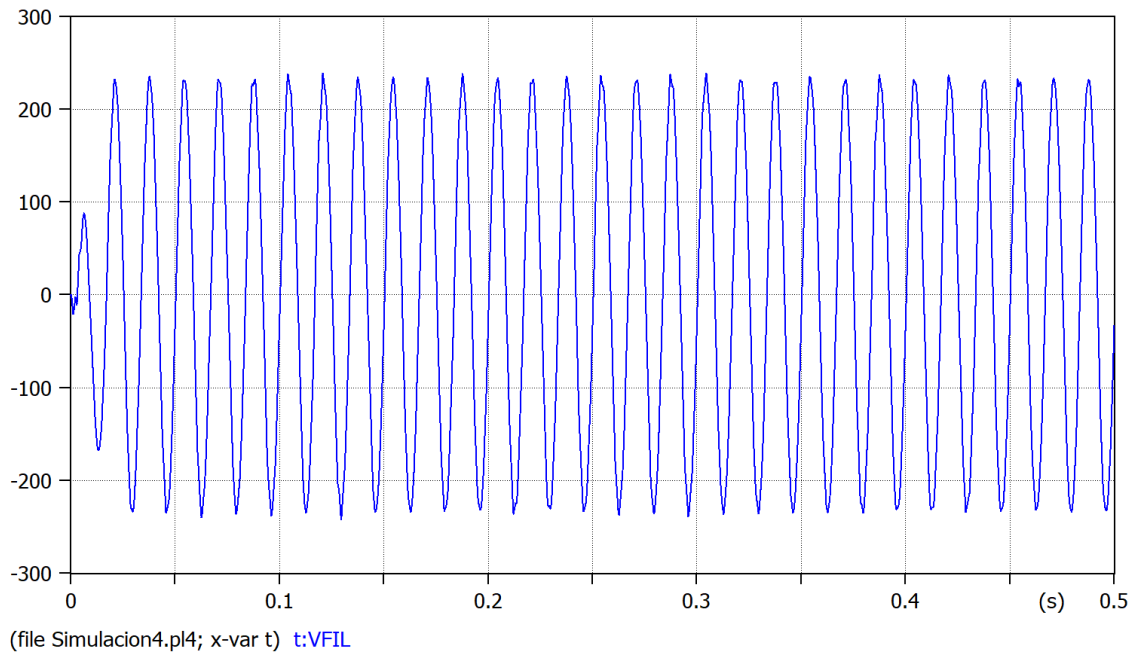


Figura 3.11: Voltaje en el inversor después del filtro pasa bajo.

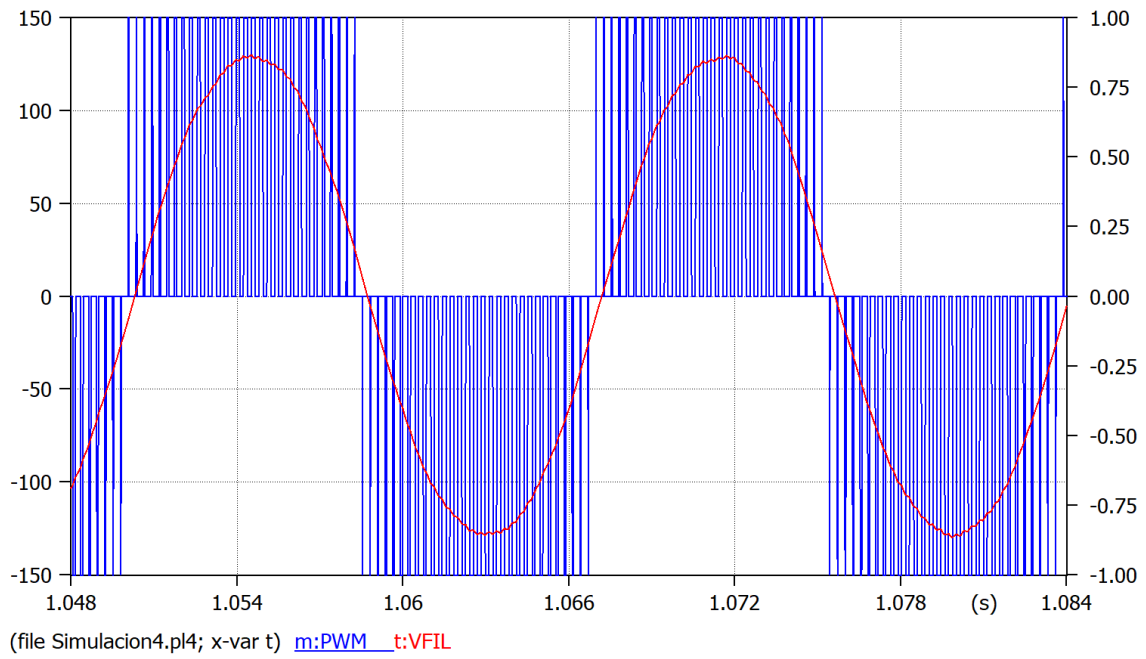


Figura 3.12: Voltaje en el inversor con respecto al SPWM.

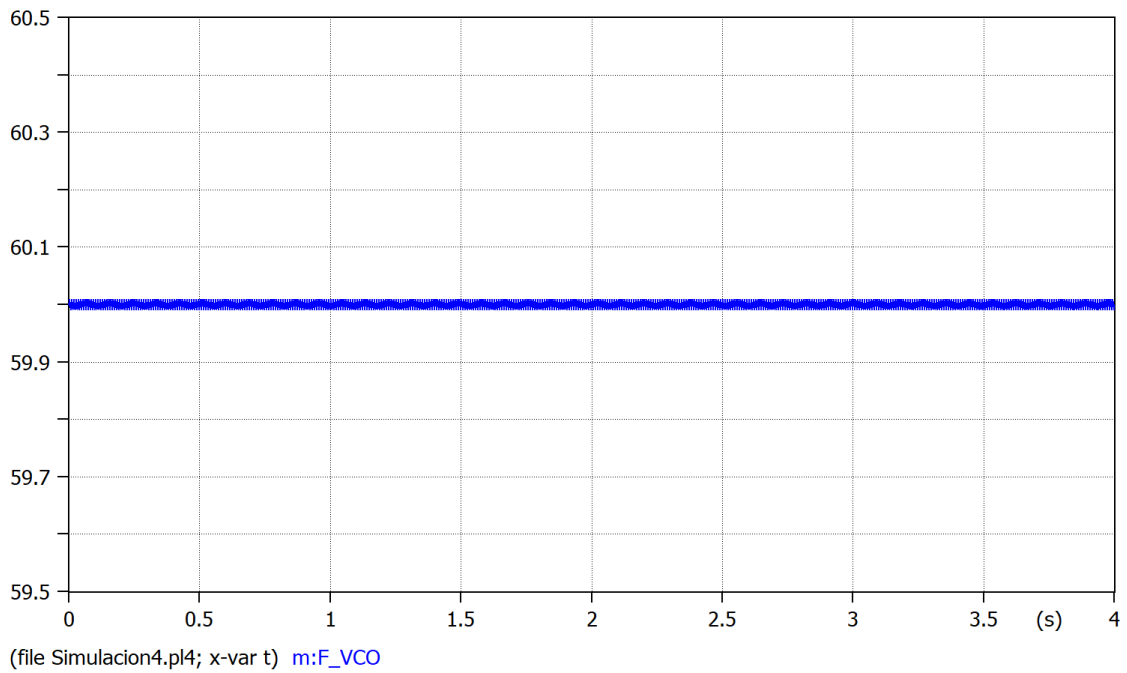


Figura 3.13: Frecuencia monitoreada por el PLL.

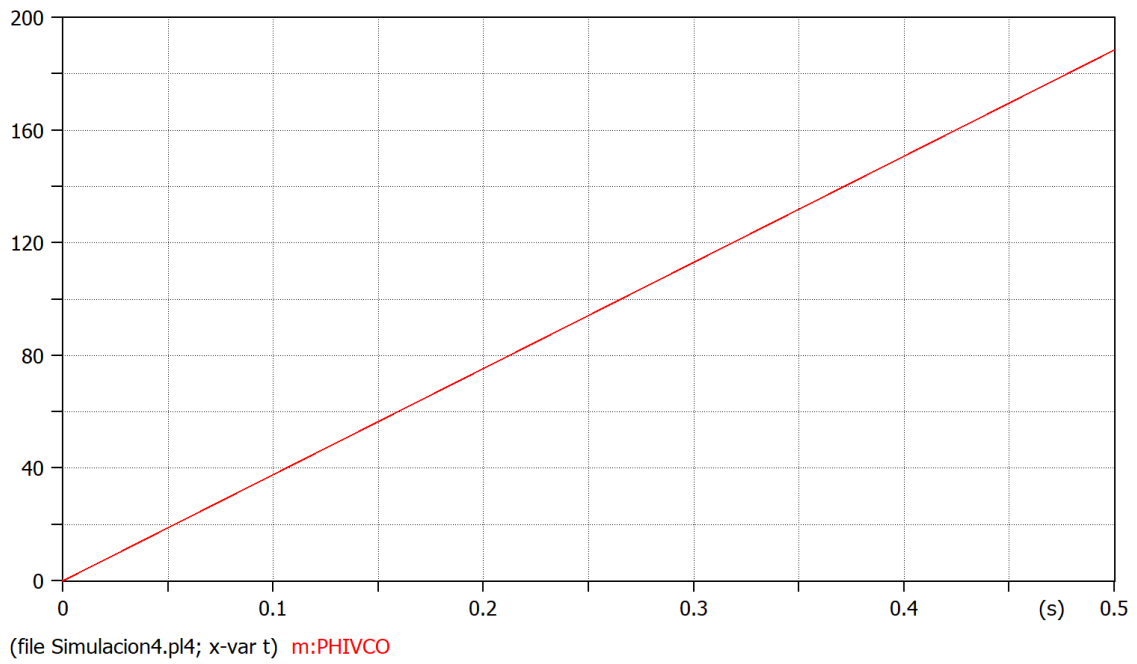


Figura 3.14: Angulo de fase monitoreado por el PLL.

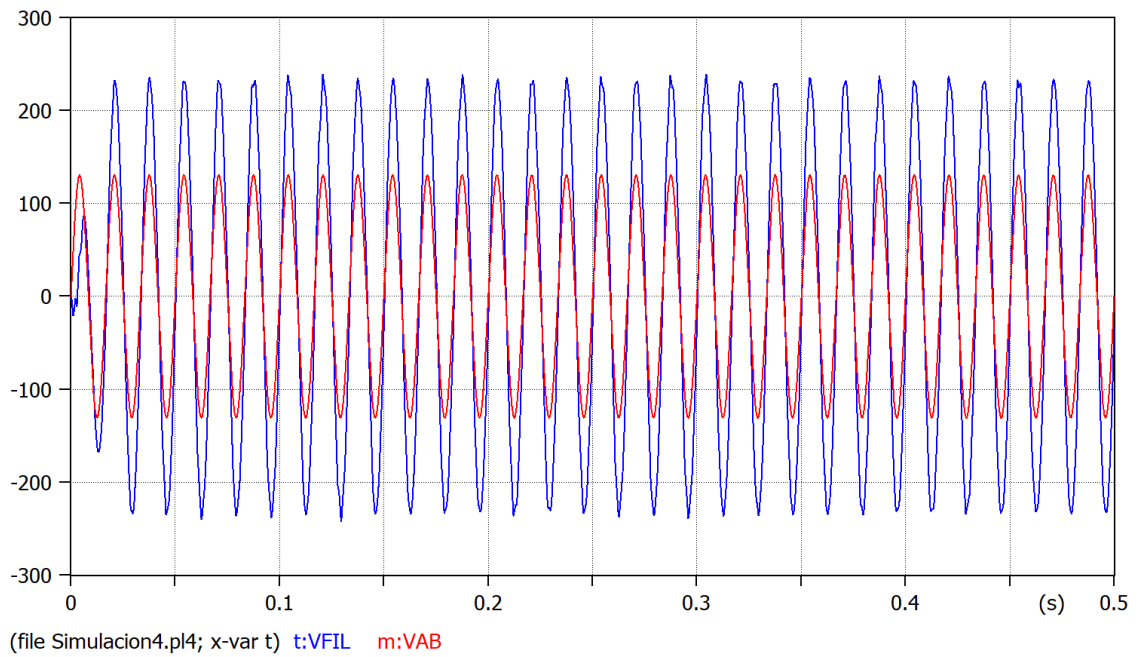


Figura 3.15: Voltaje del inversor con respecto al Voltaje de la Red.

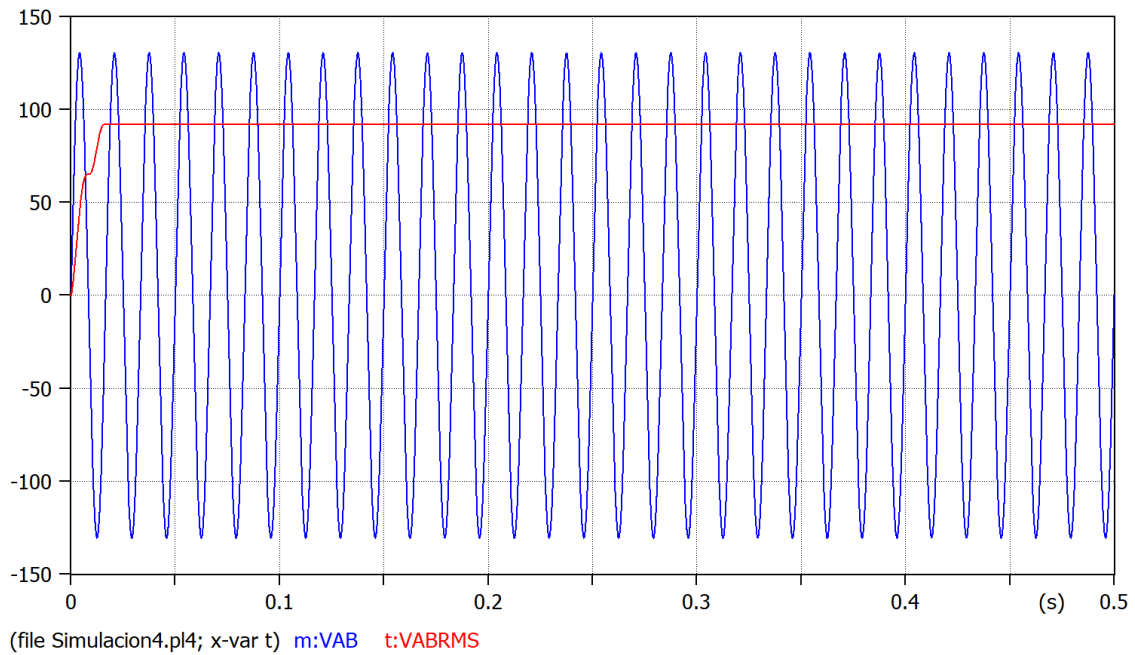


Figura 3.16: Voltaje V_{ab} con respecto al Voltaje V_{abrms} .

3.1.7 Parámetros Eléctricos del Sistema y Cálculo de Potencias

En la Fig 3.16, se muestra la comparación entre el voltaje instantáneo V_{ab} y su valor eficaz V_{abrms} .

En la Fig. 3.17, se observa la comparación entre la corriente instantánea I_{carga} y su valor eficaz I_{crms} .

En la Fig. 3.18, se evidencia la comparación entre el voltaje del inversor instantáneo V_{inv} y su valor eficaz V_{invrms} .

En la Fig. 3.19, se presenta la Potencia Aparate S del sistema, mientras que en la Fig. 3.20, se muestra la Potencia Activa P del sistema y por ultimo en la Fig. 3.21, se observa la Potencia Reactiva Q . En la Fig. 3.22, se compara las tres magnitudes las potencias S , P y Q .

3.1.8 Potencia activa y reactiva controladas

En la Fig. 3.23, se muestran las referencia para las Potencias P y Q . En la Fig. 3.24 se observa el cambio que efectúa los controladores en la onda sinusoidal. En la Fig 3.25, se evidencia el voltaje del inversor con respecto al voltaje de la red. Finalmente, en la Fig. 3.26 y la Fig. 3.27, se presentan las potencias P y Q controladas, comparadas con sus respectivas referencias.

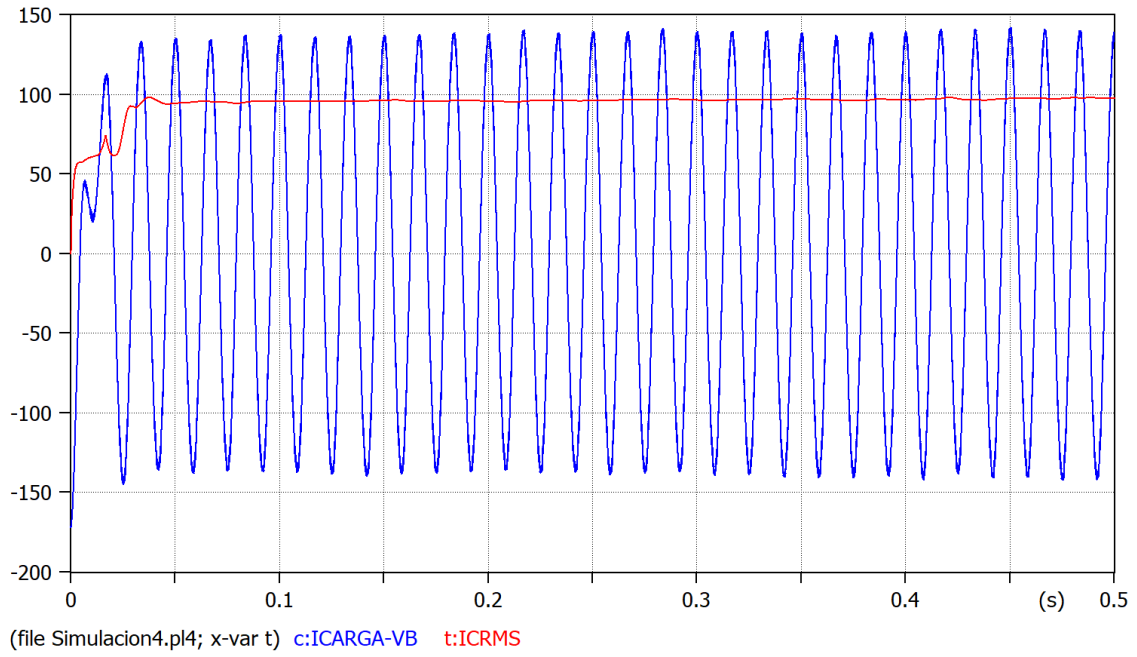


Figura 3.17: Corriente I_{carga} con respecto a la corriente I_{crms} .

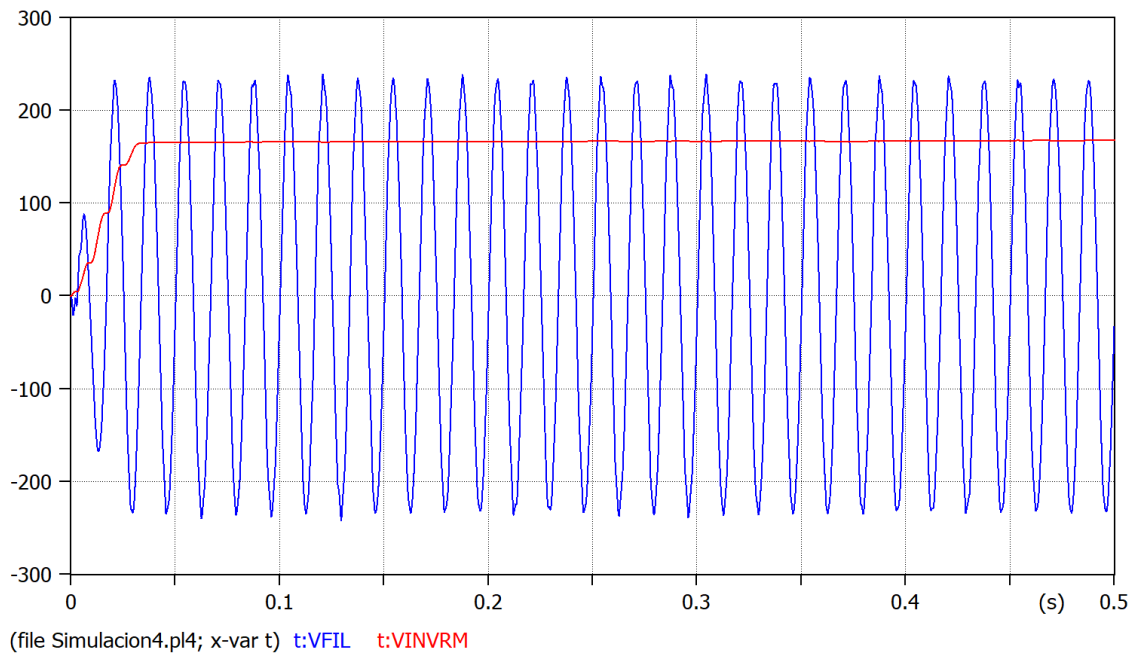


Figura 3.18: Voltaje V_{inv} con respecto al Voltaje V_{invrms} .

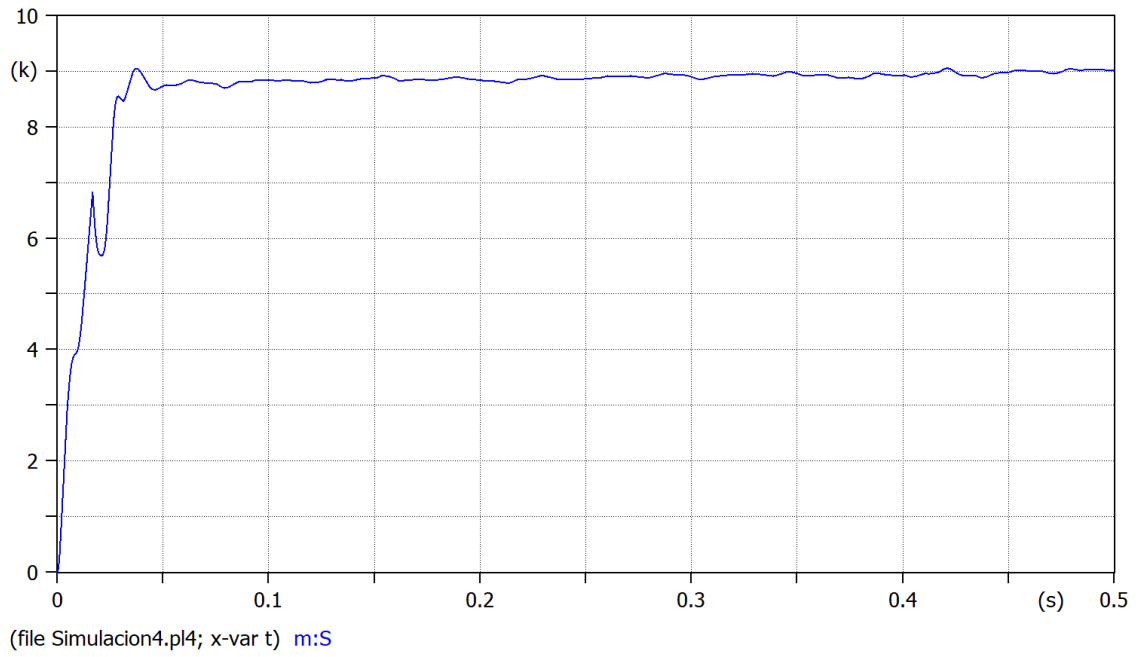


Figura 3.19: Potencia Aparente S .

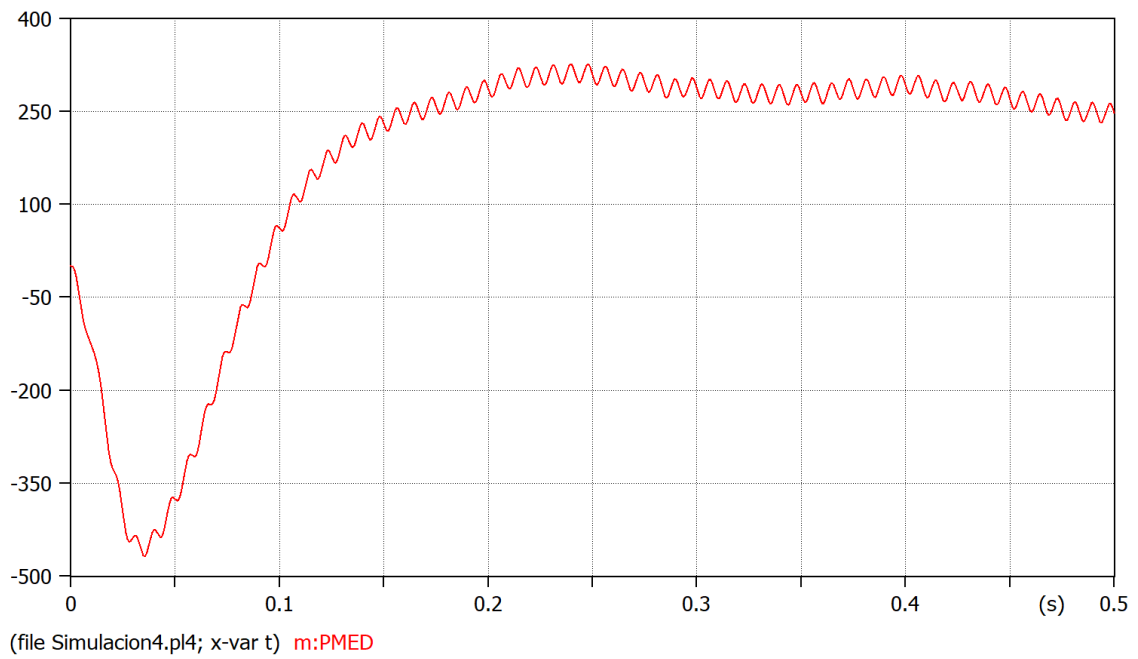


Figura 3.20: Potencia Activa P .

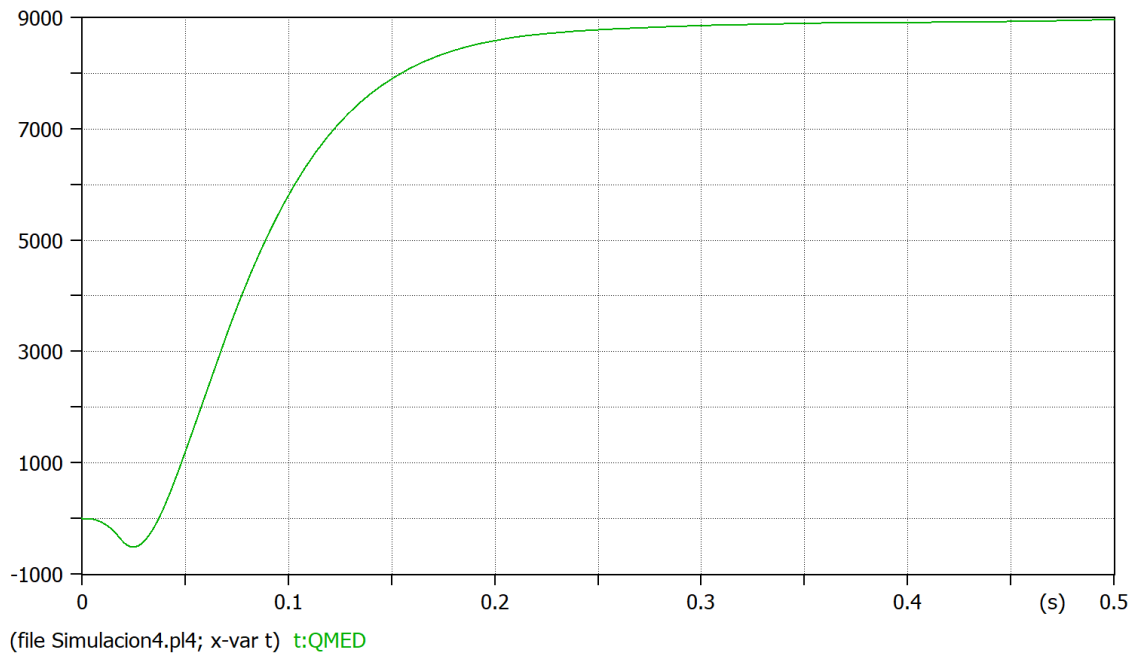


Figura 3.21: Potencia Reactiva Q .

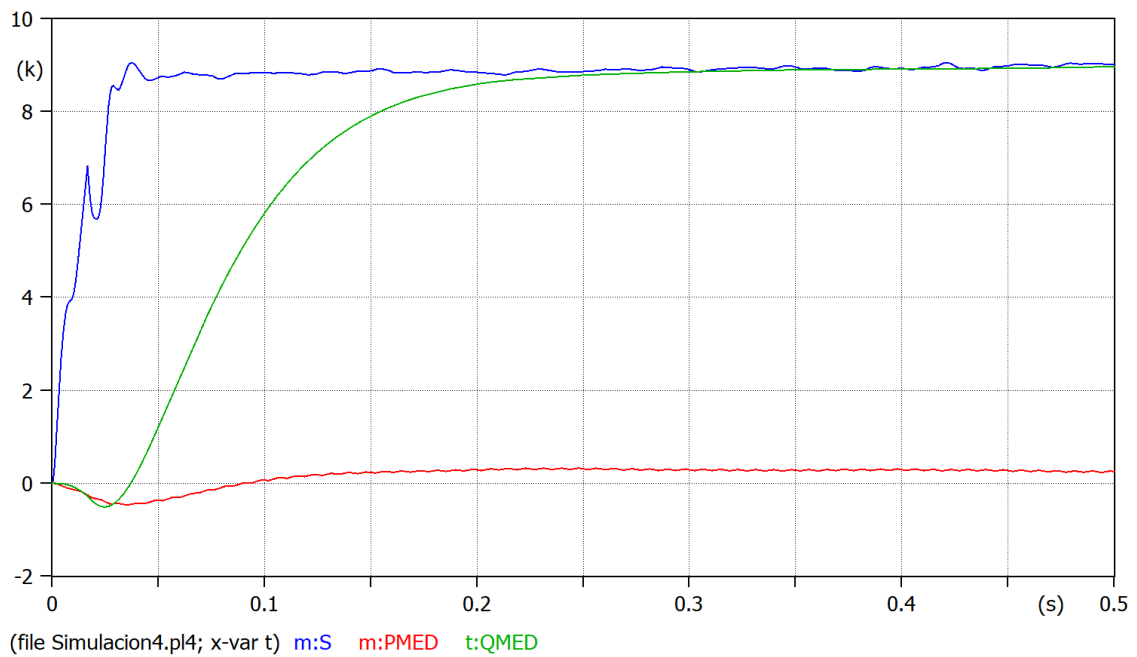


Figura 3.22: Potencias S , P y Q del sistema.

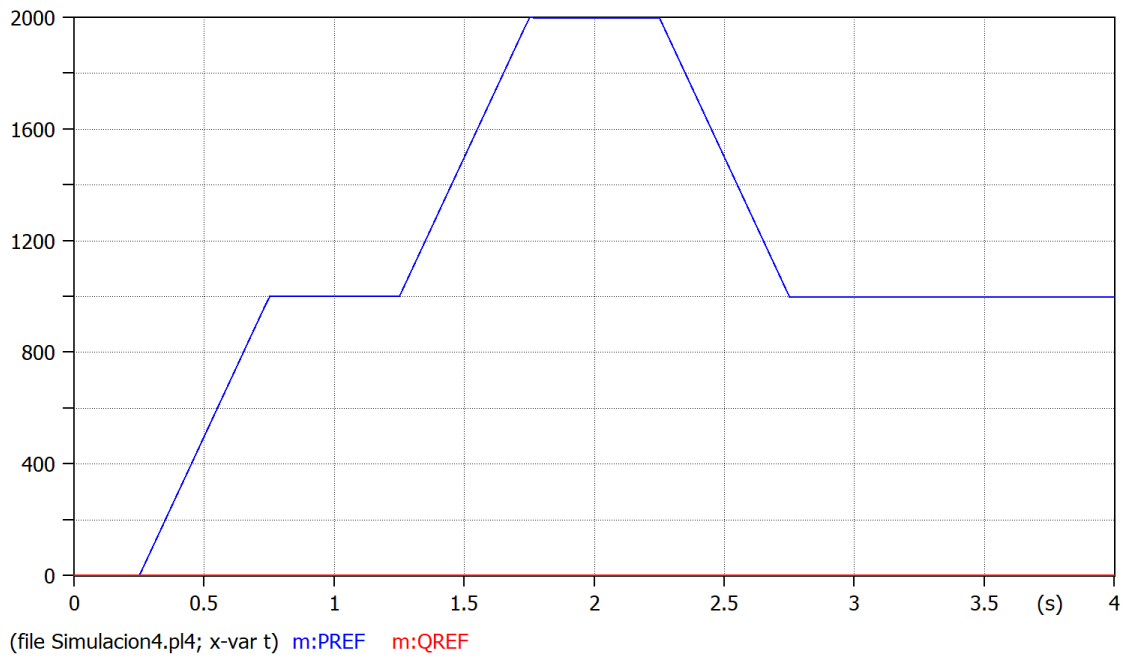


Figura 3.23: Referencia de las Potencias P y Q . del sistema.

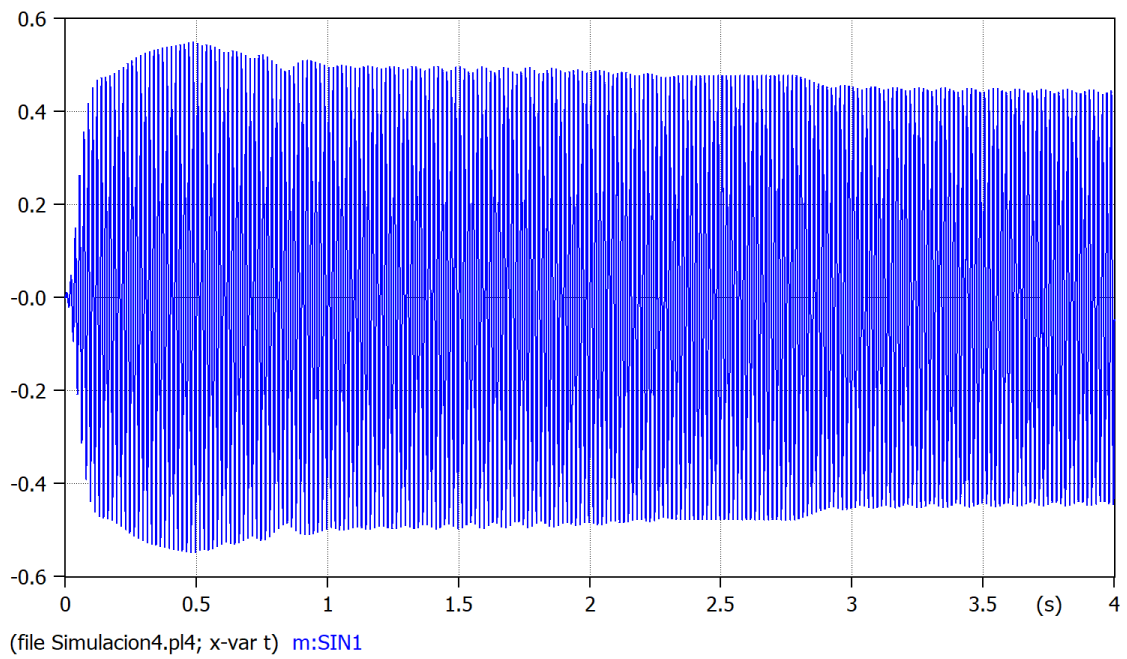


Figura 3.24: Señal Sinusoidal controlada.

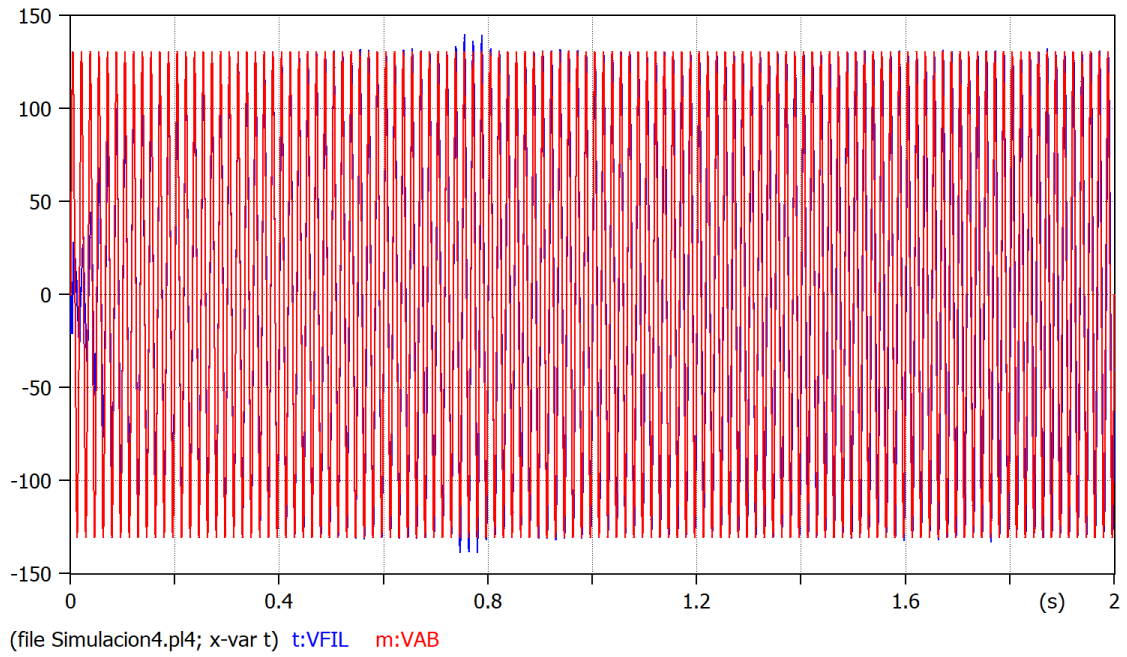


Figura 3.25: Voltaje del inversor con respecto al voltaje de la red.

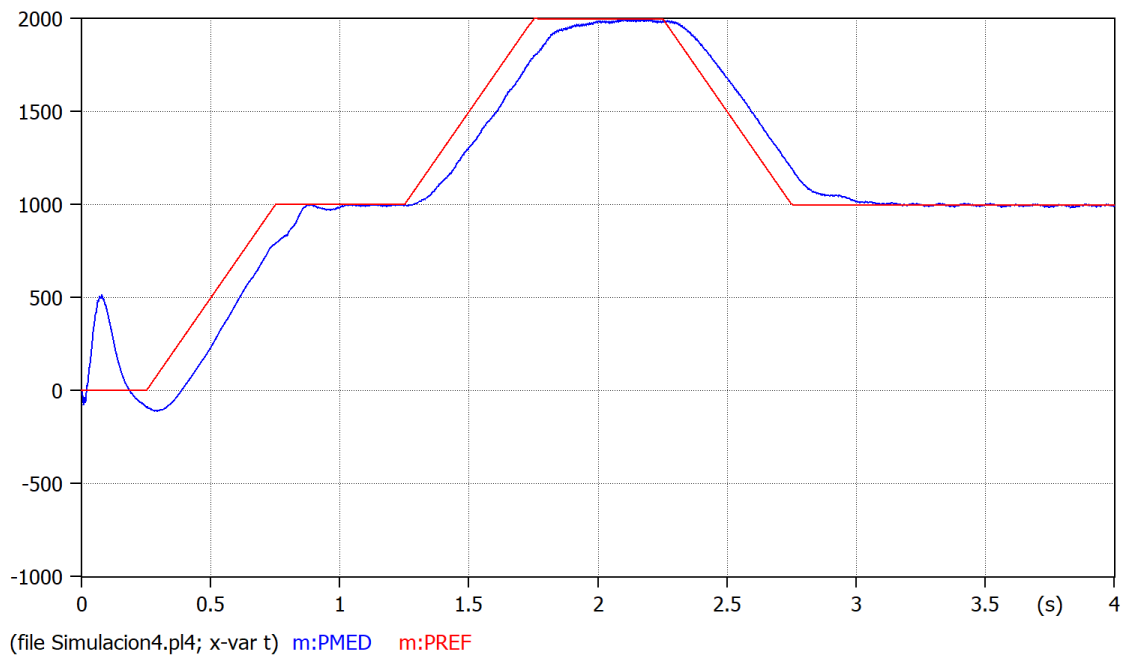


Figura 3.26: Potencia activa P controlada.

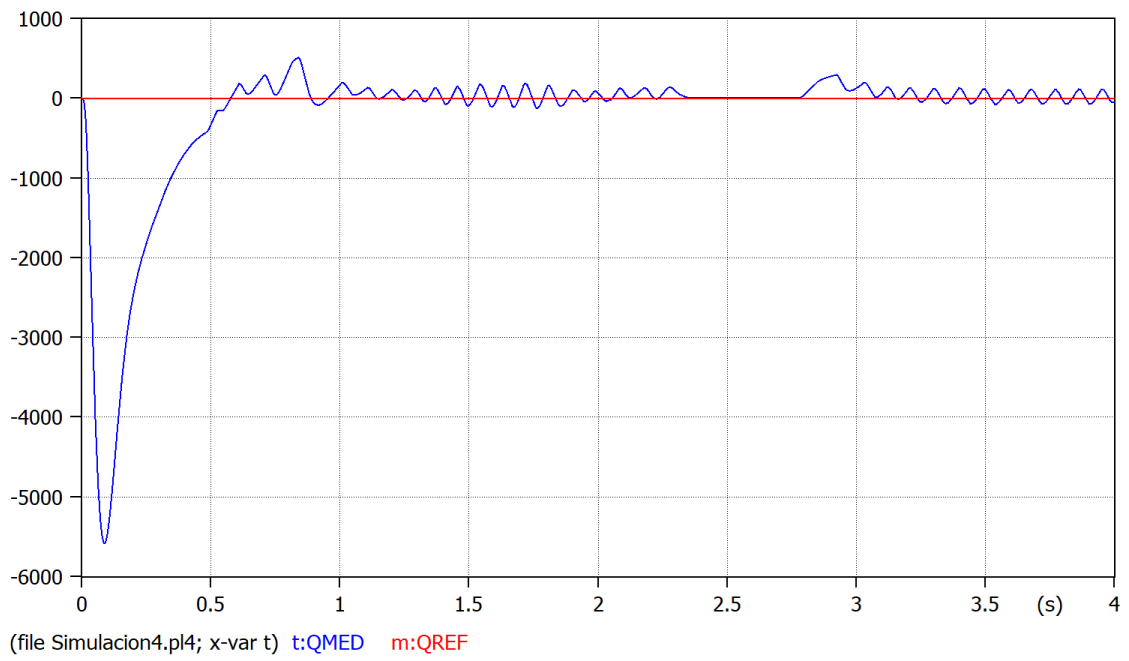


Figura 3.27: Potencia Reactiva Q controlada.

CAPÍTULO 4

Análisis de resultados

El análisis de los resultados se centra en interpretar el comportamiento dinámico y estacionario del sistema propuesto, identificando las causas técnicas del desempeño observado y evaluando su coherencia con los principios de diseño planteados. Asimismo, se comparan los resultados con el comportamiento esperado para sistemas de conversión y carga basados en energía FV.

4.1 Resultados de la modelación del sistema fotovoltaico en ATPDraw.

En la Fig. 3.1 se observa la característica $P - V$ obtenida en la simulación. Esta curva corresponde al comportamiento del generador FV bajo las condiciones de irradiancia y temperatura mostradas previamente en la Fig. 3.3 y la Fig 3.4. Para ello, se modelaron ambas variables considerando valores característicos de operación, de modo que la simulación replicara un escenario realista. Como resultado, se obtuvo la característica $P - V$ que representa el desempeño del arreglo FV bajo dichas condiciones ambientales.

Mientras que en la Fig. 3.5 se muestra la potencia entregada por el panel solar bajo los parámetros establecidos de temperatura e irradiancia. Esta potencia responde directamente a las variaciones de ambas condiciones ambientales, ya que la irradiancia determina el nivel máximo de generación y la temperatura influye en la eficiencia del módulo. En la simulación puede observarse cómo la potencia sigue el perfil de irradiancia aplicado y cómo los cambios térmicos afectan ligeramente el punto de máxima potencia, lo cual es coherente con el comportamiento real de los módulos FV.

4.2 Resultados obtenidos del funcionamiento del inversor.

Como se observa en la Fig. 3.7, la señal sinusoidal generada presenta una amplitud unitaria, y sirve como referencia fundamental para el proceso de modulación. En la Fig. 3.8, se muestra la generación de la onda triangular correspondiente, la cual

se construye en función de la señal sinusoidal previamente generada. Se aprecia que, cuando la onda sinusoidal es positiva, la onda triangular también se genera en su región positiva; de manera análoga, cuando la onda sinusoidal cambia a valores negativos, la onda triangular se produce en la región negativa. Para esta simulación se empleó un valor de $NTRI = 30$, que representa el número de triángulos generados por cada semiciclo de la señal sinusoidal. Un valor elevado de $NTRI$ permite obtener una modulación SPWM con mayor resolución, lo que se traduce en una mejor calidad de la forma de onda del inversor y una reducción en el contenido armónico.

En la Fig. 3.9 se presenta la señal SPWM resultante, obtenida mediante la comparación entre la señal sinusoidal y la onda triangular. Cuando el valor instantáneo de la triangular supera a la sinusoidal, la salida de la señal modulada adopta un nivel bajo o cero; en cambio, cuando la sinusoidal es mayor que la triangular, la salida pasa a un nivel alto o uno. Este proceso define los pulsos de conmutación del inversor.

En la Fig. 3.10, se presenta el análisis espectral de la señal SPWM obtenida en la simulación, calculado mediante la Transformada Rápida de Fourier. Al observar el espectro de Fourier puede verse que la mayor concentración de energía se encuentra en las componentes asociadas a la frecuencia portadora y sus múltiplos armónicos, lo cual es característico de un esquema SPWM. Los picos más altos aparecen alrededor de valores próximos entre 350 y 400 Hz y 750 - 800 Hz, que corresponden claramente a la frecuencia de conmutación seleccionada en la simulación y a sus armónicos superiores. Estas componentes dominantes son esperadas, ya que la modulación SPWM introduce una banda de armónicos estrechamente agrupada alrededor de la frecuencia portadora.

Además, se aprecia que la magnitud de los armónicos disminuye conforme aumenta la frecuencia, lo que indica que la señal SPWM mantiene un comportamiento adecuado en términos de distribución espectral. La amplitud de los primeros armónicos cercanos a la frecuencia fundamental es prácticamente nula, lo que confirma que la modulación no introduce distorsiones significativas en bajas frecuencias y que la componente fundamental será generada correctamente por el proceso de filtrado posterior. La presencia de armónicos bien definidos y agrupados en bandas confirma que la señal SPWM es adecuada para ser filtrada mediante un filtro pasa-bajo para obtener un voltaje sinusoidal limpio en la salida del inversor.

En conjunto, el espectro obtenido demuestra que el sistema de modulación está funcionando de forma correcta, los armónicos se ubican donde deberían, su magnitud sigue el comportamiento esperado y la energía de la señal está concentrada en las bandas propias del SPWM. Esto garantiza que, tras el filtrado, el inversor podrá reconstruir una onda sinusoidal con niveles aceptables de distorsión armónica, cumpliendo las exigencias básicas para la conexión a red.

Por ultimo, en la Fig. 3.11, se observa el voltaje de salida generado por el inversor, el cual refleja el proceso de modulación SPWM aplicado y la secuencia de conmutación implementada. En la Fig. 3.12, se presenta la comparación entre la señal SPWM la cual se observa de color azul, que corresponde a la modulación generada por el inversor, y el voltaje filtrado del inversor la cual se muestra en color rojo. La forma resultante muestra claramente cómo el voltaje senoidal surge a partir de la conmutación de alta frecuencia del SPWM. Sin embargo, puede observarse un ligero desfase entre ambas señales; específicamente, la onda senoidal presenta un pequeño retraso respecto a los pulsos SPWM. Este comportamiento es completamente esperado y se debe al efecto del filtro pasa-bajo aplicado a la salida del inversor. Dicho filtro, al atenuar los armónicos de alta frecuencia presentes en la señal SPWM, introduce un retardo de fase inherente a su respuesta dinámica. A pesar de este desfase, el voltaje filtrado conserva la forma senoidal deseada y demuestra que el proceso de modulación y filtrado está funcionando correctamente para obtener una señal apta para su sincronización con la red.

4.3 Resultados obtenidos del PLL.

Con ayuda del PLL, se obtuvo el valor de la frecuencia de la red, mostrado en la Fig. 3.13, así como la fase correspondiente, presentada en la Fig. 3.14. Estos parámetros son fundamentales para el control de las potencias P y Q , ya que permiten que el inversor se sincronice adecuadamente con la red eléctrica, garantizando una inyección de potencia estable y coherente con las condiciones de operación del sistema.

4.4 Análisis comparativo de la tensión en el inversor con respecto al voltaje en la red

En la Fig. 3.15, se presenta el comportamiento del voltaje del inversor, el cual fue previamente filtrado mediante un filtro pasa-bajo con el propósito de reducir los armónicos generados por la modulación. Al compararlo con el voltaje de la red, se observa que ambas señales están sincronizadas en fase, evidenciando un correcto funcionamiento del sistema de sincronización. No obstante, la amplitud del voltaje del inversor resulta mayor que la del voltaje de la red, lo que provoca que la potencia activa intercambiada sea prácticamente nula, mientras que la potencia reactiva aumente debido a la diferencia de magnitudes entre ambas señales.

4.5 Interpretación de los parámetros Eléctricos del Sistema y del Cálculo de Potencias

En la Fig. 3.16, se presenta el voltaje fundamental de la red junto con su valor eficaz; de igual manera, en la Fig. 3.17, se muestra la corriente fundamental comparada con su respectivo valor eficaz. Asimismo, en la Fig. 3.18, se observa el voltaje fundamental del inversor frente a su valor eficaz. Estos parámetros son empleados posteriormente para el cálculo de las potencias S y Q , puesto que dicho cálculo requiere el valor eficaz de cada señal. Esto se debe a que las expresiones de potencia en sistemas de corriente alterna están definidas en función de los valores RMS, los cuales representan la capacidad real de una señal para entregar energía, mientras que el valor fundamental únicamente describe el componente principal de la forma de onda.

En la Fig. 3.19, se presenta la potencia aparente del sistema, la cual representa la potencia total requerida para alimentar la carga y refleja la combinación de los componentes activo y reactivo. En la 3.20, se muestra la potencia activa P , filtrada mediante un filtro pasa-bajo de segundo orden para eliminar las oscilaciones de alta frecuencia propias del cálculo instantáneo. De manera similar, en la Fig. 3.21, se muestra la potencia reactiva Q , también filtrada previamente con el mismo criterio para obtener una señal más estable y representativa del comportamiento real del sistema.

Finalmente, en la Fig. 3.22, se observan simultáneamente las potencias S , P y Q . Como se explicó anteriormente, debido a que la magnitud del voltaje del inversor es superior a la del voltaje de la red, la potencia reactiva Q presenta un valor elevado. Además, al estar ambas señales de voltaje sincronizadas en fase, la transferencia de potencia activa P es prácticamente nula. En consecuencia, la potencia reactiva se aproxima al valor de la potencia aparente S , ya que es la responsable de compensar el desbalance del sistema en estas condiciones de operación.

4.6 Evaluación del desempeño de las potencia activa y reactiva controladas

Como primer paso, se modelaron las referencias que debía seguir el sistema, las cuales se presentan en la Fig. 3.23. Para la potencia activa P , se diseñó una curva de referencia que represente un comportamiento lo más cercano posible a una condición real de operación. La potencia inicia con un incremento progresivo, posteriormente se mantiene en un nivel constante, y finalmente disminuye antes de estabilizarse nuevamente. Este perfil permite evaluar el desempeño dinámico del controlador frente a variaciones graduales y abruptas, simulando el comportamiento típico de

un sistema fotovoltaico sometido a cambios de demanda o condiciones ambientales. En contraste, para la potencia reactiva Q se estableció un valor de referencia cercano a cero, ya que el objetivo del sistema propuesto es maximizar el aprovechamiento de la potencia activa generada y minimizar el intercambio de potencia reactiva con la red.

En la Fig. 3.24, se observa cómo los controladores intervienen directamente en la amplitud y la fase de la onda sinusoidal generada por el sistema. Paralelamente, la frecuencia y la fase estimadas por el PLL influyen de manera decisiva en la generación de la señal sinusoidal que sirve como base para construir la onda triangular y, posteriormente, la señal SPWM. Esta señal SPWM es la encargada de activar los tiristores del inversor, determinando así la forma final del voltaje generado. El aporte del PLL resulta fundamental, ya que garantiza que la señal generada mantenga una correcta sincronización en términos de fase, frecuencia y secuencia con respecto a la red eléctrica.

Esta interacción se evidencia claramente en la Fig. 3.25, donde se compara el voltaje del inversor con el voltaje de la red. Como puede apreciarse, los controladores actúan directamente sobre la magnitud y el desfase del voltaje del inversor, ajustándolo dinámicamente para cumplir las referencias establecidas y asegurar que el sistema opere alineado con los parámetros requeridos para una adecuada inyección o compensación de potencia.

Finalmente, en la Fig. 3.26, se observa cómo el controlador de la potencia activa sigue adecuadamente la referencia programada. Este comportamiento demuestra que el controlador es capaz de ajustar tanto la fase como el ángulo de disparo del inversor para incrementar o disminuir la transferencia de potencia hacia la red conforme a la curva diseñada. Del mismo modo, en la Fig. 3.27, se evidencia que el controlador de la potencia reactiva mantiene el valor de Q cercano a cero, cumpliendo con el objetivo de operación del sistema: asegurar que la inyección de potencia se concentre en el componente activo, minimizando el intercambio de reactivos y manteniendo un factor de potencia óptimo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación tuvo como propósito diseñar un sistema monofásico de carga para vehículos eléctricos alimentado mediante energía fotovoltaica y capaz de integrarse a la red eléctrica existente. En este trabajo se planteó una alternativa sostenible que aproveche los recursos renovables y que contribuya a mejorar la eficiencia en el proceso de carga de las baterías de los vehículos eléctricos. Esto se logró desarrollando un conjunto de etapas metodológicas que permitieron modelar, analizar y evaluar el funcionamiento del sistema propuesto bajo criterios técnicos y económicos.

Los resultados obtenidos muestran que la modelación del sistema — basado exclusivamente en la generación fotovoltaica y su acoplamiento a la red — permite describir un comportamiento dinámico estable y eficiente, asegurando la disponibilidad del punto de recarga en distintos escenarios de irradiancia. Además, se comprobó que la implementación de estrategias adecuadas de control, en especial la gestión del flujo de potencia entre el sistema fotovoltaico y la red, mejora notablemente el rendimiento energético y reduce las pérdidas durante la carga del vehículo eléctrico.

En función de las metas planteadas al inicio del proyecto, se puede afirmar que el objetivo general fue alcanzado, logrando diseñar un sistema técnicamente viable, escalable e integrable a la infraestructura eléctrica actual. Asimismo, los objetivos específicos se cumplieron mediante:

- La modelación integral del sistema fotovoltaico y del punto de conexión a la red.
- La evaluación comparativa de diferentes estrategias de control, que permitió identificar configuraciones que maximizan la eficiencia del intercambio de potencia.
- El análisis técnico-económico, mediante el cual se evaluó el costo estimado de implementación del sistema tanto en escenarios de demanda residencial como comercial, identificando los componentes de mayor impacto económico y

determinando la viabilidad del proyecto bajo distintas configuraciones y niveles de carga.

Este trabajo aporta de manera significativa al desarrollo de la movilidad eléctrica y a la integración de energías renovables, porque presenta una metodología de diseño aplicable a sistemas de carga descentralizados que combinan generación fotovoltaica y conexión directa a la red. Los resultados pueden ser utilizados como referencia para futuros proyectos orientados a la construcción de infraestructuras de recarga más limpias y sostenibles.

Entre las principales restricciones identificadas en este proyecto se encuentran las variaciones de irradiancia solar y temperatura propias de la zona de estudio, así como la fluctuación en los costos de los componentes fotovoltaicos, factores que introducen cierto grado de incertidumbre en las evaluaciones operativas y económicas del sistema. Adicionalmente, el diseño se complica al tratarse de un sistema monofásico, donde tanto la potencia activa como la potencia reactiva presentan variaciones continuas y no se mantienen prácticamente constantes como ocurre en sistemas trifásicos. Esta variabilidad exige un control más preciso para garantizar la correcta sincronización y estabilidad en la interacción con la red. A pesar de estas limitaciones, el diseño propuesto mantiene su validez técnica y los resultados obtenidos son consistentes con los objetivos planteados.

Finalmente, se recomienda profundizar en el estudio de estrategias avanzadas de gestión energética, como el uso de modelos predictivos u optimización basada en inteligencia artificial, que permitan mejorar el intercambio de potencia entre la fuente fotovoltaica y la red. Asimismo, sería conveniente analizar el comportamiento del sistema en escenarios de alta demanda y explorar la posibilidad de integrar tecnologías de carga rápida, con el fin de ampliar la aplicabilidad del modelo en contextos reales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Gorea, D.-L. Chiorean, I. Vlasa, I. Triştiu, and D. Bica, “Integration of renewable energy sources in energy systems: Management, security and sustainability,” in *2023 11th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT, CIEM 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023.
- [2] M. Swadi, D. Jasim Kadhim, M. Salem, F. Mohammed Tuaimah, A. S. Majeed, and A. Jawad Alrubaie, “Investigating and predicting the role of photovoltaic, wind, and hydrogen energies in sustainable global energy evolution,” *Global Energy Interconnection*, vol. 7, no. 4, p. 429 – 445, 2024.
- [3] N. K. Pandey, R. Yadav, S. K. Maitra, P. Sharma, and R. K. Pachauri, “Eco-friendly EV charging: Utilizing grid-linked solar Photovoltaic Systems,” in *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2024*, p. 280 – 285, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024.
- [4] S. Saleemi, N. Noor, S. M. Khan, T. Riaz, H. A. Mannan, and N. Gull, *Nanomaterial for carbon dioxide capturing and carbon emission control*. Elsevier, 2024.
- [5] H. Aydogan, “Electric vehicles and renewable energy,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2777, 2024.
- [6] F. Reguyal and M. G. Ginting, “Impact of electricity mix on the eco-friendliness of electric vehicles,” *Environmental Science and Engineering*, p. 223 – 233, 2024.
- [7] T. Davidson, “Three phases of the electric driven vehicle - part i,” *Automotive Industries AI*, vol. 191, no. 11, 2011.
- [8] C. Chan, “The rise & fall of electric vehicles in 1828-1930: Lessons learned,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 1, p. 206 – 212, 2013.

- [9] K. Høyer, “The battle of batteries: a history of innovation in alternative energy cars,” *International Journal of Alternative Propulsion*, vol. 1, no. 4, p. 369 – 384, 2007.
- [10] A. M. Bazzi, Y. Liu, and D. S. Fay, “Electric machines and energy storage: Over a century of technologies in electric and hybrid electric vehicles,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 6, no. 3, p. 49 – 53, 2018.
- [11] M. Goel, V. Verma, and N. G. Tripathi, “Solar light energy: A photovoltaic cell,” *Green Energy and Technology*, p. 51 – 63, 2022.
- [12] A. Starowicz, P. Rusanowska, and M. Zieliński, “Photovoltaic cell – the history of invention – review; [panel fotowoltaiczny – historia wynalazku – artykuł przeglądowy],” *Polityka Energetyczna*, vol. 26, p. 169 – 180, 2023.
- [13] R. P. Raffaele, *An introduction to space photovoltaics: Technologies, issues, and missions*. Photovoltaics for Space: Key Issues, Missions and Alternative Technologies, 2022.
- [14] V. Tyagi, N. A. Rahim, N. Rahim, and J. A. Selvaraj, “Progress in solar PV technology: Research and achievement,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, p. 443 – 461, 2013.
- [15] N. Raval and A. K. Gupta, “Historic developments, current technologies and potential of nanotechnology to develop next generation solar cells with improved efficiency,” *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 4, no. 2, p. 77 – 93, 2015.
- [16] G. V. Bulavko, “Organic photovoltaics: A journey through time, advancements, and future opportunities,” *History of Science and Technology*, vol. 14, p. 10 – 32, 2024.
- [17] R. Tian, S. Zhou, Y. Meng, C. Liu, and Z. Ge, “Material and device design of flexible perovskite solar cells for next-generation power supplies,” *Advanced Materials*, vol. 36, no. 37, 2024.
- [18] E. Despotou, *1.10 - Vision for Photovoltaics in the Future*. Comprehensive Renewable Energy, 2012.
- [19] N. Kumar, I. Hussain, B. Singh, and B. K. Panigrahi, “Rapid MPPT for uniformly and partial shaded PV system by using jayade algorithm in highly fluctuating atmospheric conditions,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 5, p. 2406 – 2416, 2017.

- [20] S. V. Arpi Puga and B. G. Prado Bermeo, “Diseño de un seguidor solar de doble eje para un sistema de energía fotovoltaica en el centro de salud de la comunidad de yaapi,” UPS thesis, UPS, 2022.
- [21] V. Bhardwaj and P. Gaur, “A fuzzy-based buck-boost photovoltaic inverter for voltage stabilization during mismatched environmental conditions,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 852, p. 451 – 466, 2022.
- [22] C. Balaji, O. Hemakesavulu, A. Dominic Savio, B. Vinothkumar, S. Sakthi, and P. Sivaperumal, “A transformerless buck-boost converter as maximum power point tracker for battery charging,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 795, p. 237 – 246, 2022.
- [23] S. Behera, B. Kumar, and B. P. Panigrahi, “Design and simulation of a new soft-switching buck-boost converter,” *International Journal of Scientific and Technology Research*, vol. 8, no. 11, p. 857 – 863, 2019.
- [24] J. Jose, A. S. Sabu, S. K. Shaji, J. Baby, T. Chacko, and R. Akhil Raj, “Performance and comparative evaluation of novel and conventional DC-DC converters with dc motor,” in *2019 Global Conference for Advancement in Technology, GCAT 2019*, 2019.
- [25] W. Luo, Y. Yin, X. Shao, J. Liu, and L. Wu, “Sliding mode control of buck converters,” *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 413, p. 119 – 130, 2022.
- [26] F. Wu, S. Fan, and S. Luo, “Elimination of transient current mutation and voltage spike for buck-boost current-fed isolated DC-DC converter,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 11, p. 10928 – 10937, 2021.
- [27] V. Fernao Pires, D. Foito, A. Cordeiro, and J. F. Silva, “A single-switch DC/DC buck-boost converter with extended output voltage,” in *7th International IEEE Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2018*, p. 791 – 796, 2018.
- [28] Y. Zhang, Y. Chen, L. Wei, and J. Jiang, “Asymmetric full bridge bidirectional DC-AC converter based on v2g platform,” in *2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering, CIYCEE 2021*, 2021.
- [29] T. T. Vu and R. Beinarys, “Feasibility study of compact high-efficiency bidirectional 3-level bridgeless totem-pole pfc/inverter at low cost,” in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, vol. 2020-March, p. 3397 – 3404, 2020.

- [30] F. F. Piña Piña, “Factibilidad técnica-económica de un sistema de generación fotovoltaico conectado a red para la unidad educativa técnico salesiano,” UPS thesis, UPS, 2024.
- [31] F. Mohamed, S. Khanal, and V. R. Disfani, “MMC-based grid integration of PV-BESS with power grid support capabilities,” in *2020 52nd North American Power Symposium, NAPS 2020*, 2021.
- [32] S. Barcellona, M. Barresi, S. Colnago, and L. Piegari, “MMC-PV system with dc-link integrated battery energy storage system,” in *2021 IEEE 15th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2021*, 2021.
- [33] E. Zhou, T. Logenthiran, and W. Woo, “Integration of a PV-battery hybrid system with the main power grid,” in *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems, ICPS 2016*, 2016.
- [34] A. Jain and S. Bhullar, “Design and performance analysis of solar PV-battery energy storage system integration with three-phase grid,” *Journal of Power Sources*, vol. 640, 2025.
- [35] K. A. C. Kamaruddin, N. N. Mansor, N. A. M. I. Yeong, and A. F. Othman, “Optimal integration of large-scale solar and battery energy storage system in malaysia,” in *2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT 2023*, 2023.
- [36] M. Eagon, S. Fakhimi, G. Lyu, A. Yang, B. Lin, and W. F. Northrop, “Model-based framework to optimize charger station deployment for battery electric vehicles,” in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, vol. 2022-June, p. 1639 – 1648, 2022.
- [37] K. E. Harouri, S. E. Hani, F. E. Issaoui, M. Benbouzid, and H. Mediouni, “Electric vehicle charging station: a review of energy management systems and control type,” *International Journal on Energy Conversion*, vol. 9, no. 6, p. 251 – 266, 2021.
- [38] M. M. Irfan, S. Gajula, S. Busigampala, A. Gulla, A. N. Gugulothu, and A. Davera, “Advances in EV charging: Powering up batteries in india,” in *4th International Conference on Communication, Computing and Industry 6.0, C216 2023*, 2023.
- [39] R. J. S. Jayakumar and A. C. A. Arul, *Electric vehicle battery chargers*. River Publishers, 2025.

- [40] A. G. Abo-Khalil, R. C. Bansal, K. Sayed, and A. Almakky, *Emerging electric vehicle technologies: Topologies, charging infrastructure, grid stability, and economic impacts*. Elsevier, 2025.
- [41] M. Knez, G. K. Zevnik, and M. Obrecht, “A review of available chargers for electric vehicles: United states of america, european union, and asia,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 109, p. 284 – 293, 2019.
- [42] M. Muhammed Alaudeen Ashiq, L. Jessi Sahaya Shanthi, and G. Sivasankar, “Energy efficient EV charger using bridgeless canonical converter with improved power quality,” in *2023 International Conference on Energy, Materials and Communication Engineering, ICEMCE 2023*, 2023.
- [43] B. K. Sovacool, J. Axsen, and W. Kempton, “The future promise of vehicle-to-grid (v2g) integration: A sociotechnical review and research agenda,” *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 42, p. 377 – 406, 2017.
- [44] G. Vishnu, D. Kaliyaperumal, R. Jayaprakash, A. Karthick, V. Kumar Chinaiyan, and A. Ghosh, “Review of challenges and opportunities in the integration of electric vehicles to the grid,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 14, no. 9, 2023.
- [45] M. A. Mughal, P. Lindahl, U. Zia, and L. Freeman, *Empowering a resilient grid: Navigating the environmental challenges of photovoltaic system integration*. Elsevier, 2024.
- [46] H. Ahmed, E. Barbulescu, and M. Nassereddine, “Advanced electrical network stability using hybrid PV & EV systems in smart cities,” in *International Conference on Electrical, Computer, and Energy Technologies, ICECET 2024*, 2024.
- [47] A. Almazroui and S. Mohagheghi, “Coordinated control of electric vehicles and PV resources in an unbalanced power distribution system,” *Energies*, vol. 15, no. 24, 2022.
- [48] D. Chen, H. Li, C. S. Lai, and L. L. Lai, “Reinforcement learning-based profit maximization for battery energy storage systems with electric vehicles and photovoltaic systems,” *IET Conference Proceedings*, vol. 2023, no. 28, p. 35 – 40, 2023.
- [49] Q. Hoarau and Y. Perez, “Interactions between electric mobility and photovoltaic generation: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, p. 510 – 522, 2018.

- [50] S. Shimi, R. A. De Oliveira, A. Kumar, and P. Kumar, *Impacts Due to Vehicle-to-Grid and Solar Photovoltaic Integration with the Grid: A Review*. Wiley, 2024.
- [51] S. Aliamooei-Lakeh, K. Corzine, L. Parsa, and R. De Castro, “A multi-objective optimization problem for sizing and siting of power systems with the integration of DG units, EV charging stations, and ESSs,” in *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, p. 618 – 622, 2024.
- [52] J. D. Torres Sarmiento, “Estudio de viabilidad en la implementación de vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca,” UPS. thesis, UPS, 2015.
- [53] R. C. Bansal, *Electric vehicles*. Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives, 2017.
- [54] A. Upadhyay, M. Dalal, N. Sanghvi, V. Singh, S. Nair, I. C. Scurtu, and C. Dragan, “Electric vehicles over contemporary combustion engines,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 635, 2021.
- [55] A. M. Abbas Altherfery, “Solar energy gate to improve electric vehicle mobility—a literature review,” *International Journal of Scientific and Technology Research*, vol. 7, no. 5, p. 74 – 79, 2018.
- [56] S. M. Hussain, *Introduction to electric vehicles: Past, present, and future*. Solving Fundamental Challenges of Electric Vehicles, 2024.
- [57] G. Rim, T. Ha, Y. Choi, H. Ryoo, J. Kim, H. Sohn, S. Kim, S. Lee, M. M. Syed, and H. Kim, “Electrification of a truck for city delivery services,” in *28th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2015, EVS 2015*, 2015.
- [58] B. Li, R. Pan, and R. Wang, “Electric vehicle motor control principle and optimization analysis,” *IET Conference Proceedings*, vol. 2024, no. 24, p. 492 – 496, 2024.
- [59] O. Andersen, “Towards the use of electric cars,” *Green Energy and Technology*, vol. 140, p. 71 – 80, 2013.
- [60] T.-W. Chang, “An indispensable role in promoting the electric vehicle industry: An empirical test to explore the integration framework of electric vehicle charger and electric vehicle purchase behavior,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 176, 2023.

- [61] M. Hossain, L. Kumar, M. Islam, and J. Selvaraj, “A comprehensive review on the integration of electric vehicles for sustainable development,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2022, 2022.
- [62] K. Vishnumurthy and K. Girish, “A comprehensive review of battery technology for e-mobility,” *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 98, no. 10, 2021.
- [63] Q. Xu, “Comparison and optimization of different types of lithium batteries for new energy vehicles,” in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 13159, 2024.
- [64] R. Kumar, *Lithium-Ion Battery for Electric Transportation: Types, Components, Pack Design, and Technology*. CRC Press, 2024.
- [65] D. Santhosha, H. Ramesh, and N. Mamatha, *Comprehensive Review of Grid Operation with Distributed Resources and Charging Stations for Electric Vehicles*. Distributed Energy Resources and Electric Vehicle Analysis and Optimisation of Network Operations, 2024.
- [66] R. Demiryürek, M. N. Ateş, and B. Tunaboşlu, “Future of lithium ion batteries for electric vehicles: Problems and expected developments,” *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, p. 524 – 540, 2023.
- [67] V. Vaideeswaran, S. Bhuvanesh, and M. Devasena, “Battery management systems for electric vehicles using lithium ion batteries,” in *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT 2019*, 2019.
- [68] J. Bhuvana, M. Pandeya, and R. Vishnoi, “Emerging battery technologies for high-power electric vehicles,” in *2024 International Conference on Optimization Computing and Wireless Communication, ICOCWC 2024*, 2024.
- [69] M. Loganathan, C. Ming Tan, B. Mishra, T. A. M. Msagati, and L. W. Snyman, “Review and selection of advanced battery technologies for post 2020 era electric vehicles,” in *2019 IEEE Transportation Electrification Conference, ITEC-India 2019*, 2019.
- [70] N. Meghana, M. Pushparaju, M. Kavitha, N. Kalyan Chakravarthy, and D. M. Reddy, “A critical review on electric vehicle battery failures and causes,” in *2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation, SeFeT 2022*, 2022.
- [71] D. Chatroux, “Performances of batteries technologies in vehicle applications,” in *PCIM Europe Conference Proceedings*, p. 273 – 278, 2013.

- [72] Y. Song, Y. Yang, and Z. Hu, "Present status and development trend of batteries for electric vehicles," *Dianwang Jishu/Power System Technology*, vol. 35, no. 4, p. 1 – 7, 2011.
- [73] N. Richard, L. Slutskiy, and T. Delellis, "2022 predictions for automotive, hyperscale computing, aerospace and defence systems," *Electronics World*, vol. 127, no. 2016, p. 4, 2022.
- [74] L. Hirst, *1.14 - Principles of Solar Energy Conversion*. Elsevier, 2012.
- [75] B. Quinn, "The power of sunlight," *Pollution Engineering*, vol. 39, no. 3, p. 18, 2007.
- [76] J. Bausch, "5 things to know: Solar energy technology," *Electronic Products (Garden City, New York)*, vol. 54, no. 2, 2012.
- [77] R. Rajasekaran, J. A. Thulasi, and J. A. Glenn, "Three phase solar uninterrupted power supply," in *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016*, p. 4744 – 4747, 2016.
- [78] C. H. Tsai and J.-M. Yang, "Solar power plant maintenance with thermal UAV inspection technology," *Power*, vol. 166, no. 6, p. 30 – 31, 2022.
- [79] L. Hirst, *1.12 - Principles of Solar Energy Conversion*, vol. 1. Elsevier, 2022.
- [80] R. Dev, Y. Kashyap, K. Tewari, and P. Pal, "Solar distillation and water heating systems integration with photovoltaic technology," *Energy Systems in Electrical Engineering*, vol. Part F2145, p. 139 – 165, 2024.
- [81] M. Balaji, A. Y. Begum, C. J. S. Reddy, G. Mahesh, and D. Charunya, "Comparison of efficiencies using thermal characteristics of different PV materials using ANSYS," in *2023 3rd International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies, ICAECT 2023*, 2023.
- [82] S. Kumari, A. Pandit, A. Bhende, and S. Rayalu, "Thermal management of solar panels for overall efficiency enhancement using different cooling techniques," *International Journal of Environmental Research*, vol. 16, no. 4, 2022.
- [83] F. R. A. Bukit, M. F. Al-Khairi, K. Siddiq, R. D. F. Sat, W. A. Siagian, and J. A. Simalango, "Combination of photovoltaic and thermoelectric generator (pv-teg) equipped with solar tracker based on fluid mechanics control," in *Proceedings - ELTICOM 2024: 8th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering: Tech-Driven Innovations for Global Organizational Resilience*, p. 19 – 23, 2024.

- [84] K. Dhanam Jayam and D. Susitra, “A structure of 360° solar tracking system using plc and scada,” *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 10, no. 66, p. 222 – 227, 2015.
- [85] T.-F. Wu and Y.-K. Chen, “Decoding the PWM converters,” in *Proceedings - 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, IEEE PEAC 2014*, p. 220 – 225, 2014.
- [86] M. H. Rashid, *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications*. Boston: Pearson, 4 ed., 2014.
- [87] T.-F. Wu, “Decoding and synthesizing transformerless PWM converters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 9, p. 6293 – 6304, 2016.
- [88] C. González-Castaño, C. Restrepo, F. Flores-Bahamonde, and J. Rodriguez, “A composite dc–dc converter based on the versatile buck–boost topology for electric vehicle applications,” *Sensors*, vol. 22, no. 14, 2022.
- [89] Y. Lu, H. Wu, K. Sun, and Y. Xing, “A family of isolated buck-boost converters based on semiactive rectifiers for high-output voltage applications,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 9, p. 6327 – 6340, 2016.
- [90] S. Naresh and S. Peddapati, “New family of transformer-less quadratic buck-boost converters with wide conversion ratio,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 11, 2021.
- [91] J. Asish, T. Megha, N. Laqueta, and R. Seethur, “Advancements in automotive power electronics: A novel split inductor based buck-boost converter for enhanced performance,” in *2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2024*, 2024.
- [92] F. Belhaj, Z. El Idrissi, H. E. Fadil, A. Lassioui, K. Gaouzi, M. Koundi, F. Giri, and C. E. Fakir, “Output-feedback control of interleaved buck-boost DC-DC power converter with continuous input current for fuel cell energy sources,” in *2022 IEEE 3rd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science, ICECOCS 2022*, 2022.
- [93] C. Restrepo, C. Gonzalez-Castano, and R. Giral, “The versatile buck-boost converter as power electronics building block: Changes, techniques, and applications,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 17, no. 1, p. 36 – 45, 2023.

- [94] V. S. K. Bhajana and P. Drabek, "A novel zcs non-isolated bidirectional buck-boost DC-DC converter for energy storage applications," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2015-September, p. 1224 – 1229, 2015.
- [95] M. S. Khan, S. S. Nag, A. Das, and C. Yoon, "A novel buck-boost type dc-dc converter topology for electric vehicle applications," in *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2021 - Proceedings*, p. 1534 – 1539, 2021.
- [96] Z. Cheng, Z. Li, S. Li, J. Gao, J. Si, H. S. Das, and W. Dong, "A novel cascaded control to improve stability and inertia of parallel buck-boost converters in dc microgrid," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 119, 2020.
- [97] J. Park, M.-G. Jeong, J.-G. Kang, and C. Yoo, "Solar energy-harvesting buck-boost converter with battery-charging and battery-assisted modes," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 3, p. 2163 – 2172, 2021.
- [98] K. Kanhav and M. Chaudhari, "Experimental realization of a multi-input buck-boost DC-DC converter," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 26, no. 3, p. 1453 – 1469, 2018.
- [99] R. V. Munoz, H. Renaudineau, S. Rivera, and S. Kouro, "Evaluation of DC-DC buck-boost partial power converters for EV fast charging application," in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, vol. 2021-October, 2021.
- [100] K. Suresh, E. Parimalasundar, M. Sujatha, and N. Kumar, "Design and implementation bidirectional DC-AC converter for energy storage system," *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 46, no. 2, p. 130 – 136, 2023.
- [101] H. Wen, J. Li, H. Shi, Y. Hu, and Y. Yang, "Fault diagnosis and tolerant control of dual-active-bridge converter with triple-phase shift control for bidirectional ev charging systems," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 1, p. 287 – 303, 2021.
- [102] T. S. Costa, M. de Fátima Rosolem, J. L. S. de Silva, and M. G. Villalva, "An overview of electrochemical batteries for ess applied to PV systems connected to the grid," in *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2021 - Proceedings*, p. 1392 – 1399, 2021.

- [103] S. Barakat, A. Emam, and M. Samy, “Investigating grid-connected green power systems’ energy storage solutions in the event of frequent blackouts,” *Energy Reports*, vol. 8, p. 5177 – 5191, 2022.
- [104] A. Hamidi, L. Weber, and A. Nasiri, “Ev charging station integrating renewable energy and second-life battery,” in *Proceedings of 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013*, p. 1217 – 1221, 2013.
- [105] K. L. Tharani, A. Anand, and A. Gandhar, “Performance analysis and comparison of batteries using off-grid PV system,” *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, vol. 17, no. 2, p. 23 – 28, 2020.
- [106] C. J. Jafta, “Grid scale energy storage: The alkali-ion battery systems of choice,” *Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 36, 2022.
- [107] P. Patel, “Batteries that go with the flow,” *IEEE Spectrum*, vol. 47, no. 5, p. 18, 2010.
- [108] G. Wang, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, “Integration of vanadium redox battery with PV systems: Modeling and operational characteristics,” in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, p. 1598 – 1603, 2012.
- [109] A. Tah and L. Narasamma, “Analysis and operation of primary side modulated single stage isolated hf link DC-AC converter,” in *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation, SEFET 2024*, 2024.
- [110] R. Kiran, M. S. Bhaskar, S. Padmanaban, F. Blaabjerg, P. Wheeler, and M. H. Rashid, “Unipolar single reference multicarrier sinusoidal pulse width modulation based 7-level inverter with reduced number of semiconductor switches for renewable energy applications,” in *Proceedings - 2018 IEEE 18th International Conference on Power Electronics and Motion Control, PEMC 2018*, p. 1043 – 1048, 2018.
- [111] D. Chavez and D. E. S. Y. Rosas, “Isolated single-stage dabsr DC/AC converter with series-power decoupling to interface PV with the single-phase grid,” in *Proceedings of the 2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2021*, 2021.
- [112] E. d. J. Inga Llanez and J. J. Juella Juella, “Diseño y construcción de módulos para convertidores DC-AC aplicando técnicas de control vectorial para el laboratorio de electrónica de potencia de la ups cuenca,” UPS thesis, UPS, 2013.

- [113] A. Zarate, J. C. U. Pena, and D. Sal Y Rosas, “Isolated and bidirectional two-stage DC/AC converter with grid-forming virtual inertia and high ripple on the DC bus for single-phase grid applications,” in *Proceedings of the 2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2021*, 2021.
- [114] M. Nicola and C.-I. Nicola, “Comparative performance analysis of the DC-AC converter control system based on linear robust or nonlinear PCH controllers and reinforcement learning agent,” *Sensors*, vol. 22, no. 23, 2022.
- [115] A. S. Felinto, C. B. Jacobina, E. L. L. Fabricio, and R. P. De Lacerda, “Six-leg three-phase AC-DC-AC converter with shared legs,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 5, p. 5227 – 5238, 2021.
- [116] M. Safayatullah, S. Ghosh, S. Gullu, and I. Batarseh, “Model predictive control for single-stage grid-tied three-port DC-DC-AC converter based on dual active bridge and interleaved boost topology,” in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, vol. 2021-October, 2021.
- [117] A. De Castro, G. Sutter, S. C. Huerta, and J. A. Cobos, “High resolution pulse width modulators in fpga,” in *Proceedings - 2007 3rd Southern Conference on Programmable Logic, SPL'07*, p. 137 – 142, 2007.
- [118] M. Stork, P. Weissar, and K. Kosturik, “Pulse width modulation with frequency changing,” in *ELECO 2015 - 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, p. 96 – 100, 2016.
- [119] M. Stork, “Using pulse width modulation with carrier frequency changing for transmission of two separate signals,” *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 106, no. 3, p. 535 – 542, 2021.
- [120] J. Sun, “Pulse-width modulation,” *Advances in Industrial Control*, no. 9781447128847, p. 25 – 61, 2012.
- [121] Z. B. Ibrahim, M. L. Hossain, I. B. Bugis, N. M. N. Mahadi, A. Shukri, and A. Hasim, “Simulation investigation of SPWM, THIPWM and SVPWM techniques for three phase voltage source inverter,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 4, no. 2, p. 223 – 232, 2014.
- [122] A. Iqbal, A. Lewicki, and M. Morawiec, *Pulse-width modulation of power electronic DC-AC converter*. wiley, 2021.
- [123] F. Colodro, J. M. Martínez-Heredia, J. L. Mora, and A. Torralba, “Correction of errors and harmonic distortion in pulse-width modulation of digital signals,”

AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 142, 2021.

- [124] I. Grgić, M. Bašić, D. Vukadinović, and I. Marinović, “Novel space-vector PWM schemes for enhancing efficiency and decoupled control in quasi-z-source inverters,” *Energies*, vol. 17, no. 6, 2024.
- [125] R. Pindoriya, G. Gautam, and B. Rajpurohit, “A novel application of pseudo-random based technique for acoustic noise and vibration reduction of PMSM drive,” in *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2019*, 2019.
- [126] N. Li, Y. Wang, S. Li, and Z. Wang, “Research on relations between two PWM technologies and system performance optimization,” in *Conference Proceedings - 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, IPEMC 2012*, vol. 4, p. 2333 – 2337, 2012.
- [127] P.-L. Chen, C.-Y. Lin, Y.-L. Juan, T.-C. Chen, and C.-S. Lin, “A low cost mcu based single phase sinusoidal pulse-width-modulated inverter,” *Advanced Materials Research*, vol. 1014, p. 241 – 244, 2014.
- [128] H. Hussin, A. Saparon, M. Muhamad, and M. Risin, “Sinusoidal pulse width modulation (SPWM) design and implementation by focusing on reducing harmonic content,” in *AMS2010: Asia Modelling Symposium 2010 - 4th International Conference on Mathematical Modelling and Computer Simulation*, p. 620 – 623, 2010.
- [129] B. H. Yuditya, R. N. Hasanah, L. Ardhenta, and T. Taufik, “Performance comparison of single-phase multilevel inverter with SPWM unipolar and bipolar switching techniques,” in *Proceeding - 1st FORTEI-International Conference on Electrical Engineering, FORTEI-ICEE 2020*, p. 102 – 107, 2020.
- [130] M. H. Rashid, *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications*, ch. 6, pp. 309–312. Boston: Pearson, 4 ed., 2014. Sección 6.6.2: Modulación por ancho de pulso senoidal.
- [131] A. Brahmi, A. Abounada, Z. Massaq, and A. El Amrani, “Control circuit based microcontroller implementing a new sinusoidal pulse with modulation technique for solar inverter,” in *Proceedings of the 1st International Conference of Computer Science and Renewable Energies, ICCSRE 2018*, p. 271 – 276, 2018.

- [132] D. Ambhore, V. B. Borghate, S. K. Maddugari, N. Soni, and S. Sabyasachi, "Hybrid SPWM techniques for five level cascaded h-bridge inverter," in *India International Conference on Power Electronics, IICPE*, vol. 2018-December, 2018.
- [133] F. Lin, K. Li, and Y. Liu, "A design and implementation of edge controller for SPWM waves," in *2011 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2011*, p. 764 – 767, 2011. Cited by: 1.
- [134] N. I. Raju, M. S. Islam, and A. A. Uddin, "Sinusoidal pwm signal generation technique for three phase voltage source inverter with analog circuit & simulation of pwm inverter for standalone load & micro-grid system," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 3, no. 3, p. 647 – 658, 2013.
- [135] H. Aboub, R. Mechouma, B. Azoui, C. Labiod, and A. Khechekhouche, "A new multicarrier sinusoidal pulse width modulation (SPWM) strategy based on rooted tree optimization (RTO) algorithm for reducing total harmonic distortion (THD) of switched-capacitor nine-level inverter in grid-connected PV systems," *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 1, p. 19 – 36, 2022.
- [136] W. R. Sultana, S. K. Sahoo, S. P. Karthikeyan, P. V. Reddy, G. T. R. Reddy, K. S. Kiran, and I. J. Raglend, "Comparative analysis of model predictive control and PWM control techniques for VSI," in *2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies, ICCICT 2014*, p. 1495 – 1499, 2014.
- [137] K. Georgakas and A. Safacas, "Modified sinusoidal pulse-width modulation operation technique of an AC-AC single-phase converter to optimise the power factor," *IET Power Electronics*, vol. 3, no. 3, p. 454 – 464, 2010.
- [138] K. C. Sri Kavya, S. K. Kotamraju, N. Supriya Adhanki, R. S. Chakka, and N. P. K. Chinnam, "Unlocking the phase locked loop for radar applications," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 9, no. 22, p. 13953 – 13970, 2014.
- [139] H. Sefraoui, K. Salmi, and A. Ziyat, "Basic concepts of a phase-locked loop control system," *International journal of online and biomedical engineering*, vol. 18, no. 13, p. 25 – 37, 2022.
- [140] L. Gupta, T. Sharma, and B. Saranga, "Ring oscillators based all digital phase locked loop: A comparative study," in *Proceedings - IEEE International Con-*

ference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies, DICCT 2023, p. 238 – 242, 2023.

- [141] S. Golestan, A. Akhavan, J. M. Guerrero, A. M. Abusorrah, M. J. Rawa, and J. C. Vasquez, “In-loop filters and prefilters in phase-locked loop systems: Equivalent or different solutions?,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 16, no. 3, p. 23 – 35, 2022.
- [142] Z.-Q. Zhang, P. Wang, X.-D. Yu, Y.-M. Zhou, and T. Li, “Design and research of phase-locked loop for infrared laser ranging system,” in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 11439, 2020.
- [143] K. B. Prasad, K. V. K. Reddy, G. V. S. M. Kireety, R. Hemanth, Y. Nir-mala, G. Pavithra, and T. Manjunath, “Design & development of an efficient phase locked loop (PLL) system for frequency synthesis,” in *15th International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, ACT 2024*, vol. 2, p. 6724 – 6730, 2024.
- [144] A. Singhal, C. Madhu, and V. Kumar, “Designs of all digital phase locked loop,” in *2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences, RA ECS 2014*, 2014.
- [145] F. Shahni, W. Yu, and B. Young, “Monitoring and diagnosis of PI controllers,” in *2015 Australian Control Conference, AUCC 2015*, p. 1 – 5, 2015.
- [146] S. Anitha Janet Mary, L. Padma Suresh, R. V. Mathew, and N. Albertsingh, “Comparative study of PI and PID controller for non linear MIMO system,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 326, p. 1585 – 1592, 2015.
- [147] D. Ibrahim, “Using simulation to tune PID controllers,” *Electronics World*, vol. 128, no. 2024, p. 40 – 43, 2023.
- [148] S. Kumar and M. Ajmeri, “Enhanced design of PI controller with lead-lag filter for unstable and integrating plus time delay processes,” *Chemical Product and Process Modeling*, vol. 18, no. 5, p. 793 – 809, 2023.
- [149] D. Zakaria, M. H. Muttaqin, A. G. Abdullah, N. Amelia, and W. Arasid, “Low cost PID temperature control training board,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2646, 2023.
- [150] V. C and E. C, “Cuckoo search optimization based PI controller tuning for hopper tank system,” *Concurrent Engineering Research and Applications*, vol. 30, no. 3, p. 300 – 308, 2022.

- [151] H. Seki, "Self-tuning IMC-PI controllers for chemical process applications," in *2016 IEEE Conference on Control Applications, CCA 2016*, p. 1179 – 1184, 2016.
- [152] M. Kizilcay and H. Hoidalén, *EMTP-ATP*. Institution of Engineering and Technology, 2015.
- [153] S. Su, X. Zeng, and D. Mu, "Automated electromagnetic transient simulation using ATP," *Dianli Zidonghua Shebei / Electric Power Automation Equipment*, vol. 29, no. 2, p. 145 – 148, 2009.
- [154] S. Robson, A. Haddad, and H. Griffiths, "Implementation of the prime and G3-PLC physical layers in the EMTP-ATP," in *Proceedings - 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2018*, 2018.
- [155] E. Haginomori, T. Koshiduka, J. Arai, and H. Ikeda, *Power system transient analysis: Theory and practice using simulation programs (AT P-EMTP)*. Wiley, 2016.
- [156] T. Chatterjee and A. Mukherjee, "Study of lightning overvoltage transients using ATP," in *IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2015*, 2015.
- [157] T. A. Papadopoulos, G. K. Papagiannis, and P. S. Dokopoulos, "Low-voltage distribution line performance evaluation for PLC signal transmission," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, p. 1903 – 1910, 2008.
- [158] B. Yong and V. Ramachandaramurthy, "Harmonic mitigation of grid connected 5mw solar PV using LCL filter," in *IET Seminar Digest*, vol. 2014, Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [159] K.-J. Lee, N.-J. Park, R.-Y. Kim, D.-H. Ha, and D.-S. Hyun, "Design of an LCL filter employing a symmetric geometry and its control in grid-connected inverter applications," in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, p. 963 – 966, 2008.
- [160] K. M. El-Naggar, "A dynamic filter for removal DC - offset in current and voltage waveforms," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 50, p. 384 – 388, 2011.
- [161] "Ieee standard for harmonic control in electric power systems," *IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2014)*, pp. 1–31, 2022.

- [162] “IEEE Application Guide for IEEE Std 1547™-2018, IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces,” *IEEE Std 1547.2-2023 (Revision of IEEE Std 1547.2-2008)*, pp. 1–291, 2024.
- [163] M. Ireshika and P. Kepplinger, “IEC 61851 compliant demand side management algorithm for electric vehicle charging: a MILP based decentralized approach,” in *13th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2022)*, vol. 2022, pp. 146–152, 2022.
- [164] “IEEE Recommended Practice for Qualification of Photovoltaic (PV) Modules,” *IEEE Std 1262-1995*, pp. 1–32, 1996.
- [165] “IEEE Standard for Technical Specifications of a DC Quick and Bidirectional Charger for use with Electric Vehicles - Redline,” *IEEE Std 2030.1.1-2021 (Revision of IEEE Std 2030.1.1-2015) - Redline*, pp. 1–263, 2022.

Áreas del Trabajo de Grado (ABET)

Tabla 1: Áreas del Trabajo de Grado

Título del Trabajo:			
Restricciones múltiples (dos o más)	Accesibilidad		Estética
	Códigos		Construtibilidad
	Costos	■	Ergonomía
	Extensibilidad		Funcionalidad
	Interoperabilidad	■	Consideraciones Legales
	Mantenibilidad		Manufacturabilidad
	Mercadeo		Política
	Regulaciones	■	Cronogramas
	Normativas	■	Sostenibilidad
	Impacto Ambiental	■	Impacto Social
	Usabilidad		Otros:
Normas relevantes (dos o más)	IEEE Std 1547-2018	IEEE Std 1262-1995	IEEE Std 2030.1.-2021
Elementos del proceso	Identificación de oportunidades	■	Generación de soluciones múltiples
	Desarrollo de requerimientos	■	Evaluación de soluciones
	Procesos iterativos		Consideración de riesgos
	Realizar compromisos o tratos		
Basado en trabajos anteriores	Protecciones		Iluminación
	Optimización de sistemas		Alta Tensión
	Energías alternativas	■	Distribución
	Máquinas eléctricas		Otros temas

SO2

Aspectos relacionados con Salud Pública y Medio Ambiente:

Al utilizar energía fotovoltaica como fuente principal de alimentación en este proyecto de titulación, se contribuye directamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno, que están asociados con el uso intensivo de combustibles fósiles. La sustitución de estas fuentes por energía solar, además de disminuir la contaminación atmosférica a nivel local y global, también tiene un impacto positivo en la calidad del aire y en la salud respiratoria de la población, especialmente en áreas urbanas. Además, la implementación de vehículos eléctricos alimentados por sistemas de generación solar elimina las emisiones locales producidas por motores de combustión interna, reduciendo significativamente la presencia de contaminantes como compuestos orgánicos volátiles, que están relacionados con enfermedades cardiovasculares, pulmonares y diversas afecciones crónicas. Desde la perspectiva del uso del suelo y la conservación ambiental, los sistemas fotovoltaicos pueden instalarse en superficies ya intervenidas, como techos de edificios, cubiertas de estacionamientos o zonas urbanizadas. Esto ayuda a evitar la deforestación, la fragmentación del hábitat natural y la alteración de ecosistemas, reforzando así la sostenibilidad del proyecto. El diseño desarrollado incluye medidas de seguridad eléctrica para garantizar la protección de las personas durante la operación de los cargadores. Se consideran criterios de protección contra sobretensiones, fallas a tierra y un adecuado aislamiento, de acuerdo con normativas internacionales como IEC 60364, IEEE 1547 y NEC 625. Esto reduce los riesgos de electrocución, incendios y fallas operativas que podrían afectar a usuarios, técnicos o infraestructura adyacente. Es importante destacar que este proyecto está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 3 "Salud y Bienestar" y el ODS 13 "Acción por el Clima", ya que promueve el uso de tecnologías limpias y energías renovables, fundamentales para garantizar un entorno saludable. Sin embargo, también deben considerarse algunos aspectos negativos. La producción y disposición final de paneles solares y baterías para vehículos eléctricos puede generar residuos peligrosos si no se gestiona adecuadamente, incluyendo metales pesados como plomo, litio o cadmio. Además, los procesos de manufactura pueden implicar emisiones contaminantes y un uso intensivo de recursos naturales, especialmente en países con baja regulación ambiental. En zonas rurales o biodiversas, la expansión sin planificación de sistemas fotovoltaicos podría alterar dinámicas ecológicas o provocar conflictos en el uso del suelo si no se aplica una evaluación de impacto ambiental adecuada.

Aspectos relacionados con Seguridad de Personas y Bienes:

El proyecto prioriza la seguridad de las personas y la protección de los bienes asociados al sistema de carga para vehículos eléctricos alimentados por energía fotovoltaica. El diseño incluye dispositivos de protección contra sobretensiones y un aislamiento eléctrico adecuado, con el objetivo de mitigar los riesgos de electrocución, cortocircuitos, sobrecalentamientos o fallos eléctricos que puedan poner en peligro tanto a los usuarios como al entorno. Se han considerado las normas técnicas pertinentes, como la IEC 61851 y NEC 625, así como las regulaciones nacionales vigentes, asegurando que el sistema cumpla con los estándares internacionales de seguridad eléctrica. Además, se contempla la interacción segura entre el sistema fotovoltaico, el cargador y la red eléctrica, evitando retroalimentaciones peligrosas o daños a la infraestructura. De este modo, el proyecto se alinea con las mejores prácticas de ingeniería, priorizando la integridad física de los usuarios y la conservación de los equipos involucrados. No obstante, también es fundamental considerar los riesgos potenciales. La incorrecta instalación o mantenimiento de sistemas fotovoltaicos y cargadores podría provocar fallos eléctricos, incendios o accidentes por manipulación indebida, especialmente en contextos donde no se cuenta con personal capacitado o normativas técnicas estrictas. Además, los sistemas conectados a la red podrían representar un riesgo de retroalimentación peligrosa si fallan los dispositivos de protección, afectando a técnicos de mantenimiento de la red o a otros usuarios conectados.

Aspectos relacionados con el bienestar de la población:

Este proyecto reconoce que la implementación de sistemas de carga para vehículos eléctricos alimentados por energía solar fotovoltaica contribuye de manera significativa al bienestar de la población. Al promover la movilidad eléctrica sostenible, se reducen los niveles de contaminación atmosférica y acústica, lo que mejora la calidad del aire y disminuye los riesgos de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. Además, la integración de fuentes renovables como la energía solar facilita una transición energética más limpia, resiliente y equitativa. Existe un potencial para generar impactos positivos en los ámbitos social y económico, al fomentar el desarrollo de infraestructura energética moderna y la creación de empleos técnicos relacionados con la instalación, operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos y estaciones de carga. Por lo tanto, este proyecto no solo aborda una necesidad tecnológica, sino que también representa una oportunidad concreta para mejorar las condiciones de vida de la población y avanzar hacia un modelo de desarrollo más sostenible. Sin embargo, hay que reconocer que los beneficios no siempre se distribuyen equitativamente. La

localización de estaciones de carga puede privilegiar zonas urbanas con mayor infraestructura, dejando de lado comunidades periféricas o rurales. Además, si no se desarrollan políticas inclusivas, la movilidad eléctrica podría convertirse en un privilegio para ciertos sectores económicos, generando una percepción de exclusión social. Esto puede generar resistencia o apatía hacia la tecnología, especialmente si no se visibilizan los beneficios comunitarios de forma clara.

Factores Globales:

El proyecto presentado se inscribe en una tendencia global hacia la descarbonización del sector transporte y la adopción de energías renovables como pilares fundamentales para combatir el cambio climático. Organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energía, la Organización de las Naciones Unidas y diversos gobiernos han establecido metas concretas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, donde la electromovilidad y el uso de energía solar juegan un papel crucial. El diseño de cargadores para vehículos eléctricos alimentados por sistemas fotovoltaicos refleja esta visión global, respondiendo directamente a los compromisos adquiridos en acuerdos multilaterales como el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 13 Acción por el clima y el ODS 7 Energía Asequible y No Contaminante, así como la promoción de tecnologías limpias en el contexto de la transición energética mundial. Este proyecto reconoce que los desafíos ambientales, energéticos y de movilidad trascienden fronteras, por lo que las soluciones deben alinearse con estándares y lineamientos internacionales en materia de eficiencia energética, sostenibilidad e innovación tecnológica. De este modo, la propuesta no solo aborda una necesidad local, sino que también contribuye a un esfuerzo global para transformar el sistema energético y de transporte hacia un modelo más responsable, equitativo y ambientalmente viable. Aun así, es necesario mencionar ciertas tensiones que acompañan estas transformaciones globales. La dependencia de materias primas críticas como el litio y el cobalto para la producción de baterías puede generar conflictos geopolíticos, impactos ambientales en países proveedores y desigualdad en el acceso a recursos estratégicos. Además, la presión por cumplir metas internacionales podría inducir a políticas locales poco realistas o mal implementadas si no se consideran las capacidades económicas y técnicas de cada región.

Factores Culturales:

Aunque el presente proyecto tiene un enfoque principalmente técnico, se reconoce que los factores culturales juegan un papel crucial en la adopción, uso y sostenibilidad de tecnologías como la movilidad eléctrica y la generación distribuida a partir de

energía solar. La cultura tecnológica de la población, sus hábitos de transporte, el nivel de conciencia ambiental y la disposición hacia el uso de energías renovables son elementos clave que pueden facilitar o limitar la implementación de estas soluciones. Un aspecto cultural relevante para considerar es la percepción de los altos costos asociados tanto a los vehículos eléctricos como a los sistemas fotovoltaicos y de carga. Esta percepción puede crear una barrera cultural que dificulte su adopción, especialmente en comunidades donde el acceso a tecnologías limpias aún no es generalizado o se considera exclusivo de ciertos sectores económicos. Por lo tanto, el proyecto reconoce que la transición energética también requiere un cambio cultural que promueva el valor a largo plazo de las energías renovables y fomente su integración en un estilo de vida más sostenible. En este contexto, se considera que la aceptación social de los cargadores para vehículos eléctricos alimentados por sistemas fotovoltaicos depende de la infraestructura adecuada, y también de un proceso de educación, difusión y cambio cultural que permita a la comunidad comprender los beneficios ambientales, económicos y de salud asociados con esta transición. Además, se ha contemplado un diseño centrado en el usuario que facilite su comprensión y uso, priorizando la accesibilidad y la simplicidad en la interacción con el sistema. Aunque este aspecto no forma parte del núcleo técnico del diseño eléctrico y energético, su consideración es vital para garantizar la viabilidad práctica del proyecto, especialmente en contextos donde la cultura tecnológica aún está en desarrollo. Por lo tanto, se reconoce que el éxito de la propuesta no depende únicamente de sus características técnicas, sino también de su integración con las dinámicas culturales de la comunidad en la que se implementará. No obstante, la transformación cultural necesaria para adoptar tecnologías limpias enfrenta diversos obstáculos. La desconfianza hacia nuevas tecnologías, la falta de formación técnica y la resistencia al cambio pueden dificultar la implementación, especialmente en comunidades con baja exposición a innovaciones. Además, la transición hacia la movilidad eléctrica podría percibirse como una imposición externa si no se acompaña de un proceso participativo y de apropiación local, debilitando su aceptación social y sostenibilidad en el tiempo.

Factores Sociales:

El proyecto reconoce que la implementación de sistemas de carga para vehículos eléctricos basados en energía fotovoltaica tiene una importante dimensión social, especialmente en lo que respecta a la accesibilidad, equidad y aceptación de las tecnologías limpias. Aunque estas soluciones representan un avance hacia un modelo energético y de transporte más sostenible, su adopción sigue siendo limitada a ciertos sectores de la sociedad debido a los altos costos iniciales de los vehículos eléctricos, los sistemas fotovoltaicos y la infraestructura de carga. Esta situación puede crear una brecha social entre quienes tienen acceso a estas tecnologías y quienes no,

perpetuando desigualdades económicas y tecnológicas. Por ello, el proyecto enfatiza la necesidad de desarrollar modelos de implementación adaptables a diversos contextos socioeconómicos, como estaciones de carga comunitarias, sistemas de uso compartido o esquemas de financiamiento público-privado. Se reconoce que el éxito de la transición energética no solo depende de la disponibilidad de tecnología, sino también del nivel de aceptación y apropiación social de las soluciones propuestas. Esto implica promover la participación de la comunidad, educar sobre los beneficios de la movilidad eléctrica y desarrollar políticas que incluyan a todos los grupos sociales en el proceso de transformación energética. Por lo tanto, aunque el enfoque del proyecto es principalmente técnico, se incorpora una reflexión sobre su impacto social potencial y se subraya la importancia de que las futuras implementaciones contemplen estrategias para democratizar el acceso a las tecnologías limpias, contribuyendo así al desarrollo sostenible y a la inclusión social. Sin embargo, existen riesgos asociados a una implementación desigual. Si los proyectos no son diseñados con enfoque inclusivo, podrían profundizar las brechas de acceso a la energía limpia entre sectores urbanos privilegiados y zonas rurales o marginalizadas. La falta de políticas de subsidio o financiamiento puede dejar a los sectores de menores ingresos fuera de los beneficios de la transición energética, perpetuando una brecha tecnológica. Además, los cambios en la infraestructura urbana para habilitar estaciones de carga podrían desplazar informalidades o causar tensiones sociales si no se gestiona de forma participativa.

Factores ambientales:

El presente proyecto incluye un análisis exhaustivo de las repercusiones ambientales derivadas del diseño e implementación de cargadores para vehículos eléctricos alimentados por sistemas fotovoltaicos. En términos positivos, esta propuesta contribuye de manera significativa a la reducción de emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero (GEI) al reemplazar la generación de energía eléctrica convencional basada en combustibles fósiles por energía solar renovable y limpia. Esto no solo ayuda a mitigar el cambio climático, sino que también mejora la calidad del aire en áreas urbanas y periurbanas. Al fomentar la movilidad eléctrica, el proyecto reduce la contaminación acústica, creando ambientes más saludables y agradables para la población. Desde la perspectiva de la gestión del suelo, la instalación de paneles solares en espacios ya intervenidos minimiza el impacto sobre los ecosistemas naturales y evita la fragmentación del hábitat. Sin embargo, es crucial reconocer la necesidad de evaluar y mitigar los posibles impactos ambientales negativos asociados con la fabricación, transporte y disposición final de los componentes fotovoltaicos y de los vehículos eléctricos. Aunque estas etapas escapan al alcance directo del proyecto, la gestión responsable de residuos, el reciclaje de baterías y materiales, así como la

selección de proveedores que adopten prácticas sostenibles, son consideraciones importantes para las fases futuras de implementación. En resumen, el proyecto ofrece un balance ambiental netamente positivo, alineado con los principios de sostenibilidad y protección del medio ambiente, y contribuye a los objetivos nacionales e internacionales para la conservación del planeta. Sin embargo, deben reconocerse los impactos ambientales indirectos y acumulativos. La fabricación de paneles solares, baterías y equipos electrónicos implica procesos industriales con huella de carbono significativa, especialmente si se produce con energía no renovable. Asimismo, la vida útil limitada de las baterías y módulos solares genera preocupaciones respecto al manejo adecuado de residuos, reciclaje y economía circular. Si no se implementan sistemas de recolección y tratamiento adecuados, existe el riesgo de que estos residuos terminen contaminando suelos o cuerpos de agua.

Factores Económicos:

El proyecto incluye una evaluación preliminar de los factores económicos asociados con la posible implementación del diseño de cargadores para vehículos eléctricos alimentados por sistemas fotovoltaicos. Aunque la inversión inicial en tecnologías renovables y vehículos eléctricos puede ser considerablemente mayor que la de los sistemas convencionales, esta inversión se traduce en ahorros significativos a mediano y largo plazo, gracias a la reducción en el consumo de combustibles fósiles y a los menores costos operativos. La implementación de estos sistemas impulsa la generación de empleo local, especialmente en áreas como la instalación, operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos y estaciones de carga. Este dinamismo económico puede estimular la creación de nuevos emprendimientos y negocios relacionados con la movilidad eléctrica y la energía solar, favoreciendo el desarrollo de sectores tecnológicos emergentes. Este proyecto también contribuye a diversificar la matriz energética y fortalecer una economía sostenible, alineándose con políticas nacionales que promueven el desarrollo de energías limpias y la innovación tecnológica. La escalabilidad del diseño permite su adaptación a diferentes contextos y escalas, facilitando su implementación tanto en zonas urbanas como rurales. Existen por otra parte desafíos económicos en la etapa inicial, el proyecto ofrece una visión integral que considera tanto los beneficios financieros como las oportunidades de desarrollo económico y generación de empleo, aspectos fundamentales para su viabilidad y éxito a largo plazo. Sin embargo, la sostenibilidad económica del proyecto enfrenta algunas limitaciones. El alto costo inicial de los sistemas fotovoltaicos y de los vehículos eléctricos puede ser una barrera importante para su adopción masiva, especialmente en países en desarrollo. Si no se cuenta con incentivos fiscales, subsidios o esquemas de financiamiento adecuados, la inversión puede ser inaccesible para la mayoría de la población. Además, los cambios tecnológicos acelerados pueden volver obsoletos

ciertos equipos en poco tiempo, afectando la rentabilidad del proyecto y la confianza del usuario.