



# EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo  
Tecnológico

## Tesis de Maestría

Evaluación de inversores sin transformador para  
satisfacer la demanda de un aire acondicionado  
conectado a la red eléctrica

presentada por  
**Ing. Fausto Lorenzo Arellano**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica**

Director de tesis  
**Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich**

Co-Directora de tesis  
**Dra. Susana Estefany de León Aldaco**

Cuernavaca, Morelos, México. Septiembre de 2023.



Cuernavaca, Mor.,

**31/agosto/2023**

No. de Oficio:

**DIE/064/2023**

Asunto:

**Aceptación de documentos de tesis**

**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Ing. Lorenzo Arellano Fausto**, con número de control **M21CE082** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Evaluación de Inversores sin Transformador para Satisfacer la Demanda de un Aire Acondicionado Conectado a la Red Eléctrica" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 4033213

CODIRECTORA DE TESIS

Dra. Susana Estefany De León Aldaco  
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 10458245

REVISOR 1

Dr. Jesús Darío Mina Antonio  
Doctor en Ingeniería  
Cédula profesional 6094069

REVISOR 2

Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 9526506

Cp. M.T.I. María Elena Gómez Torres, Jefa del Departamento de Servicios Escolares -  
Estudiante  
JGM/kmqh

Cuernavaca, Mor.,  
No. De Oficio:  
Asunto:

04/septiembre/2023  
SAC/145/2023  
Autorización de  
impresión de tesis

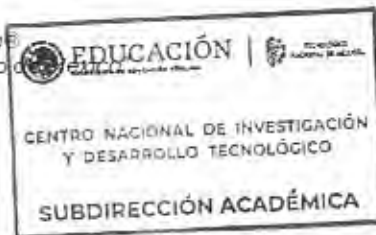
**LORENZO ARELLANO FAUSTO  
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Evaluación de Inversores sin Transformador para Satisfacer la Demanda de un Aire Acondicionado Conectado a la Red Eléctrica"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica  
"Conocimiento y tecnología al servicio"

**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ingeniería Electrónica  
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/LMZ

## ***Dedicatoria***

---

Quiero dedicar este logro a mis padres, Fausto Lorenzo y Nancy Arellano, por ser los pilares fundamentales en mi vida. Gracias por su cariño, amor, comprensión, espero que sigan conmigo por un largo tiempo.

A mis hermanos Flor Nayely, Gisel, Víctor Manuel y Eduardo Lorenzo, por estar conmigo en todo momento. Gracias por su apoyo y comprensión, por compartir gran parte de mi preparación académica.

A mi familia y sus futuras generaciones, espero un día puedan leer esto y comprendan que las metas se cumplen, es para y/o por ellos.

# ***Agradecimientos***

---

Antes de todo, quiero agradecer a Dios por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte en los momentos difíciles.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por brindarme la oportunidad de cursar un posgrado en sus instalaciones.

De igual manera, agradezco al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por proveer los recursos necesarios, las instalaciones y permitirme dedicarme a este proyecto. A todo el personal docente, administrativo y auxiliar por brindarme los medios necesarios y facilidades para mi formación académica.

Mención especial al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por proporcionar el financiamiento para llevar a cabo y finalizar este proyecto.

A mi director el Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich, por brindarme su apoyo, consejo, paciencia y por aportar sus conocimientos que sirvieron como guía para realizar este trabajo de investigación. Recuerdo muy bien una famosa frase atribuida a Napoleón citada por él, la cual es “vísteme despacio que tengo prisa”.

A mi co-directora la Dra. Susana Estefany De León Aldaco, por su colaboración, asesoría y comentarios acertados durante mi preparación académica, así como la publicación de mi producto académico.

A los miembros del comité de revisión de este trabajo de tesis, el Dr. Jesus Darío Mina Antonio y al Dr. Rodolfo Vargas Méndez, por sus comentarios y sugerencias que contribuyeron a enriquecer el proyecto.

A mis compañeros de aula y área de estudio (generación agosto 2021 – agosto 2023): Roberto Carlo Alvarado, Juan Gerardo Flores, Gregorio Saúl Olivar e Ireti Ticatame Rojas, por compartir junto a ellos experiencia, por su apoyo y palabras de aliento, por las complicaciones, por los chistes, por las risas, por los momentos compartidos en pantalla y salón de clase. Muchas gracias, por momentos agradables en mi estancia en CENIDET, solo quiero que nuestro compañerismo y amistad no se disuelva.

A todos aquellas personas que hicieron agradable mi estancia dentro y fuera de CENIDET, en especial a mis amigos Oscar Sánchez, Alberto Martínez, Alejandro Pineda, Elias Ramos, Donaciano Flores, Bernardino Rosales, Isay Obet Huicochea y Karen Mónica Hernández, por compartir tempo en la cafetería.

Al servicio de cafetería, por proporcionar los nutrientes necesario para el día a día.

A mi mejor amigo Jonathan Arenas Robles, por compartir muchos momentos a mi lado, por ser parte de mi familia y yo de la suya, por cambiar mi forma de pensar, pero “los colores tienen género”, por los montos de relajación y/o distracción (satseif), por animarme a pisar mi primer gimnasio y conocer más amigos. A pesar del tiempo y la distancia seguimos siendo buenos amigos, gracias por tus llamados, por los consejos, por las palabras de aliento y sobre todo por el inmenso cariño que me has brindado.

A mis amigos de gimnasio David Miranda, Dulce María Diaz, a sus lindos hijos, David Antuan y Darlin Azmara Miranda y a Darién Jesús Naranjo, por su amistad, por las tarde de entrenamiento y sufrimiento, por los momentos de risas y gritos, por sus consejos, por su buena asesoría, muchas gracias.

A mis padres, Fausto Lorenzo y Nancy Arellano, por su apoyo, motivación y comprensión, sin condiciones ni medidas.

A mis hermanos, Flor Nayely, Gisel, Víctor Manuel y Eduardo Lorenzo, por siempre estar conmigo. Del mismo modo a todo mi familia, ¡familia es familia!

A mis amigos y antiguos profesores, el Dr. José Luis Valenzuela Lagarda y la Dra. Ana Rosa Garcia Angelmo, por ser parte de formación académica desde la licenciatura y a hora en la maestría, por darme un lugar en su casa, son mis padres académicos o más que eso, los quiero mucho.

A mis amigos, Amado Garcia, Ana Maria Vega, y sus hermosos hijos Maria Jose y Dante Santiago Garcia, por su gran amistad, por compartir los fines de semana conmigo, por ser una familia para mí, por su apoyo, siempre estaré en deuda.

Por último y no menos importantes a mi amigo Víctor Manuel Riveras, por ser mi amigo desde la licenciatura, por ser mi compañero de laboratorio, a pesar de la distancia, encontramos tiempo para pasar algunos momentos de compañerismo, por sus mensajes y gran amistad.

# Índice

---

Índice de figuras .....	9
Índice de tablas.....	12
Acrónimos.....	13
Resumen .....	15
Abstract .....	16
Capítulo 1 Introducción.....	17
1.1 La necesidad de comodidad térmica.....	17
1.2 Aparatos de aire acondicionado como solución a la comodidad térmica.....	19
1.3 Tipos de aparatos de aire acondicionado.....	21
1.4 Consumo eléctrico por aire acondicionado.....	23
1.5 Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.....	24
1.6 Planteamiento del problema.....	26
1.7 Propuesta de solución.....	27
1.8 Objetivos.....	28
1.8.1 Objetivo general.....	28
1.8.2 Objetivos específicos.....	28
1.9 Alcances .....	29
1.10 Metas.....	29
1.11 Justificación .....	30
Capítulo 2 Marco teórico.....	32
2.1 Tarifas eléctricas.....	32
2.2 Origen de la corriente de fuga.....	34



2.3 Inversores conectados a la red eléctrica .....	35
2.3.1 Inversores con transformador .....	37
2.3.2 Corrientes de fuga en SFV sin transformador conectados a la red eléctrica .....	38
2.3.3 Corriente de fuga permitida por las normas .....	39
2.4 Inversores sin transformador, con supresión de corrientes de fuga .....	40
2.5 Contenido armónico .....	40
2.5.1 Contenido armónico permitido por las normas .....	41
2.5.2 Filtro de salida del inversor .....	41
Capítulo 3 Estado del arte .....	43
3.1 Introducción del estado del arte .....	43
3.2 Inversores sin transformador.....	44
3.3 Filtro en inversores sin transformador .....	46
3.4 Técnicas de modulación para inversores sin transformador.....	47
3.5 Conclusión del estado del arte .....	47
3.5.1 Topología H5 .....	48
3.5.2 Topología HERIC.....	49
3.5.3 Topología H6_II .....	50
Capítulo 4 Diseño y Desarrollo .....	51
4.1 Tensión en el bus de CD.....	51
4.2 Característica del módulo fotovoltaico.....	52
4.3 Gráficas del módulo fotovoltaico .....	52
4.4 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el aire acondicionado de 1 TR.....	53
4.5 Inversores sin transformador H5, HERIC y H6_II .....	55
4.5.1 H5.....	55
4.5.2 HERIC .....	60

4.5.3 H6_II .....	66
4.6 Cálculo del filtro LCL .....	70
Capítulo 5 Resultados y conclusiones .....	75
5.1 Resultados .....	75
5.1.1 Inversor H5 .....	76
5.1.2 Inversor HERIC .....	80
5.1.3 Inversor H6_II .....	84
5.2 Comparación de resultados .....	88
5.3 Conclusiones y recomendaciones .....	91
6 Referencias .....	93

# Índice de figuras

Figura 1. Curva de adopción de aire acondicionado en México [4] .....	20
Figura 2. Porcentaje de uso de aparatos de aire acondicionado [5] .....	21
Figura 3. Aire acondicionado Elite Serie A High Wall Inverter [6] .....	23
Figura 4. (a) Estructura básica de un sistema fotovoltaico autónomo, y (b) conectado a la red eléctrica .....	25
Figura 5. Representación esquemática del inversor en un SFV .....	25
Figura 6. Radiación solar en México [14] .....	31
Figura 7. Capacitancia parásita del módulo fotovoltaico .....	35
Figura 8. Clasificación de inversores con transformador y sin transformador .....	36
Figura 9. Sistema fotovoltaico conectado a red eléctrica con transformador .....	37
Figura 10. Sistema fotovoltaico monofásico con convertidor Push-Pull [17] .....	38
Figura 11. Ruta de la corriente de fuga en un sistema fotovoltaico [16] .....	39
Figura 12. Topología del inversor HERIC en simulador PSIM [28] .....	44
Figura 13. Topología del inversor H5 con convertidor Boost [29] .....	44
Figura 14. Topología del inversor H6 [32] .....	45
Figura 15. Corriente de fuga y voltaje de la capacitancia del SFV con el inversor HERIC [35] .....	47
Figura 16. Topología H5 [30] .....	49
Figura 17. Topología HERIC .....	49
Figura 18. Topología H6_II [39] .....	50
Figura 19. (a) Curva V-I del módulo fotovoltaico      (b) Curva de potencia del módulo fotovoltaico .....	53
Figura 20. Inversor sin transformador H5 .....	56
Figura 21. Tensión $V_{inv}$ en H5 con S5, S1 y S4 encendidos .....	57
Figura 22. Tensión 0 en H5 con S5 y S4 apagados, S1 y $D_3$ encendidos .....	58
Figura 23. Tensión $-V_{inv}$ en H5 con S5, S2 y S3 encendidos .....	58
Figura 24. Tensión 0 en H5 con S5 y S2 apagados, $D_1$ y S3 encendidos .....	59
Figura 25. Circuito eléctrico de H5 en Matlab/Simulink .....	59

<i>Figura 26. Modulación SPWM bipolar para la topología H5 .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 27. Inversor sin transformador HERIC .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 28. Tensión <math>V_{inv}</math> en HERIC con S1, S4 y S6 encendidos. S1 y S4 conmutan a alta frecuencia y S6 conmuta a frecuencia de línea.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 29. Tensión 0 en HERIC con S1 y S4 apagados, S6 y <math>D_5</math> encendidos.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 30. Tensión <math>-V_{inv}</math> en HERIC con S2, S3 y S5 encendidos S2 y S3 conmutan a alta frecuencia y S5 conmuta a frecuencia de línea.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 31. Tensión 0 en HERIC con S2 y S3 apagados, S5 y <math>D_6</math> encendidos.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 32. Circuito eléctrico del SFV con inversor HERIC en Matlab/Simulink.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 33. Modulación SPWM para la activación de los interruptores del inversor HERIC... </i>	<i>65</i>
<i>Figura 34. Inversor sin transformador H6_II.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 35. Tensión <math>V_{inv}</math> en H6_II con S1, S5 y S4 encendidos. S1 y S4 conmutan a alta frecuencia y S5 conmuta a frecuencia de línea.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 36. Tensión 0 en H6_II con S1 y S4 apagados, S5 y <math>D_7</math> encendidos .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 37. Tensión <math>-V_{inv}</math> en H6_II con S3, S6 y S2 encendidos. S2 y S3 conmutan a alta frecuencia y S6 conmuta a frecuencia de línea.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 38. Tensión 0 en H6_II con S2 y S3 apagados, S6 y <math>D_8</math> encendidos .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 39. Circuito eléctrico del inversor H6_II en la plataforma Matlab/Simulink.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 40. Modulación de los interruptores en el inversor H6_II.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 41. Circuito del filtro .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 42. Estados de conmutación del inversor H5 .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 43. Tensión a la salida del inversor sin filtrar .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 44. Comparación de la señal a la salida del inversor (<math>V_{H5}</math>) y red eléctrica (<math>V_{CA}</math>) ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 45. Contenido armónico del inversor H5 .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 46. Potencia eléctrica en inversor H5.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 47. Corriente circulada por el aire acondicionado .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 48. Corriente de fuga con capacitancia de 50nF.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 49. Estados de conmutación del inversor HERIC.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 50. Tensión en el bus CD del inversor HERIC .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 51. Señal a la salida del filtro LCL del inversor HERIC.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 52. Contenido armónico del inversor HERIC.....</i>	<i>82</i>

<i>Figura 53. Potencia eléctrica en inversor HERIC .....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 54. Corriente consumida por el dispositivo de comodidad térmica en inversor HERIC .....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 55. Corriente de fuga del inversor HERIC con capacitancia de 50 nF .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 56. Estados de conmutación del inversor H6_II .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 57. Tensión a la salida del inversor H6_II .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 58. Tensión filtrada del inverso H6_II .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 59. Contenido armónico del inverso sin transformador H6_II .....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 60. Potencia electrica en inversor H6_II .....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 61. Corriente consumida por el dispositivo de comodidad térmica en H6_II .....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 62. Corriente de fuga del inversor H6_II .....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 63. Corriente de fuga de los inversores sin transformador (a)H5, (b)HERIC y (c)H6_II .....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 64. Comparación de los inversores, en consideración de su área .....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 65. Corriente de retorno al bus de CD de los inversores H5, HERIC y H6_II .....</i>	<i>91</i>

# Índice de tablas

---

<i>Tabla 1. Tipo de Vivienda en México que usa un dispositivo de comodidad térmica [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2. Tipo de viviendas que usan aire acondicionado en México [1].....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 3: Tarifas de consumo doméstico CFE [9].....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4: Precios por tarifa DAC 2021* [9] .....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 5. Datos del módulo fotovoltaico de la marca SunPower SPR-X22-460.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 6. Parámetros del módulo fotovoltaico de la marca SunPower SPR-X22-460.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 7. Posibles arreglos fotovoltaicos para la interconexión a la red .....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 8. Valores requeridos para el dimensionamiento del filtro LCL.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 9. Valores de los componentes para el filtro LCL .....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 10. Parámetros eléctricos para el análisis de los inversores .....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 11. Parámetros de los inversores sin transformador .....</i>	<i>88</i>

# Acrónimos

---

SENER	Secretaría de Energía
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ENCEVI	Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares
AA	Aire Acondicionados
TR	Tonelada de Refrigeración
BTU	Unidad Térmica Británica (en inglés)
CFE	Comisión Federal de Electricidad
FV	Fotovoltaico
SFV	Sistema Fotovoltaico
CD	Corriente Directa
CA	Corriente Alterna
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
GW	Gigawatts
DAC	Doméstica de Alto Consumo
TLIs	Inversores sin transformador
THD	Distorsión Armónica Total (en inglés)
PWM	Modulación por Ancho de Pulso (en inglés)
SPWM	Modulación Sinusoidal del Ancho de Pulso (en inglés)
HERIC	Concepto de Inversor Altamente Eficiente y Confiable (en inglés)
IGBT	Transistores Bipolares de Puerta Aislada (en inglés)
Hz	Hertz
kHz	Kilo Hertz
W	Watts
kW	Kilo Watts
L	Inductor

C	Capacitor
A	Ampere
mA	Mili Ampere
F	Faradio
$\mu$ F	Micro Faradio
nF	Nano Faradio
$E_{cond}$	Energía Consumida
$h_{tra}$	Horas de trabajo
$P_{aire}$	Potencia del dispositivo
$P_{PV}$	Potencia Fotovoltaica
$P_{solpic}$	Hora Pico del Sol
$P_{pan}$	Potencia del Panel
$N_{pan}$	Número de Módulo



# Resumen

---

El presente documento describe el trabajo de investigación “Evaluación de inversores sin transformador para satisfacer la demanda de un aire acondicionado conectado a la red eléctrica”. El objetivo del trabajo es comparar tres topologías de inversores, con el fin de validar la opción más óptima, considerando la eficiencia y el riesgo para los usuarios debido a las corrientes de fuga de cada uno.

La comparación tiene lugar, simulación y análisis a los inversores H5, HERIC y H6\_II para aplicaciones fotovoltaicas interconectada a la red eléctrica. Cubrir el consumo eléctrico de un aire acondicionado es un estudio que resulta interesante debido a que los inversores sin transformador han tenido un crecimiento positivo para la integración de sistemas fotovoltaico en los últimos años, esto gracias a su eficiencia de conversión de energía. Ante esta situación, resulta evidente la necesidad de elegir el mejor convertidor para el caso de estudio.

Los sistemas con inversor sin transformador se han simulado en el software Matlab/Simulink con una tensión de entrada de 153.4 VCD y una potencia nominal de 6,442.8 W, a 60 Hz. La activación de los interruptores de las topologías se realizan mediante la modulación SPWM bipolar. Como resultado, el contenido armónico obtenido de tensión para cada inversor es menor a la especificada por la norma IEEE 519-1992, la cual indica que la forma de onda debe exhibir una THD inferior al 3%. Al igual que el contenido armónico, la corriente de fuga cumple con la norma DIN V 0-126-1-1, la cual exige una corriente menor a 300 mA.

Una vez que se conozca cuál es el inversor apropiado para cubrir la demanda de un aire acondicionado. Se podrá aplicar a un sistema fotovoltaico como una alternativa viable para compensar el aumento del consumo eléctrico y así reducir el costo.

# Abstract

---

This paper describes the research work "Evaluation of transformerless inverters to meet the demand of a grid-connected air conditioner". The objective of the work is to compare three inverter topologies, in order to validate the most optimal option, considering efficiency and risk to users due to leakage currents of each one.

The comparison takes place, simulation and analysis to H5, HERIC and H6\_II inverters for grid-connected photovoltaic applications. Covering the power consumption of an air conditioner is a study that is interesting because the transformerless inverters have had a positive growth for the integration of photovoltaic systems in recent years, this thanks to its efficiency of energy conversion. Given this situation, it is evident the need to choose the best converter for the case study.

The transformerless inverter systems have been simulated in Matlab/Simulink software with an input voltage of 153.4 VDC and a rated power of 6,442.8 W, at 60 Hz. The activation of the switches of the topologies is performed by means of bipolar SPWM modulation. As a result, the obtained harmonic content of voltage for each inverter is less than that specified by the IEEE 519-1992 standard, which indicates that the waveform should exhibit a THD of less than 3%. As well as the harmonic content, the leakage current complies with DIN V 0-126-1-1, which requires a current of less than 300 mA.

Once it is known what is the appropriate inverter to meet the demand of an air conditioner. It can be applied to a photovoltaic system as a viable alternative to offset the increased electricity consumption and thus reduce the cost.

# Capítulo 1 Introducción

---

En este capítulo se abordan las ideas iniciales del trabajo de investigación que se desarrolló. Esto incluye el planteamiento del problema que se desea resolver, los objetivos y alcances, la justificación y la propuesta de solución. Se describen también la necesidad de alcanzar la comodidad térmica, la importancia del aire acondicionado como un medio para satisfacer esta necesidad, y el aumento del consumo eléctrico que supone el funcionamiento de este aparato.

El trabajo llamado “Evaluación de inversores sin transformador para satisfacer la demanda de un aire acondicionado conectada a la red eléctrica” es producto de la investigación y tiene como propósito comparar algunas topologías de inversores sin transformador. Entre otras características, la comparación considera la eficiencia y el riesgo para los usuarios debido a las corrientes de fuga. Por otro parte, en el capítulo se identifica a la energía solar fotovoltaica como una alternativa viable para compensar el aumento del consumo eléctrico.

## 1.1 La necesidad de comodidad térmica

Debido al cambio climático, en la actualidad los niveles de temperatura han aumentado en toda la superficie del planeta y no hay localidad ni región que escape a sus efectos. Como medidas paliativas y correctivas, los dispositivos de comodidad térmica son necesarios para mantener la temperatura en un espacio acotado dentro de los niveles de bienestar.

Los dispositivos pueden ser del tipo pasivo, los que no consumen energía durante su funcionamiento, como es el caso de los aislantes térmicos. El segundo tipo es el de los dispositivos activos, los que consumen energía durante su funcionamiento; dos casos

comunes son los aparatos de aire acondicionado y los ventiladores. Hoy en día, los habitantes del mundo procuran recurrir a tantos dispositivos como lo permita su economía personal.

En el caso de México, diversos estudios realizados por la Secretaría de Energía (SENER), y la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), señalan que 15,847,385 de viviendas en México recurren por lo menos a un dispositivo de comodidad térmica [1]. La Tabla 1 muestra los datos que recabó en 2018 el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), a través de la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI). Se listan los tipos de vivienda, y se identifica si usan o no un dispositivo de comodidad térmica.

*Tabla 1. Tipo de Vivienda en México que usa un dispositivo de comodidad térmica [1]*

Tipo de vivienda	¿Usan aislantes térmicos, ventiladores o sistemas de aire acondicionado?	
	Si	No
Casa única del terreno	12,867,496	11,939,924
Casa que comparten terreno con otra(s)	2,033,648	3,617,022
Casa dúplex, triple o cuádruple	289,750	305,951
Departamento en edificio	433,071	1,181,256
Cuarto en la azotea de un edificio	5,672	8,048
Vivienda en vecindad o cuartería	206,394	255,932
Local no construido para habitación	11,354	6,630
<b>Total</b>	<b>15,847,385</b>	<b>17,314,763</b>

De acuerdo con la Tabla 1, es casi un 10% mayor el número de viviendas que carecen de un dispositivo de comodidad térmica. Esto puede deberse diversos factores, pero se estima que los costos de adquisición y de operación juegan un papel preponderante. Aunque la tabla se basa en datos de 2018, es muy probable que la tendencia en la actualidad sea similar.

## 1.2 Aparatos de aire acondicionado como solución a la comodidad térmica

Los aparatos de aire acondicionado (AA) son dispositivos de confort térmico activos, capaces de regular la temperatura en espacios acotados, ya sea laborales o habitacionales. En la Tabla 2, elaborada con datos de la misma fuente que la 1, se presenta la cantidad de viviendas que cuentan con AA en México.

Como se puede apreciar, en un total de 4,908,985 se usan estos aparatos para regular de temperatura, mientras que en 27,966,989 viviendas no lo usan. Esto implica una proporción de 1 a 5.7. Se estima que la diferencia puede atribuirse al precio inicial del aparato y a los costos de mantenimiento y operación; en este sentido apunta el hecho de que es en viviendas solas donde se encuentra la mayor cantidad de AA.

*Tabla 2. Tipo de viviendas que usan aire acondicionado en México [1]*

Tipo de vivienda	¿Usan aire acondicionado en la vivienda?	
	Si	No
Casa única del terreno	4,375,878	20,226,745
Casa que comparten terreno con otra(s)	340,624	5,242,819
Casa dúplex, triple o cuádruple	74,361	521,340
Departamento en edificio	94,096	1,511,103
Cuarto en la azotea de un edificio	745	11,960
Vivienda en vecindad o cuartería	19,942	438,377
Local no construido para habitación	3,339	14,645
<b>Total</b>	<b>4,908,985</b>	<b>27,966,989</b>

Bajo la premisa de que la diferencia entre números de hogares que disponen de aparatos de aire acondicionado, y los hogares que carecen de él, tiene su origen en causas económicas, en [1]–[4] se describe la importancia de adoptar los aires acondicionados y cómo se estima que será la curva de adquisición en el futuro[5].

La Figura 1 representa de forma gráfica (la curva S) la tendencia en la adquisición de estos aparatos en México [4]. Los puntos azules representan la penetración media del aire acondicionado para cada decil de ingresos. La línea azul es el mejor ajuste cúbico a través de estos puntos para ilustrar el patrón de adopción en forma de S que se observa en los datos. La línea gris es un gráfico de densidad que ilustra la distribución de los ingresos en el país. En conclusión, el estudio que se reporta en [4] afirma que a medida que crecen tanto los ingresos de los hogares en todo el mundo como la temperatura global, el empleo de los aparatos de aire acondicionado aumenta de manera drástica.

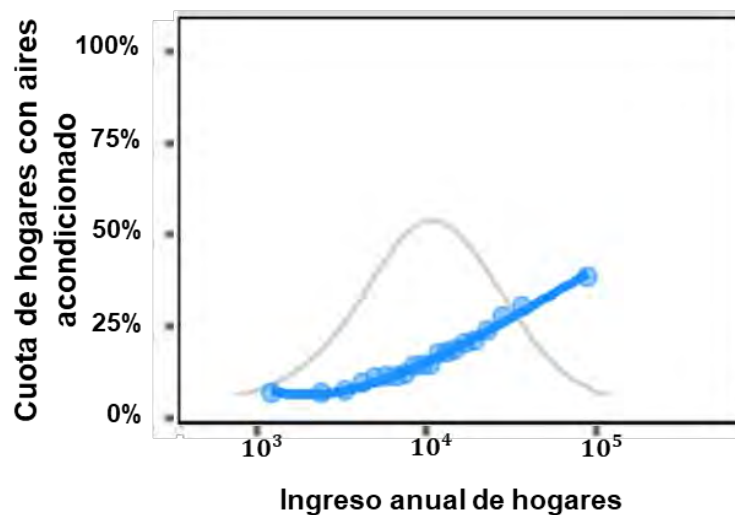


Figura 1. Curva de adopción de aire acondicionado en México [4]

Esto constituye una situación paradójica: una de las razones del calentamiento global es el consumo de combustibles fósiles, con un porcentaje importante dedicado a la producción de electricidad. Para combatir el efecto del cambio climático se emplean aparatos de aire acondicionado, lo que se refleja en un mayor consumo de energía eléctrica.

### 1.3 Tipos de aparatos de aire acondicionado

Existe una amplia variedad de aparatos de aire acondicionado. A nivel residencial, los más comunes son los de ventana y los tipos minisplit (véase la Figura 2), cada uno con características diferentes en cuanto a tamaño, forma física, consumo eléctrico, eficiencia, etc. En [2], [3] se reporta que el 48% de los sistemas de aire acondicionado instalados son tipo minisplit, y que el 35% son de tipo *on/off*. Las razones de su popularidad son la fácil instalación y el menor consumo de energía eléctrica.

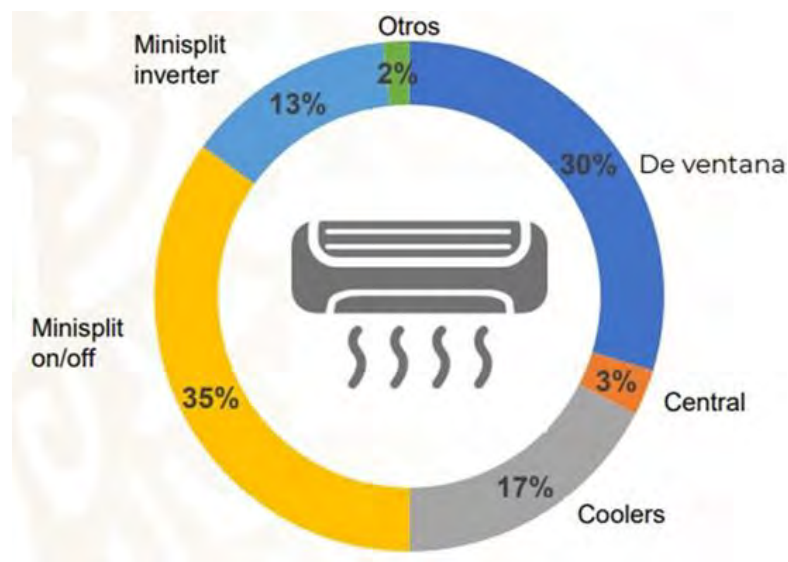


Figura 2. Porcentaje de uso de aparatos de aire acondicionado [5]

En cuanto a la capacidad de enfriamiento, los aparatos de 1 Tonelada de Refrigeración (TR, unidad nominal de extracción de carga térmica o calor) son los que se comercializan en mayor cantidad. Otra unidad de uso común en el ámbito de la refrigeración para indicar la capacidad de enfriamiento de un aparato es el BTU (iniciales de *British Thermal Unit*). Las equivalencias, incluyendo el sistema internacional de unidades es  $1 \text{ TR} = 12,000 \text{ BTU} = 12,550,570.2314 \text{ Joules} = 3,516.86 \text{ W}$ .

A continuación se presenta una lista de los *minisplit on/off* instalados en la actualidad, agrupados porcentualmente por capacidad de refrigeración. La lista procede también de la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares 2018 [5], último año del cual se dispone de datos.

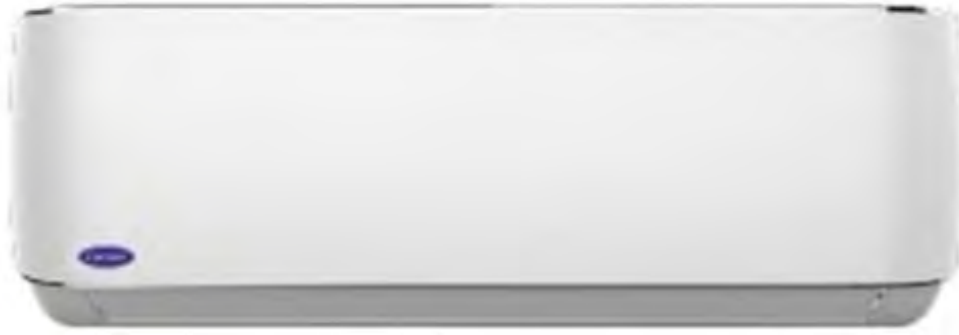
- 3%, Menor a  $\frac{3}{4}$  TR (<9,000 BTU)
- 3%,  $\frac{3}{4}$  TR (9,000 BTU)
- 60%, 1 TR (12,000 BTU)
- 11%, 1  $\frac{1}{2}$  TR (18,000 BTU)
- 11%, 2 TR (24,000 BTU)
- 12%, No se sabe

Como se puede apreciar en la lista anterior. Los aires acondicionados de 1 TR cubren el 60% del mercado de aparatos *minisplit on/off*, dentro del 35% de los AA. Sin duda alguna y debido a la economía de escala (oferta en el mercado, disponibilidad de refacciones, personal capacitado para instalarlo y/o repararlo, etc.), desde el punto de vista del usuario la mejor opción es adquirir el dispositivo de comodidad térmica de la capacidad que más se produce.

Los aparatos de aire acondicionado se pueden encontrar en distintas marcas, comercializables en una amplia variedad de modelos. Una marca popular en México es Carrier, con el modelo *Elite Serie A High Wall Inverter* (Figura 3) que exhibe las siguientes especificaciones técnicas:

- Disponible en 115 V y 220/230 V
- Modos: *Cool, Dry, Fan, Auto* y *High Power* (Turbo)
- Modo *Heat* (disponible en modelos con calefacción)
- Velocidad del ventilador ajustable
- Modo *ECO SLEEP*
- Ajuste vertical y horizontal del flujo de aire
- Control de *Wi-Fi* integrado
- Modo *FOLLOW ME*, que ajusta la temperatura basándose en el sensor del control remoto, dando mayor confort
- Operación silenciosa, tan baja como 24 dB (A)
- Temporizador de encendido y apagado
- Reencendido automático





*Figura 3. Aire acondicionado Elite Serie A High Wall Inverter [6]*

## **1.4 Consumo eléctrico por aire acondicionado**

Normalmente, la red eléctrica convencional proporciona la energía necesaria para la operación de los aparatos electrodomésticos. A mayor cantidad de aparatos en un hogar, mayor será la carga económica asociada con el pago de la energía; por ello, es importante conocer cuánta energía consumen los aparatos para determinar el costo operativo y seleccionar la opción más eficiente a la hora de elegir alguno en particular [3]. Se sabe que los aparatos de aire acondicionado son los dispositivos de comodidad térmica que más energía eléctrica consumen [2], [4], [5].

Por otro lado, en México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cobra el consumo de energía de acuerdo a tarifas eléctricas autorizadas [7]–[9]. En el capítulo 2 se describen las tarifas eléctricas, costo de cada una, nivel de demanda (potencia), entre otros factores relacionados con el consumo eléctrico.

Un punto relevante para consumidores domésticos es que el costo de la energía es inversamente proporcional a la cantidad que se consume; es decir: el costo del kilowatt-hora aumenta conforme se consumen más. El origen de este comportamiento está en los subsidios que reciben los consumidores domésticos, y la intención de que los subsidios se otorguen preferentemente a los usuarios con menor capacidad económica: la lógica es que un usuario consume menos energía porque tiene menos electrodoméstico; a su vez, tiene menos electrodomésticos porque tiene una menor capacidad económica para adquirirlos. A cualquier usuario se le puede excluir del esquema de subsidios cuando su consumo excede un cierto límite; cuando eso ocurre, se dice que el usuario está en la tarifa de alto consumo.

En gran parte de los casos los AA son los responsables del cambio en la tarifa eléctrica. Entonces, dependiendo de la capacidad del aparato de aire acondicionado y el tiempo durante el cual se mantenga encendido, la probabilidad de pagar un mayor costo por el confort térmico puede aumentar significativamente.

El número de viviendas con servicio eléctrico se ha incrementado en los últimos años [10]. Esto se ha convertido en un problema, debido a que gran parte de la energía eléctrica se genera por medio de los combustibles fósiles. Por tal motivo, la industria de la energía ha buscado otras alternativas de fuentes inagotables. El objetivo es producir electricidad de forma amigable con el medio ambiente, provenientes de recursos naturales.

## **1.5 Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica**

Las energías renovables son fuentes alternas para la generación de electricidad. Un panel fotovoltaico (FV) contiene celdas que reciben la luz del sol y, a través del efecto fotoeléctrico, convierten la energía solar en electricidad. El recurso solar FV se utiliza en una amplia gama de aplicaciones [11]; por lo tanto, es una alternativa viable para cubrir parte o la totalidad del consumo eléctrico de un aparato de aire acondicionado [12].

Los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) aprovechan la energía FV para producir un voltaje de corriente directa (CD), el cual puede convertirse en corriente alterna (CA) con la ayuda de un inversor eléctrico. Los SFV se componen, de manera básica, de paneles solares y una etapa de conversión de potencia. Además, se clasifican en función de su interacción con la red; es decir, de si están o no conectados a la red eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos son aquellos que funcionan aislados de la red eléctrica; en contraste, los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red se conectan en paralelo con la red eléctrica convencional (véase la Figura 4) [12].

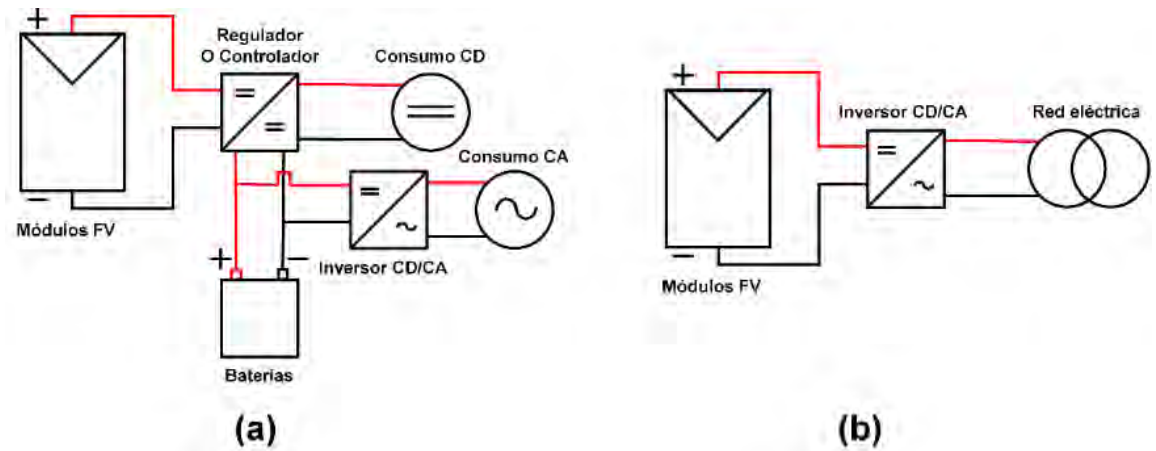


Figura 4. (a) Estructura básica de un sistema fotovoltaico autónomo, y (b) conectado a la red eléctrica

Como se muestra en la Figura 4, en ambos casos se requiere transformar la salida de CD propia de los paneles a corriente alterna, ya que la mayoría de las cargas domésticas funcionan con CA, incluyendo los aires acondicionados. Para la transformación de CD a CA se necesita un inversor eléctrico (véase la Figura 5).

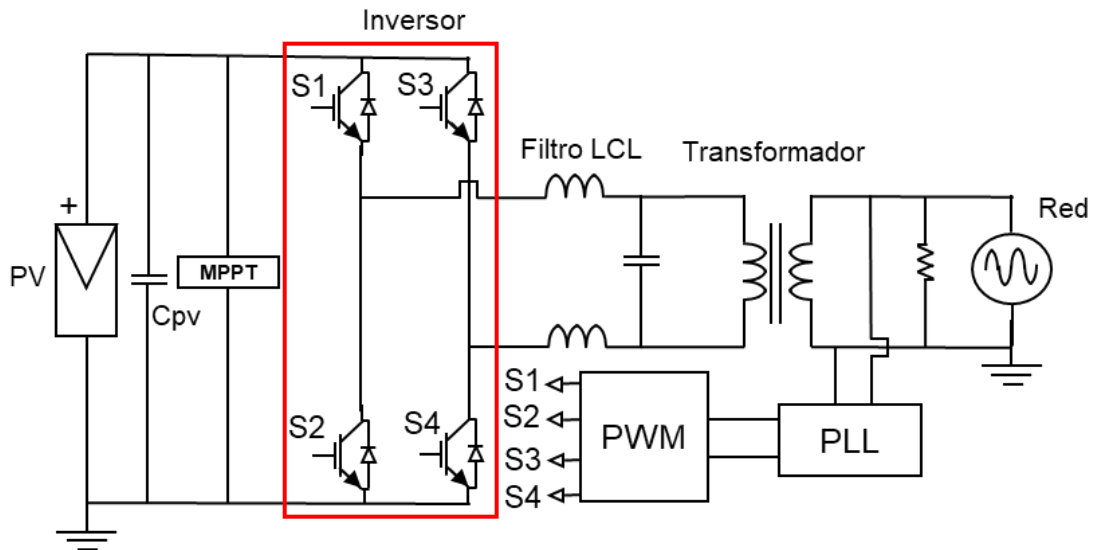


Figura 5. Representación esquemática del inversor en un SFV

## 1.6 Planteamiento del problema

Desde la perspectiva del usuario potencial, la decisión de instalar un aparato de aire acondicionado depende de tres factores:

- a) Costo de adquisición
- b) Costo de mantenimiento
- c) Costo de operación

El costo de operación puede ser el factor de mayor peso en la decisión, porque se relaciona directamente con el consumo de energía y, dependiendo de las condiciones climatológicas, puede ocasionar que el usuario quede fuera del esquema de subsidios. En la actualidad, con los avances en la tecnología fotovoltaica, una opción viable consiste en instalar un aparato de aire acondicionado, acompañado de un sistema fotovoltaico con la capacidad suficiente para producir la energía que consumirá el aire acondicionado.

Para esta aplicación, el SFV debe ser del tipo interconectado a la red. De esta forma, el usuario entregará energía a la red cuando el aparato de aire acondicionado no la consuma, y obtendrá energía de la red cuando el SFV no sea capaz de satisfacer el consumo del aparato de aire acondicionado.

Sean  $C_{AFV}$ ,  $C_{OFV}$  y  $C_{MFV}$  los costos de adquisición, operación y mantenimiento del sistema fotovoltaica respectivamente. Sean también  $C_{AA}$  y  $C_{MA}$  los costos de adquisición y de mantenimiento del aire acondicionado. Respecto a los costos de operación del aire acondicionado, sean  $C_{OCS}$  el costo de operación con subsidio y  $C_{OSS}$  el costo de operación sin subsidio. Entonces, la viabilidad económica implica que, durante un cierto periodo, se satisfaga lo siguiente:

$$C_{AA} + C_{MA} + C_{OSS} > C_{AFV} + C_{OFV} + C_{MFV} + C_{AA} + C_{MA} + C_{OCS}$$

O bien:

$$C_{OSS} > C_{AFV} + C_{OFV} + C_{MFV} + C_{OCS}$$

Reacomodando:

$$C_{OSS} - C_{OCS} > C_{AFV} + C_{OFV} + C_{MFV}$$

En un sistema fotovoltaico el mantenimiento es muy reducido, limitándose en muchas ocasiones a mantener limpios los paneles y a verificar la integridad de las conexiones eléctricas, por lo que se supondrá que  $C_{MFV}$  puede despreciarse.

La viabilidad económica depende entonces de utilizar un sistema fotovoltaico de precio reducido, con costos de operación bajos; es decir: se trata de minimizar  $C_{AFV}$  y  $C_{OFV}$ , pero sin comprometer las normas de seguridad.

Un enfoque en la minimización consiste en eliminar el transformador, lo que incide positivamente en volumen, peso y eficiencia; sin embargo, en SFV para aplicaciones residenciales el aspecto de seguridad es crucial: cuando en las etapas de procesamiento de energía no se tiene un transformador que proporcione aislamiento galvánico, existe la posibilidad de que se produzcan corrientes de fuga en el punto de puesta a tierra del sistema. Además de ser peligrosas para los usuarios, estas corrientes provocan interferencia electromagnética, lo que reduce la vida útil del panel fotovoltaico.

La magnitud de estas corrientes se limita a través de las normas. Por ejemplo, en el caso de Alemania es la norma DIN VDE V 0-126-1-1 la que establece límites para la corriente de fuga, de manera que debe suprimirse hasta un nivel máximo específico, garantizando la seguridad del equipo y del personal.

Desde esta perspectiva, la existencia de corrientes de fuga a través de los paneles fotovoltaicos constituye el obstáculo a eliminar. Para ello se han desarrollado diversas configuraciones que evitan las corrientes de fuga, aunque a costa de incluir una mayor cantidad de elementos que los que contiene un inversor estándar.

## 1.7 Propuesta de solución

En la literatura técnica se han reportado diferentes topologías con capacidad para reducir las corrientes de fuga; cada una de ellas exhibe un costo de manufactura particular que depende de la complejidad y del número de componentes. La diversidad de propuestas y las

condiciones en las que se han evaluado son tales, que se dificulta elegir la mejor opción para una aplicación dada.

En consecuencia, se propone evaluar una cantidad limitada de topologías de inversores sin transformador con la misma capacidad nominal y operando bajo las mismas condiciones. Los resultados se compararán para determinar cuál es la más adecuada para un sistema fotovoltaico orientado a compensar el consumo de energía de un aparato de aire acondicionado de 1 tonelada de refrigeración.

## **1.8 Objetivos**

### **1.8.1 Objetivo general**

Evaluar inversores sin transformador conectados a la red eléctrica, con la capacidad suficiente para satisfacer la demanda de un aparato de aire acondicionado de una Tonelada de Refrigeración.

### **1.8.2 Objetivos específicos**

- 1) Elegir dos o más topologías de inversor sin transformador con capacidad para satisfacer la demanda de un aparato de aire acondicionado de 1 tonelada de refrigeración.
- 2) Comparar las topologías seleccionadas en términos de costo y magnitud residual de la corriente de fuga.
- 3) Desarrollar una propuesta de sistema eléctrico con inversor sin transformador conectado a la red, eficiente y segura, validando su desempeño en simulación, de acuerdo a las restricciones de operación: tensión de salida, frecuencia, contenido armónico y corriente de fuga.

## 1.9 Alcances

- 1) Se seleccionarán configuraciones para las cuales se reporten eficiencias mínimas del 90%.
- 2) El inversor deberá exhibir un contenido armónico de tensión menor al 3%, con una forma sinusoidal de salida en fase con la onda de voltaje en la red eléctrica. El contenido armónico se evaluará de acuerdo a la norma 519 - 1992 de la IEEE.
- 3) La corriente de fuga pico deberá ser inferior a 300 mA.
- 4) La potencia nominal del SFV será compatible con un aparato de una tonelada de refrigeración, como el modelo *AA Elite Serie A High Wall Inverter*, o similar. Esto corresponde al modelo más usado en México.
- 5) La evaluación del desempeño se hará por medio de simulaciones.

## 1.10 Metas

La finalidad del trabajo es elegir una topología de inversor sin transformador como “mejor opción” para utilizarse en un sistema fotovoltaico orientado a compensar el consumo de energía de un aparato de aire acondicionado. La operación y rendimiento del inversor se evaluarán mediante simulaciones en el programa Matlab/Simulink.

Se toman en cuenta las siguientes características:

- La potencia nominal del sistema fotovoltaico debe ser adecuada para compensar el consumo de energía de un aire acondicionado de una tonelada de refrigeración.
- El voltaje del SFV cumplirá con las especificaciones de la red eléctrica convencional (forma de onda sinusoidal con frecuencia de 60 Hz).
- Se elegirá de entre tres topologías de inversores sin transformador: H5, HERIC y H6\_II.
- Las figuras de mérito serán eficiencia, costo, seguridad, vida prolongada, número de componentes de baja y alta frecuencia, corriente de fuga y distorsión armónica total.
- Las topologías se someterán a una potencia nominal determinada, con la misma técnica de modulación. El SFV conectado a red quedará en etapa de simulación.

- La capacitancia parásita tendrá un valor de 50 nF.
- El funcionamiento correcto de las topologías se confirmará con base en los resultados de las simulaciones.

## 1.11 Justificación

El consumo eléctrico contribuye a la contaminación del planeta, debido que gran parte de la electricidad se genera mediante motores de combustión, responsables de la producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En diversos recintos los aparatos de comodidad térmica consumen energía eléctrica, en algunos casos en gran cantidad.

Por otro lado, la eficiencia de un sistema fotovoltaico depende, en primera instancia, de la radiación solar que incida sobre los paneles. Debido a su ubicación geográfica, México dispone de gran recurso solar; la Figura 6 muestra que gran parte del territorio nacional recibe una alta radiación solar; alcanzando un valor promedio diario de 6.2 kWh/m<sup>2</sup>.

Se ha destacado que ningún país europeo supera la radiación solar promedio que se recibe en México; aun así, en éstos países se ha invertido en la construcción de plantas generadoras solares [13]. En 2018, la Secretaría de Energía reportó que México contaba con una potencia eléctrica total instalada de 75.91 gigawatts (GW). De este total, el 2.16 %, se obtiene de energía solar. Esto indica que la energía solar tiene un potencial de crecimiento muy amplio.

Además, las horas de mayor calor coinciden con los periodos de mayor insolación, de manera que la energía consumida por el AA puede obtenerse de la energía solar.



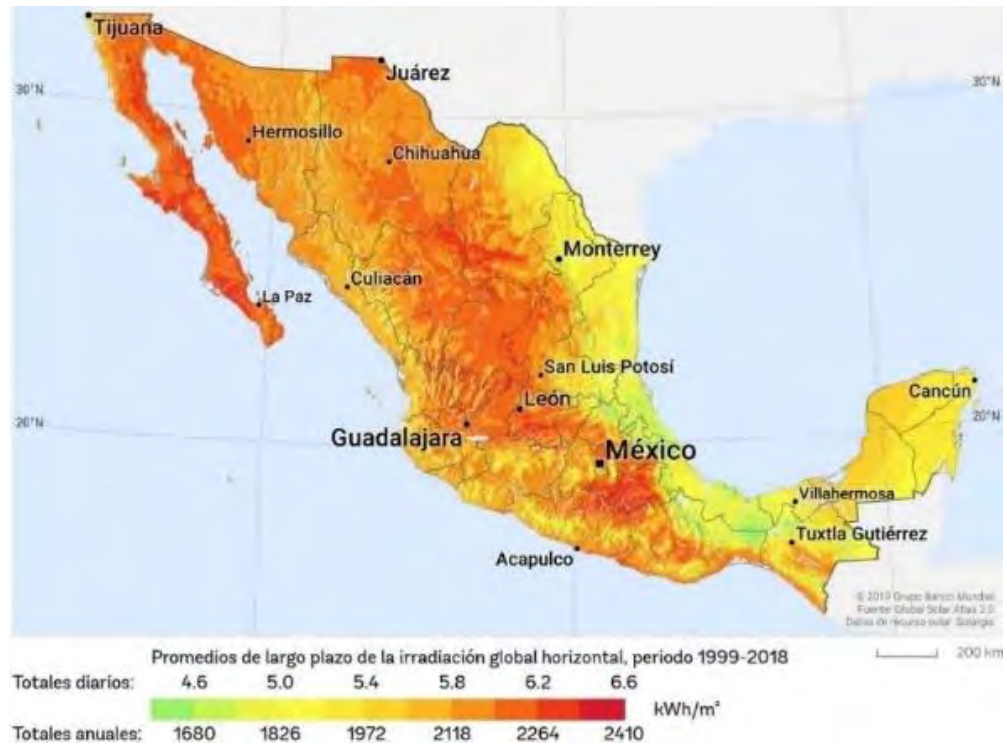


Figura 6. Radiación solar en México [14]

## Capítulo 2 Marco teórico

---

En este capítulo se presenta la recopilación de antecedentes, investigaciones previas y consideraciones teóricas relacionados con el tema de investigación. Al inicio se describen los sistemas de inversores sin transformador, y la clasificación de cada uno de ellos, además del principal problema de éstos (corriente de fuga). Por otra parte, se mencionan las diferentes tarifas eléctricas manejadas por la Comisión Federal de Electricidad, al igual que los precios de cada una.

En este trabajo se explica también la importancia del filtro a la salida del inversor, y el contenido armónico máximo que debe tener la señal de tensión para poder inyectarla a la red eléctrica.

### 2.1 Tarifas eléctricas

La tarifa doméstica de alto consumo (DAC) de la CFE se aplica a los hogares o pequeños comercios que registren un elevado consumo de electricidad, por arriba de un umbral específico. Estas tarifas no cuentan con ningún tipo de subsidio ni apoyo gubernamental y su costo es mucho más elevado que el resto de los importes eléctricos.

Para que el consumo de energía eléctrica se considere alto, CFE debe asegurar que la lectura del medidor en el hogar registre un consumo mensual (promedio) superior a los límites de consumo establecido en una localidad [8]. Los rangos dependen de la zona del país y la temperatura mínima en verano. Las tarifas de consumo eléctrico cuentan con rangos clasificados por un límite, estos se pueden ver en la Tabla 3.

Tabla 3: Tarifas de consumo doméstico CFE [9]

Tarifa	Límite de consumo para aplicación de tarifa DAC (kWh al mes)	Temperatura media mínima en verano (°C)
Tarifa 1	250	menor a 25
Tarifa 1A	300	25
Tarifa 1B	400	28
Tarifa 1C	850	30
Tarifa 1D	1,000	31
Tarifa 1E	2,000	32
Tarifa 1F	2,500	33
Tarifa DAC	De exceder al límite de consumo establecido	mayor de 33

Al aplicar una tarifa doméstica de alto consumo, el objetivo de CFE es que los usuarios cambien sus hábitos de consumo de energía eléctrica. Al ser una tarifa mucho más cara, se busca que constituya una motivación para cuidar el consumo de electricidad o emplear las energías renovables como una alternativa.

La tarifa DAC no cuenta con rangos de consumo, mantiene un mismo precio por kWh sin importar la cantidad de electricidad que se utilice. La DAC tiene un cargo fijo mensual, las cuotas por kWh las establece CFE mensualmente de acuerdo a la región del país, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Precios por tarifa DAC 2021\* [9]

Región del país	Cargo fijo mensual	Cargo por energía consumida (\$ por kWh)
Central	\$113.46	\$4.88
Noroeste	\$113.46	\$4.57
Norte y Noroeste	\$113.46	\$4.45
Sur y Peninsular	\$113.46	\$4.52
Baja California	\$113.46	\$4.40
Baja California Sur	\$113.46	\$4.62

\*Promedio de cuotas de enero y febrero 2021

Por otro lado, los estudios reportados en [2], [3] describen un aumento del consumo eléctrico en los días calurosos, sin que la reducción de energía en los días fríos tenga un efecto compensatorio en todo el ciclo anual. Lo anterior, debido a que las tarifas de facturas eléctricas son diferentes en cada época del año.

Como se menciona en el capítulo 1, a medida que en todo el mundo aumenten la temperatura global y los ingresos de los hogares, el consumo eléctrico aumentará de forma drástica, al igual que la tarifa eléctrica. El aumento de la temperatura ocasiona que la reducción de calor en espacios laborales acotados sea una necesidad para conservar la comodidad térmica de los usuarios [4]. En [4], [15] se demuestra que regular la temperatura en un espacio acotado requiere de dispositivos de comodidad térmica, la cual conlleva un consumo de energía y el consiguiente aumento en la tarifa eléctrica.

## 2.2 Origen de la corriente de fuga

La corriente de fuga se presenta en la capacitancia parásita del sistema fotovoltaico, la cual es inherente a la estructura física de los paneles fotovoltaicos (véase la Figura 7). En ellos, existe un vidrio cubriendo las celdas fotovoltaicas de un módulo. El vidrio es un dieléctrico; por lo tanto se forma un capacitor parásito entre las celdas y el marco del panel fotovoltaico el cual, a su vez, se conecta a tierra [16]. El resultado neto, desde el punto de vista eléctrico, es de un capacitor conectado entre las celdas FV y tierra, cuya capacitancia depende de una serie de factores asociados con la fabricación del panel: área de éste, características del dieléctrico que cubre las celdas, etc. El capacitor proporciona una trayectoria para el flujo de corriente entre la superficie del panel y la tierra de la red eléctrica [17].

Sean  $C_{ma}$ ,  $C_e$ ,  $C_{cv}$ ,  $C_{cf}$ ,  $C_{cp}$ ,  $C_{cc}$  y  $C_{af}$  las capacitancias de marco de aluminio, encapsulado, cubierta de vidrio, célula fotovoltaica, cubierta posterior, conexión entre células y agujero para la fijación. La capacitancia parásita resulta de la suma de todas las anteriores, entre otras.

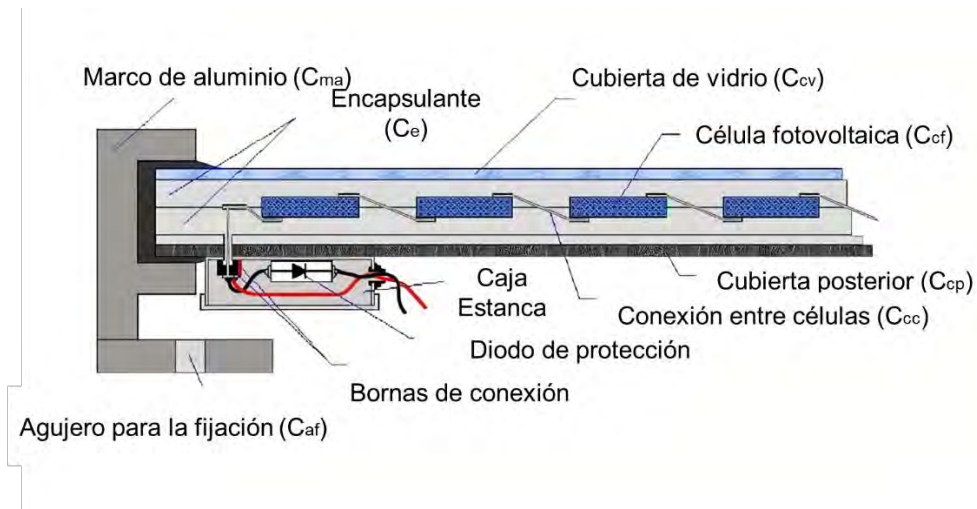


Figura 7. Capacitancia parásita del módulo fotovoltaico

Por otro lado, para mejorar la calidad de la forma de onda y cumplir con las normas respectivas es práctica común incluir elementos de filtrado a la salida de los SFV. Si en el circuito electrónico de potencia no existe aislamiento galvánico (es decir: no se incluye un transformador en la trayectoria de procesamiento de la energía), cuando el inversor se conecta a la red eléctrica se puede producir una resonancia entre las inductancias del filtro de salida y la capacitancia parásita.

La frecuencia de la resonancia depende de los valores de la inductancia en el filtro y de la magnitud de la capacitancia parásita. El resultado es una corriente de alta frecuencia que se refleja como emisión de interferencia electromagnética (EMI) y que, en algunos casos, puede afectar el funcionamiento del inversor en el SFV.

## 2.3 Inversores conectados a la red eléctrica

El inversor de conexión a la red es el componente de los SFV cuya finalidad es convertir el voltaje de CD generado por los paneles solares, en un voltaje de CA. Las características y funciones de un inversor son:

- 1) Transformar la salida de CD del arreglo FV en una onda de voltaje de CA con características de amplitud, frecuencia y fase compatibles con la red eléctrica convencional.

- 2) Optimizar la producción de energía generada por las placas solares y maximizar el rendimiento del sistema, por medio de un esquema de seguimiento del punto de máxima potencia.
- 3) El equipo de protección es capaz de llevar a cabo un seguimiento de la actividad eléctrica y el rendimiento.
- 4) Registrar y recopilar los datos de producción que permitan verificar el correcto funcionamiento de la instalación.

Los inversores conectados a la red eléctrica pueden o no tener un transformador eléctrico. La Figura 8, muestra el diagrama de clasificación de inversores con y sin transformador; este esquema solo señala algunos de las configuraciones existentes, ya sea inversores aislados con transformadores en alta o baja frecuencia, o inversores sin transformador.

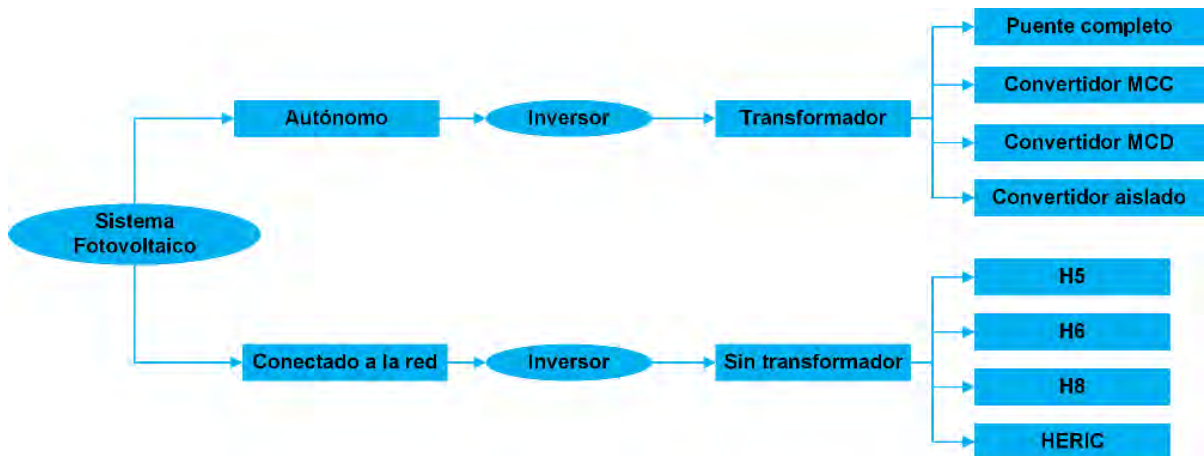


Figura 8. Clasificación de inversores con transformador y sin transformador

En los últimos años, la cantidad de propuestas de configuraciones de inversores para aplicaciones fotovoltaicas ha aumentado considerablemente [16]. Entre otros parámetros, se ha buscado mejorar la eficiencia, la seguridad, obtener una vida útil más prolongada, menor costo y tamaño, [17] [18].

### 2.3.1 Inversores con transformador

Un sistema fotovoltaico está compuesto por una serie de elementos, cada uno con una función específica. Existen SFV que incluyen inversores con transformador (véase la Figura 9), lo que permite aumentar o disminuir la amplitud de la tensión alterna de salida, de acuerdo con la relación de vueltas entre los devanados primario y secundario. Sin embargo, se ha encontrado que los transformadores en un inversor disminuyen la eficiencia en un 2% [17], además del impacto económico negativo del transformador (costo parte, volumen, peso, etc.).

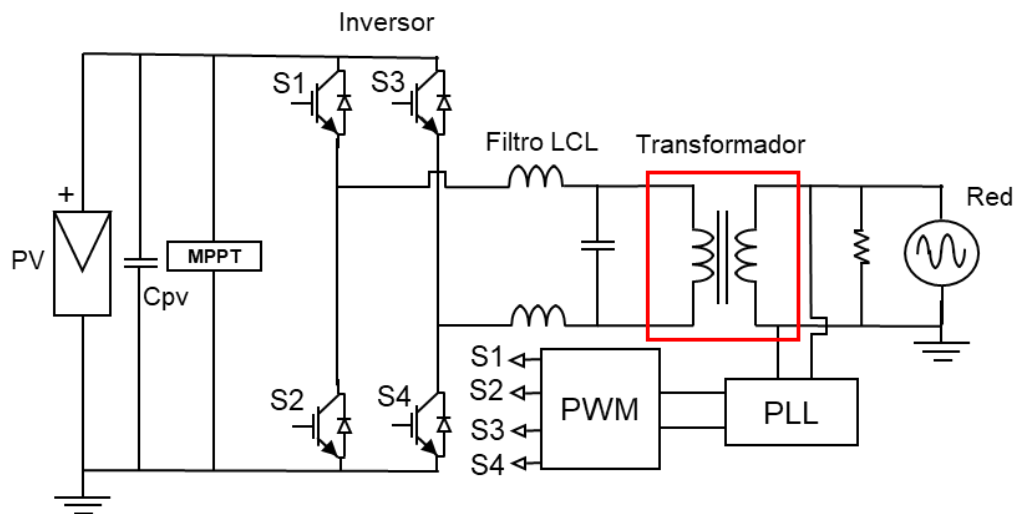


Figura 9. Sistema fotovoltaico conectado a red eléctrica con transformador

El tamaño del transformador depende de la frecuencia a la que se encuentre operando. Cuando el transformador está a la salida del inversor, opera a frecuencia de la red eléctrica, implicando un tamaño relativamente voluminoso. Con el fin de disminuir el volumen del transformador, una propuesta alterna fue incorporar convertidores aislados en la etapa del panel solar (es decir: en el bus de CD de la etapa de procesamiento de energía) [17], [19]. Un ejemplo es incorporar un convertidor de CD a CD con aislamiento galvánico como el *Push - Pull* (véase la Figura 10). De esta manera, el transformador funciona a alta frecuencia, lo que conlleva a una reducción en el volumen.

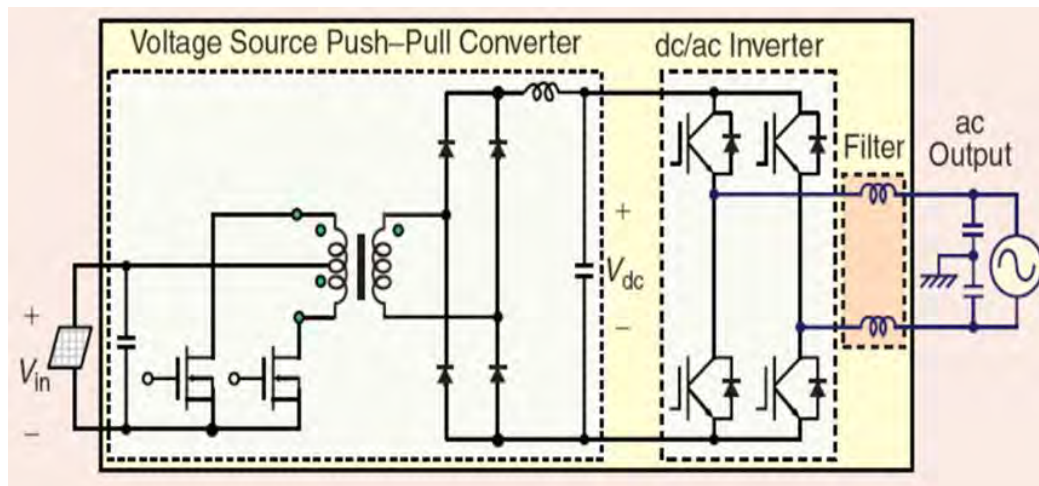


Figura 10. Sistema fotovoltaico monofásico con convertidor Push-Pull [17]

### 2.3.2 Corrientes de fuga en SFV sin transformador conectados a la red eléctrica

En numerosas instalaciones eléctricas, a través del conductor de protección circula una corriente a tierra (corriente de fuga). La corriente de fuga ocasiona interferencias y, en ocasiones, puede causar disparos innecesarios e intermitentes de las protecciones. En casos extremos, provoca una tensión elevada en los elementos y partes conductoras expuestas.

La corriente de fuga es la principal desventaja al conectar un SFV a la red eléctrica, debido que todo el sistema está puesto a tierra (véase la Figura 11). La corriente reduce el tiempo de vida útil del panel fotovoltaico e incrementa las pérdidas; además, también aumenta la interferencia y el ruido en el sistema [16].

A lo largo del tiempo se han propuesto diferentes soluciones para eliminar o, cuando menos, reducir la corriente de fuga [20]: nuevas topologías de inversores, o distinta técnica de modulación, entre otras opciones.



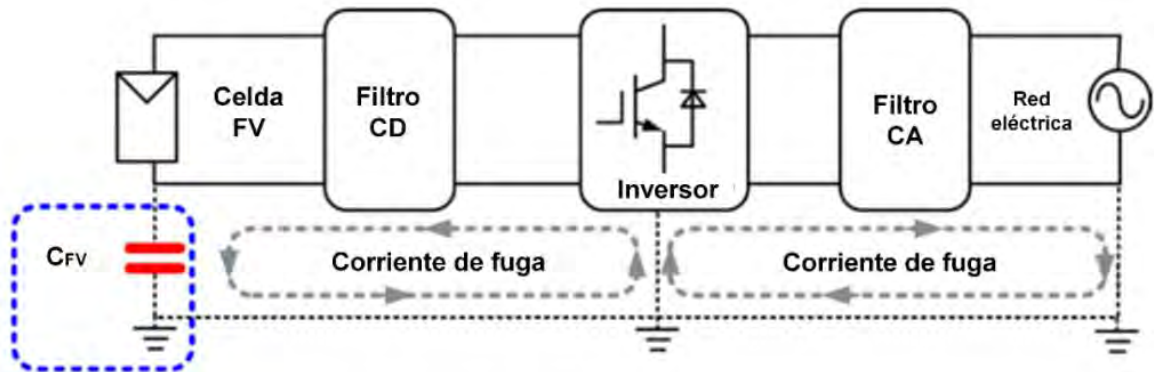


Figura 11. Ruta de la corriente de fuga en un sistema fotovoltaico [16]

### 2.3.3 Corriente de fuga permitida por las normas

La corriente de fuga distorsiona la forma de onda que se inyecta a la red eléctrica, lo que provoca interferencia electromagnética y otros problemas adicionales en la red. Esto afecta el funcionamiento de aparatos conectados a la red convencional. La corriente de fuga también puede crear una carga eléctrica en la carcasa del inversor, lo que constituye una amenaza para la seguridad personal.

Con la intención de reducir la magnitud del problema y los riesgos involucrados, existen normas que establecen límites de corriente, como la norma alemana DIN VDE V 0-126-1-1 [21], [22]. La norma establece que la amplitud máxima de la corriente de fuga debe ser menor a 300 mA (pico). La norma fue elegida por tener un estándar estricto en regular la conexión de sistema fotovoltaico al sistema de distribución de baja tensión. Especifica los requisitos para el dispositivo de desconexión automática que actúa como una interfaz de seguridad entre el generador y la red pública, además de ser la más utilizada para la aceptación de riesgos involucrados por la amplitud de la corriente de fuga.

## 2.4 Inversores sin transformador, con supresión de corrientes de fuga

Dado que el transformador degrada la eficiencia, conviene explorar otras alternativas sin transformador. El obstáculo es la corriente de fuga del panel fotovoltaico, la que fluye a través de la puesta a tierra; por lo tanto, la eliminación del transformador involucra un riesgo para la seguridad.

Los inversores sin transformador (*TLIs*, del término en inglés *TransformerLess Inverter*), son más propensos a las corrientes de fuga. Al no contar con el aislamiento galvánico que proporciona el transformador, los usuarios deben manipularlos con cuidado [23] [24]. Los inversores sin transformador evitan la resonancia al desconectar los paneles cuando el voltaje en la salida del inversor es de cero volts, el capítulo 4 explica a detalle este concepto.

La Figura 8, “*clasificación de inversores con transformador y sin transformador*”, ilustra algunos TLI con supresión de corriente de fuga. Cada uno de los TLI cuenta con características diferentes; algunos son más eficientes que otros, debido a su diseño diferente, el número y las características de los componentes que intervienen en su construcción. El capítulo 3, explica algunas aportaciones de los inversores sin transformador.

Por otro lado, los inversores sin transformador se comercializan en aplicaciones fotovoltaicas debido a su tamaño reducido, menor costo y alta eficiencia de conversión de energía. Esto con la finalidad que el sistema tenga un precio de venta más bajo, conveniente para el usuario.

## 2.5 Contenido armónico

Considérese una forma de onda periódica con una tasa de repetición  $T_{FO}$  y, por lo tanto, una frecuencia  $f_{FO} = T_{FO}^{-1}$ . De acuerdo con la definición estándar, un armónico de la forma de onda periódica es una componente sinusoidal a una frecuencia múltiplo entero de  $f_{FO}$ . La cantidad de armónicos que existan en la forma de onda periódica pueden alterar los valores pico y eficaz de ésta última, causando alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos que estén sometidos a la forma de onda periódica [25].

La Distorsión Armónica Total THD (del término en inglés *Total Harmonic Distortion*), es una magnitud que se emplea para representar la calidad de una forma de onda, indicada como porcentaje de la amplitud de las componentes armónicas con respecto a la componente a la frecuencia de la forma de onda periódica. En otras palabras, es una medida de la cantidad de armónicos en una forma de onda periódica, y de sus amplitudes.

En el caso de la red eléctrica, idealmente la onda de voltaje es perfectamente sinusoidal, a una frecuencia de 60 Hz; un valor de THD mayor a cero indica tensión o corriente distorsionada, dependiendo del parámetro que se esté describiendo. En el caso de un inversor, se trata de un dispositivo de comportamiento no lineal, cuya onda de salida suele incluir armónicas a frecuencias relativamente elevadas. Esto implica que la onda de salida de un inversor no es ideal para la conexión a red.

Desde hace algunos años se han desarrollado técnicas para la eliminación de armónicos presentes en la forma de onda de salida de un inversor. En la actualidad, los inversores utilizan métodos de modulación PWM (de *Pulse Width Modulation*). En los inversores que conmutan a frecuencias altas, los armónicos suelen estar en alta frecuencia y son de magnitud pequeña, lo que facilita el filtrado.

### **2.5.1 Contenido armónico permitido por las normas**

La distorsión armónica sugerida como límite de tensión o corriente se especifica en la norma IEEE 519-1992. La norma también recomienda prácticas y requerimientos para el control de armónicos en los sistemas eléctricos de potencia. La norma indica que la forma de onda debe exhibir una THD inferior al 3% [4], [15].

### **2.5.2 Filtro de salida del inversor**

Un filtro es un circuito eléctrico con al menos un elemento reactivo (inductor o capacitor). Éstos se pueden encontrar, de inicio, en tres variantes: los de primer orden, que son aquellos con solo un elemento reactivo; de segundo orden, que tienen dos elementos reactivos; de tercer orden, con tres elementos reactivos.

Para conectar el inversor e inyectar energía a la red eléctrica hace falta un filtro de tensión entre el inversor y la red. En un inversor, el objetivo del filtro es atenuar los armónicos de alta frecuencia y evitar la conexión directa entre el inversor y la red convencional [26]. La elección del filtro influye en el control del sistema, la calidad de la onda, el peso del propio filtro y los costes unitarios asociados.

Se sabe que el filtro discrimina una determinada frecuencia de la forma de onda que se aplique en la entrada. El filtro puede modificar tanto la amplitud como la fase. Si el primer armónico en aparecer se halla en una frecuencia muy alta, el tamaño del filtro se reducirá. El filtro de salida logra atenuar los armónicos generados por el patrón PWM que se utilice para modular al inversor.

## Capítulo 3 Estado del arte

---

En este capítulo se presenta el estado del arte del tema de tesis. Se lista el conjunto de resultados o el desarrollo que se ha conseguido a lo largo de la investigación sobre los inversores sin transformador. Para esta labor se recurrió a bases de datos y herramientas como ResearchRabbit, CONNECTED PAPERS, Google Scholar e IEEE Xplore, obteniéndose información a través de palabras claves.

### 3.1 Introducción del estado del arte

En diferentes fuentes bibliográficas se describe que es común encontrar inversores sin transformador aplicados a sistemas fotovoltaicos, en especial para configuraciones monofásicas. Las topologías son capaces de operar con diferentes técnicas de modulación [27]. Un hecho importante es que, en gran cantidad, los investigadores se han centrado en el desarrollo para convertidores monofásicos y pocos trabajos para sistemas trifásicos.

En la actualidad existe una gran variedad de inversores sin transformador: por ejemplo, las configuraciones H5, H6, H7 H8, HERIC, REFU, FB-ZVR, NPC, entre muchas otras. Las topologías son una solución para la eliminación del transformador en un SFV conectado a la red eléctrica, cada una con ciertas ventajas y desventajas.

### 3.2 Inversores sin transformador

[28] se presenta el diseño del inversor HERIC, simulándolo por medio del software PSIM (véase la Figura 12). Los resultados obtenidos son de alta eficiencia; además, la corriente de fuga cumple la norma de seguridad cuando el inversor se conecta a la red eléctrica (2014).

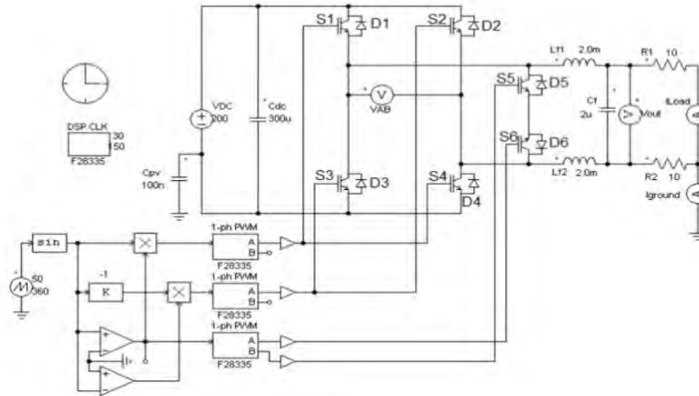


Figura 12. Topología del inversor HERIC en simulador PSIM [28]

[29] se propone un inversor H5 en combinación con un convertidor elevador (*Boost*) para un módulo fotovoltaico. La topología propuesta asegura que el convertidor pueda operar en un amplio rango de tensión de entrada, resultando una baja corriente de fuga (véase la Figura 13) (2018).

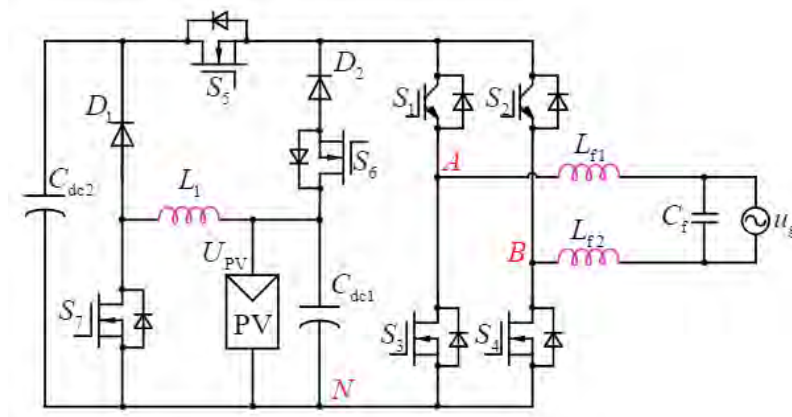


Figura 13. Topología del inversor H5 con convertidor Boost [29]

[30]: se detalla una topología H5 con retroalimentación del lazo de control al sistema con análisis de estabilidad. Los resultados obtenidos fueron una salida estable de 200 V a una frecuencia de 50 Hz, con un límite de tolerancia del 2 al 5% (2018).

[31]: se describe al inversor HERIC como uno de los más populares en los sistemas fotovoltaicos. Como resultado se obtuvo una eficiencia del 95.76% debido al accionamiento de interruptores de doble arranque (2018). Por otro lado, los interruptores conmutaron a una frecuencia de 20 kHz.

[32]: se muestra una modulación híbrida para un inversor sin transformador H6 con compensación de potencia reactiva. La eficiencia del inversor H6 con factor de potencia variable es ligeramente menor que con factor de potencia constante e igual a 1 (véase la Figura 14). El método de modulación híbrida que conmuta a 20 kHz ayuda a obtener un buen rendimiento (2018).

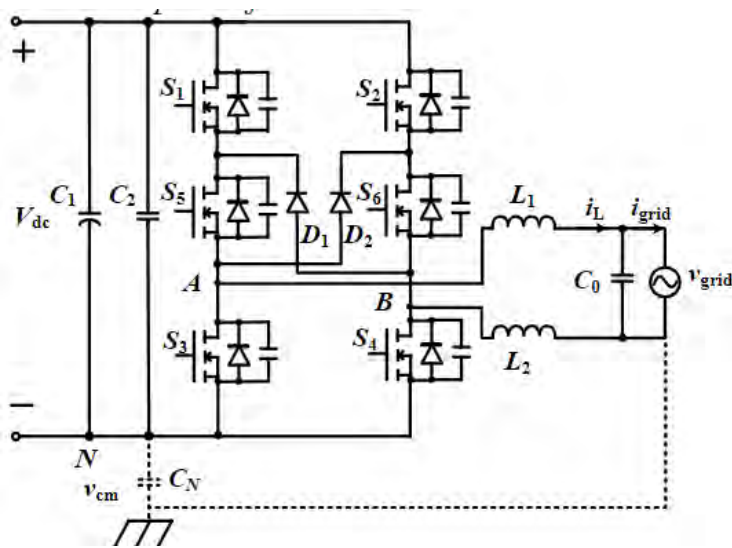


Figura 14. Topología del inversor H6 [32]

[33], se presenta el análisis del inversor sin transformador H6 mejorado y conectado a la red. La frecuencia de conmutación aplicada para este caso fue de 25 kHz (2019).

[34]: se describe el análisis del funcionamiento de la topología H6 con el principio de control de tiempo muerto. Los resultados corresponden a un prototipo con una potencia de 2 kW con el método de control predictivo de tiempo muerto; se reduce significativamente la ondulación

y el THD disminuye en un 3.969% (2020). Los parámetros de simulación para este caso fueron un filtro de segundo orden LC, una capacitancia parásita de 3  $\mu\text{F}$ , y operación con un control PI.

[35]: presenta un diseño y simulación en Matlab de un sistema fotovoltaico con el inversor HERIC. Los resultados que se muestran afirman una estabilidad de tensión en modo común; por lo tanto, se minimiza la corriente de fuga a través de la capacitancia parásita (aunque no se especifica el valor de ésta), manteniendo al mismo tiempo una eficiencia muy alta (2021).

### **3.3 Filtro en inversores sin transformador**

El filtro de potencia que se utilizó en [28] fue un LCL, produciendo una salida alterna de 200 V a 50 Hz. El valor de la capacitancia parásita para la corriente de fuga tenía un valor de 100 nF, todo esto con una frecuencia de conmutación en los interruptores de 10 kHz.

Otro ejemplo son los parámetros con los cuales se desarrolló el inversor de [29], los cuales son: frecuencia de conmutación de los interruptores a 20 kHz y filtro de tercer orden LCL. Como resultado se obtuvo una corriente de fuga de 24.4 mA.

Por otra parte, en [33], se desarrolló un inversor sin transformador con un filtro LC. El resultado obtenido es una corriente de fuga de 25 mA, menor a la topología normal de H6, cumpliendo con la norma alemana.

La Figura 15, muestra las corrientes de fuga y el voltaje de la capacitancia parásita del SFV con la topología HERIC [35]. En este trabajo se usó una modulación SPWM a una frecuencia de 16 kHz. El filtro que se utilizó para este sistema fue de segundo orden LL.



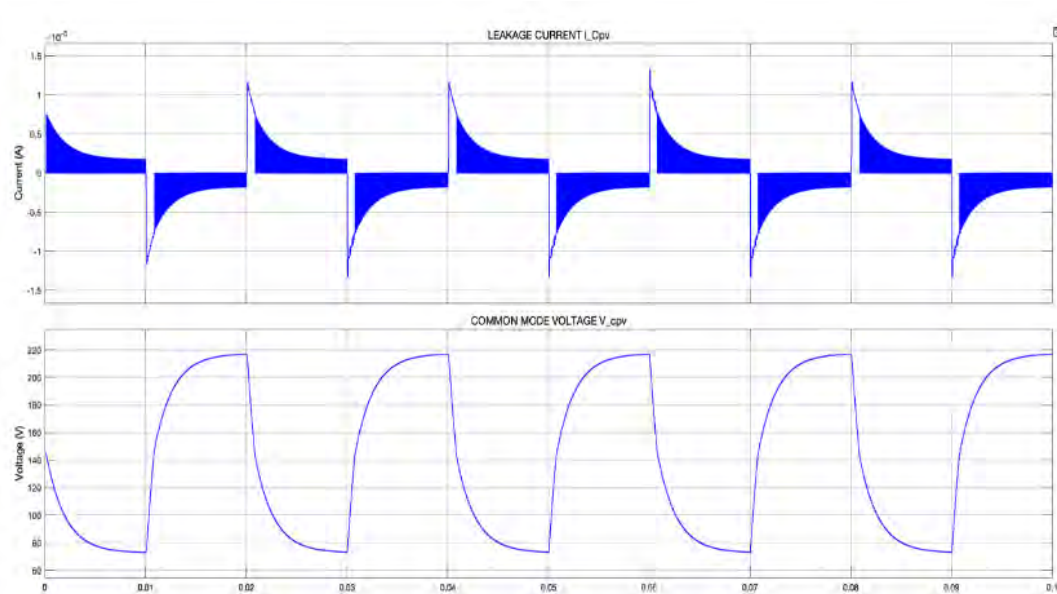


Figura 15. Corriente de fuga y voltaje de la capacitancia del SFV con el inversor HERIC [35]

### 3.4 Técnicas de modulación para inversores sin transformador

Lo relevante de [36] son las pruebas realizadas a un inversor H5 controlado por una modulación de ancho de pulso sinusoidal (SPWM) a una frecuencia de 100 kHz, y con un controlador PI. El resultado de eficiencia fue de 92.58%, utilizando un filtro LCL (2019).

El trabajo realizado en [37] describe una modulación híbrida UP-PWM para un inversor sin transformador tipo HERIC. Los resultados obtenidos muestran que el inversor HERIC aprovecha las ventajas del UP-PWM convencional (2019). Los interruptores para este caso conmutaron a 20 kHz, obteniéndose una forma de onda con un filtro de segundo orden tipo LL.

### 3.5 Conclusión del estado del arte

Los inversores sin transformador tienen un historial bastante bueno en la conversión de energía. De acuerdo a los estudios reportados en la literatura técnica, debido a su volumen reducido han adquirido gran importancia en sistemas fotovoltaicos interconectados a la red

eléctrica, sobre todo en sistemas de baja potencia. Las topologías más populares son H5, H7, H8; HERIC y H6 con sus variantes; algunas satisfacen la norma de corriente de fuga permitida por la norma alemana DIN VDE V 0-126- 1-1, además de ser inversores eficientes y de bajo costo, los que dependen de su aplicación.

Los valores de la capacitancia parásitas van desde los 10 a 100 nF. En algunas casos de estudios se han encontrados valores de 3  $\mu$ F, por tal motivo se recomienda tener un valor promedio de este dispositivo.

Las modulaciones son diferentes en cada caso de estudio. La SPWM es la modulación más utilizada para las topologías sin transformador, gracias a su operación eficiente.

Los reportes de trabajos de investigación que se han desarrollado con inversores sin transformador describen ciertas características. Algunas de éstas son el tipo de modulación aplicada, la eficiencia, la potencia nominal, entre otras. Sin embargo, no se reporta algún trabajo que suministre energía para la demanda de un aparato eléctrico en específico.

Para cumplir con los objetivos del trabajo de investigación, entre las topologías reportados en la literatura técnica se elegirán tres inversores sin transformador para identificar cuál es la mejor opción en un caso específico. La elección será con base en las especificaciones de energía de un aire acondicionado de una tonelada de refrigeración.

Las topologías seleccionadas son la H5, la HERIC y la H6\_II, los cuales se describen a continuación.

### **3.5.1 Topología H5**

La topología de inversor H5 se compone por un inversor puente completo con un quinto interruptor en el riel positivo de bus de CD, el cual separa la fuente de tensión del convertidor de potencia [30], como se muestra en la Figura 16.

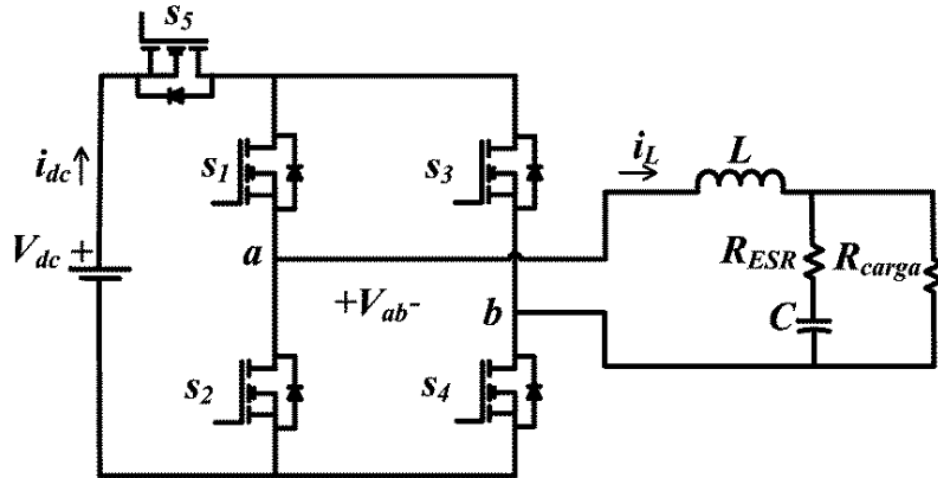


Figura 16. Topología H5 [30]

### 3.5.2 Topología HERIC

El inversor sin transformador HERIC se compone de un inversor puente completo con dos interruptores adicionales (S5 – S6), cada uno incluyendo un diodo en serie [38]. La Figura 17, muestra el diagrama eléctrico de la topología.

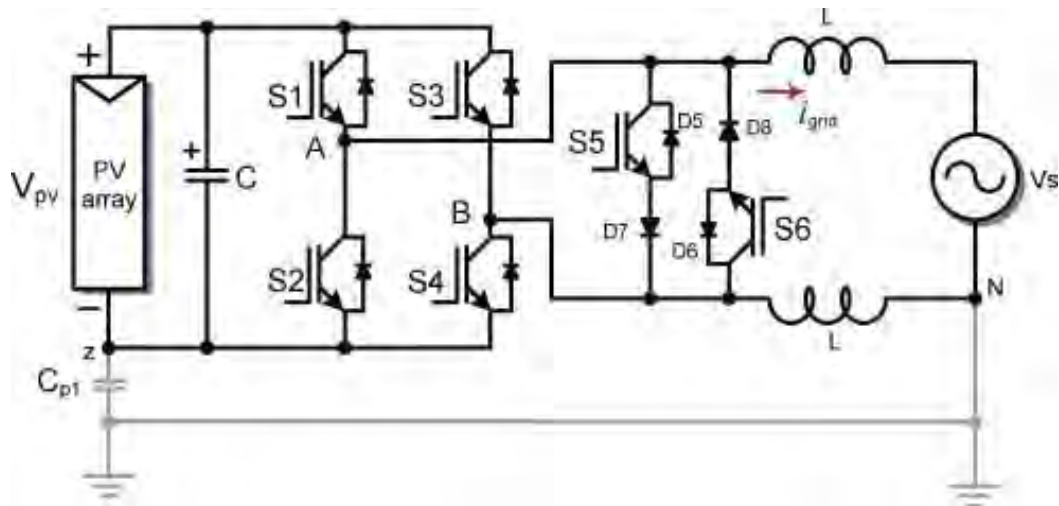


Figura 17. Topología HERIC

### 3.5.3 Topología H6\_II

La topología de inversor H6\_II se deriva de la topología H4 (puente completo convencional) con una ruta de circulación libre [39]. En la Figura 18 se aprecia que la topología está constituida por seis interruptores y dos diodos. A diferencia del inversor H6, en el H6\_II el filtro y la carga están conectados entre los interruptores S1, S3, S5 y S6.

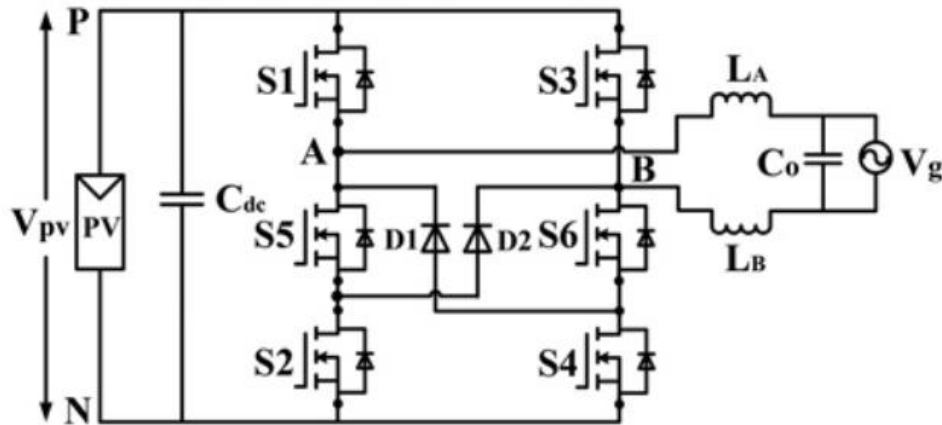


Figura 18. Topología H6\_II [39]

En el capítulo 4 se explican de manera más detallada las topologías, describiéndose sus ventajas y desventajas.

# Capítulo 4 Diseño y Desarrollo

---

Este capítulo describe las actividades que se llevaron a cabo para cumplir con los objetivos y metas establecidas. El desarrollo del trabajo es para comparar los inversores sin transformador. La finalidad del proyecto es desarrollar simulaciones de las topologías cada una por separado para obtener resultados y conclusión del tema investigado. Las simulaciones se llevarán a cabo en la plataforma de Matlab/Simulink. Los inversores, H5, HERIC y H6\_II serán para cubrir la demanda de una AA de 1 TR.

## 4.1 Tensión en el bus de CD

El inversor sin transformador conectado a la red eléctrica deberá satisfacer la demanda de potencia de un aire acondicionado de una tonelada de refrigeración. Dado que se trata de configuraciones reductoras, la entrada en el bus de CD debe ser mayor al voltaje pico de la red eléctrica. La salida tendrá una tensión eficaz de 127 V y forma de onda sinusoidal a 60 Hz.

Si la tensión en el bus de CD fuese suministrada por paneles solares, estos deben ser capaces de suministrar la energía necesaria. Se utiliza la interfaz de MATLAB/Simulink para simular el comportamiento del panel fotovoltaico y así validar las condiciones y márgenes de operación del mismo.

## 4.2 Característica del módulo fotovoltaico

Las Tablas 5 y 6, muestran las características y especificaciones de los módulos fotovoltaicos SunPower SPR-X22-460, bajo el supuesto de que se utilizarán para integrar el arreglo fotovoltaico que proveerá el voltaje de entrada al inversor.

Tabla 5. Datos del módulo fotovoltaico de la marca SunPower SPR-X22-460

Potencia máxima (W)	460.2
Número de celdas por módulo ( $N_{\text{cell}}$ )	128
Voltaje en circuito abierto $V_{\text{oc}}$ (V)	90.5
Corriente en corto circuito $I_{\text{sc}}$ (A)	6.4
Voltaje en el punto de máxima potencia $V_{\text{mp}}$ (V)	76.7
Corriente máxima en el mayor punto $I_{\text{mp}}$ (A)	6
Coefficiente de temperatura de $V_{\text{oc}}$ ( $\%/^{\circ}\text{C}$ )	-0.293
Coefficiente de temperatura de $I_{\text{sc}}$ ( $\%/^{\circ}\text{C}$ )	0.031

Tabla 6. Parámetros del módulo fotovoltaico de la marca SunPower SPR-X22-460

Corriente generada por luz $I_L$ (A)	6.4155
Corriente de saturación del diodo $I_0$ (A)	1.5713e-11
Factor del diodo ideal	1.0304
Resistencia de derivación $R_{\text{sh}}$ (Ohms)	517.0287
Resistencia en serie $R_{\text{s}}$ (Ohms)	0.52628

## 4.3 Gráficas del módulo fotovoltaico

El comportamiento del módulo FV seleccionado se ejemplifica mediante gráficas. A continuación se muestra el comportamiento teórico a diferentes niveles de irradiación solar sobre la celda. La Figura 19(a) ilustra la curva V-I del módulo fotovoltaico (marca SunPower SPR-X22-460), con valores de 1,000, 800, 500, 300 y 100  $\text{W}/\text{m}^2$ . Los puntos de máxima potencia pueden apreciarse en la Figura 19(b).

Tipo de módulo: Sunpower SPR-X22-460

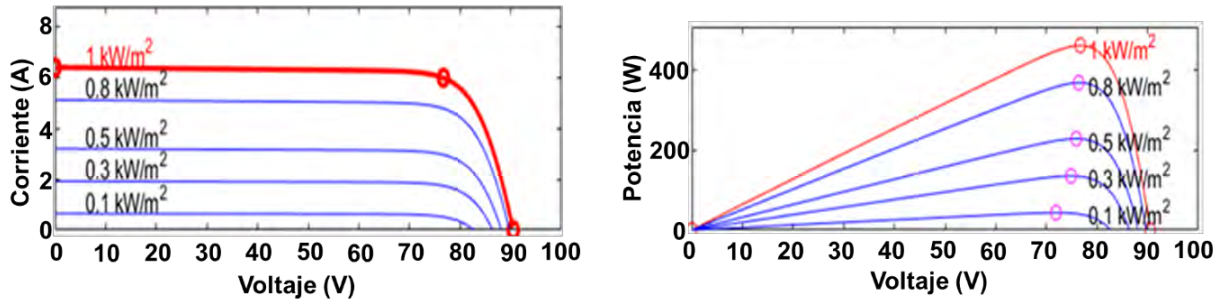


Figura 19. (a) Curva V-I del módulo fotovoltaico (b) Curva de potencia del módulo fotovoltaico

## 4.4 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el aire acondicionado de 1 TR

Al considerar el consumo de energía en el aparato de aire acondicionado de 1 tonelada de refrigeración, es posible calcular el consumo durante un día de operación (funcionamiento del dispositivo de comodidad térmica). Por otro lado, considerando la potencia generada por el panel solar mencionado en el apartado anterior, se puede calcular la potencia fotovoltaica y la cantidad de módulos FV a utilizar.

Sean  $P_{aire}$  la potencia del aparato de aire acondicionado y  $h_{tra}$  las horas de operación diarias correspondientes. La energía  $E_{cond}$  que consume el AA durante un día puede calcularse mediante:

$$E_{cond} = P_{aire} * h_{tra} \quad (1)$$

Es los trabajos [2]–[4] informan que la energía que consume un aire acondicionado de una tonelada de refrigeración es de 31,651.74 Wh durante nueve horas de operación (tiempo promedio de funcionamiento diario). En cada caso de estudio se calculó la energía consumida y, mediante ello, el dimensionamiento fotovoltaico para sustituir el consumo por medio de energía renovable.

La potencia fotovoltaica necesaria  $P_{PV}$  se calcula dividiendo la energía consumida por el dispositivo entre las horas pico de sol  $h_{solpic}$  mediante:

$$P_{PV} = E_{cond} / h_{solpic} \quad (2)$$

Sean  $P_{pan}$  la potencia de cada uno de los paneles solares que se utilizarán. El número de paneles  $N_{pan}$  que se necesitan para satisfacer la demanda del aparato de aire acondicionado puede determinarse mediante:

$$N_{pan} = P_{PV} / P_{pan} \quad (3)$$

Se mencionó que el aparato de aire acondicionado tiene una potencia de 3.516 kW. Suponiendo  $h_{tra} = 9$  horas, se obtiene una energía diaria de:

$$E_{cond} = 3,516 \text{ W} * 9 \text{ horas} = 31,644 \text{ Wh}$$

Se estima que  $h_{solpic}$  es de 5 horas. Entonces:

$$P_{PV} = 31,644 \text{ Wh} / 5 \text{ horas} = 6,328.8 \text{ W}$$

Por su parte, el modelo de panel fotovoltaico a usar tiene una potencia de 460.2 W. Así pues:

$$N_{pan} = 6,328.8 \text{ W} / 460.2 \text{ W} = 13.75$$

Redondeando al entero inmediato superior:

$$N_{pan} \cong 14 \text{ paneles}$$

Con 14 paneles se obtiene una potencia total de 6.442 kW. Además de la temperatura y la irradiación, la magnitud del voltaje de salida del sistema fotovoltaico depende de la manera en la que se distribuyen los paneles solares. Los posibles arreglos fotovoltaicos para este trabajo se muestran en la Tabla 7; en primera instancia se toma la combinación número dos, ya que cumple con la característica de tener un voltaje mayor al de la red eléctrica.

La tensión en el bus de CD será de 153.4 V, con una potencia a 6,442.8 W. Debido a que el proyecto se quedará en simulación, el voltaje de entrada se representará con una fuente de CD.



Tabla 7. Posibles arreglos fotovoltaicos para la interconexión a la red

Opción	Serie	Paralelo	Voltaje (V)	Corriente (C)
1	1	14	76.7	84
2	2	7	153.4	42
3	7	2	536.9	12
4	14	1	1,073.8	6

## 4.5 Inversores sin transformador H5, HERIC y H6\_II

El objetivo del trabajo de tesis es comparar tres inversores sin transformador, los cuales deben tener la capacidad de satisfacer la demanda energética de un aparato de aire acondicionado de una tonelada de refrigeración. Las topologías seleccionadas para este proyecto son H5, HERIC y H6\_II; éstos se eligieron porque en la actualidad existen muchos trabajos relacionados con estos inversores en sistemas fotovoltaicos, ya sea en simulación o implementación.

Las topologías H5, HERIC y H6\_II, se evaluarán a las mismas condiciones de carga y potencia para poder compararlas [24], [40]. Los resultados ayudarán a elegir la mejor opción para implementarlo en un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica.

A continuación, se describen los inversores sin transformador a simular.

### 4.5.1 H5

El inversor H5 es una topología *TLI* que está compuesta por cinco interruptores [29], [30], [41]. Es una variante del puente H con un quinto interruptor en el riel positivo de la tensión del  $V_{FV}$ , tal como se muestra en la Figura 20. En los últimos años ha tenido un crecimiento en la integración de SFV, debido a su eficiencia. El inversor cuenta con dos interruptores que trabajan a baja frecuencia (frecuencia de línea), y puede aplicarse la conmutación monofásica, tanto unipolar como bipolar [41].

Sean  $L_1$  el inductor 1 del filtro,  $C_{PV}$  la capacitancia del sistema fotovoltaico,  $V_{PE}$  la tensión en la capacitancia parasita y  $V_{FV}$  el voltaje de salida del arreglo fotovoltaico. Este tipo de inversor tiene dos propiedades esenciales en su funcionamiento:

- Impide el intercambio de potencia reactiva entre el  $L_1$  y  $C_{PV}$  durante el periodo de tensión cero, evitando que se produzca una resonancia entre ellos, incrementado así la eficiencia de este.
- El quinto interruptor aísla el módulo fotovoltaico de la red eléctrica durante el estado cero de tensión, evitando de igual forma la producción de la resonancia en  $V_{PE}$ .

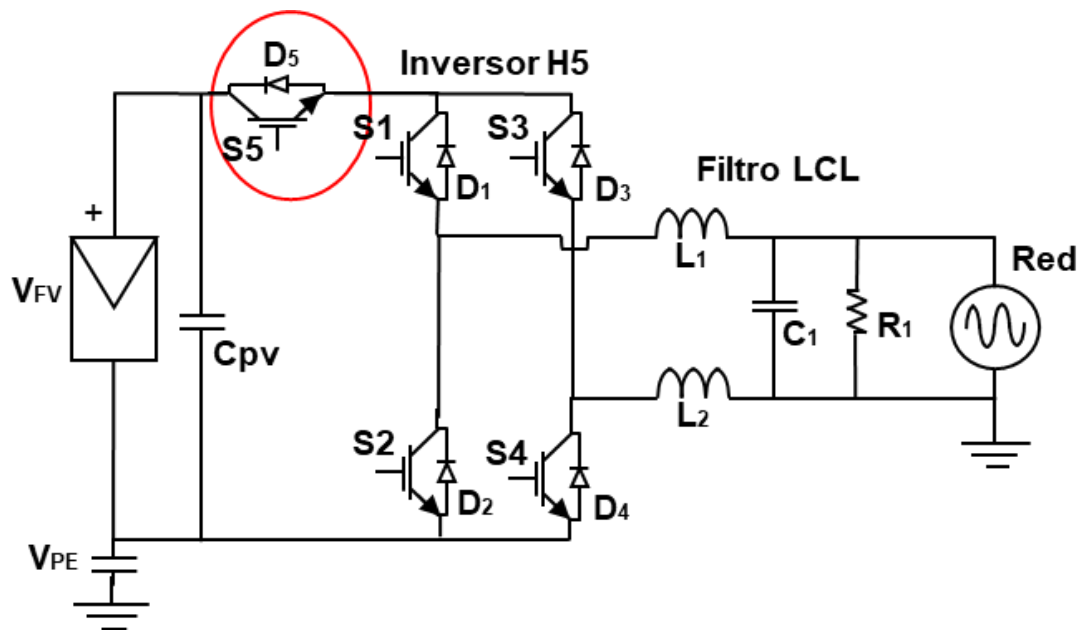


Figura 20. Inversor sin transformador H5

Los estados de conmutación para los semiciclos positivo y negativo se muestran en las Figura 21 a 24. Las principales características de este inversor son:

- S5, S4 y S2 son interruptores que conmutan a alta frecuencias, mientras que S1 y S3 lo hacen a la frecuencia de la red.
- Es posible obtener dos estados de tensión cero a la salida, ambos con S5 apagado.
- Se reporta una eficiencia del 98 %.

El inversor H5 se activa de la siguiente manera. La conmutación de alta frecuencia es realizada entre los interruptores S4 y S5, los cuales se activan para tener un voltaje positivo en la carga. El interruptor S1 se encenderá y el flujo de corriente se realizará de S1 a S5 y regresaría a través de S4, todo cuando S2 y S3 permanecen desactivados (véase la Figura 21).

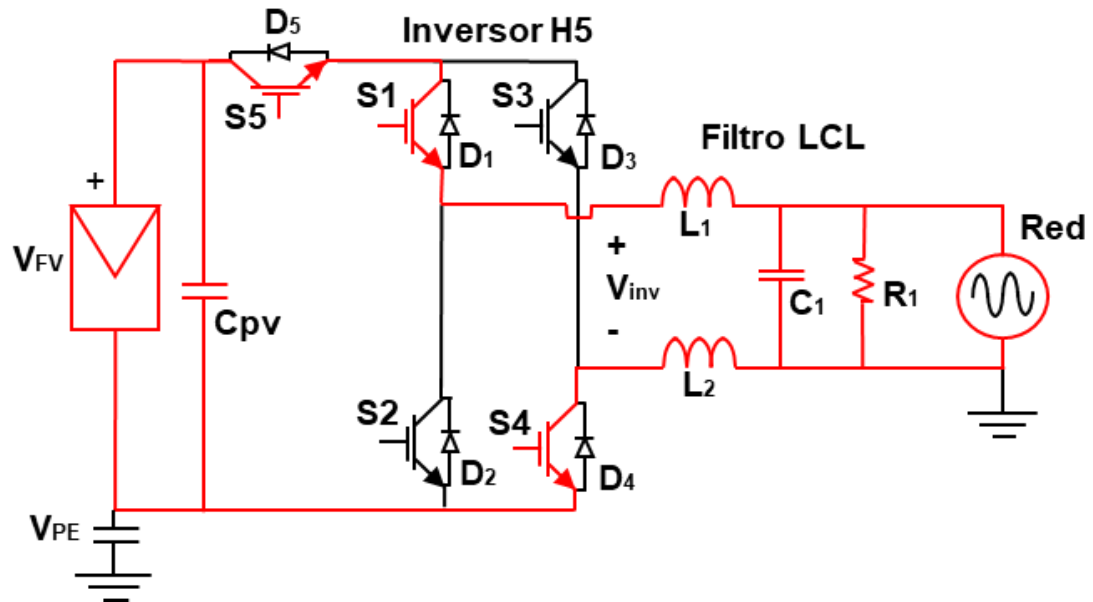


Figura 21. Tensión  $V_{inv}$  en H5 con S5, S1 y S4 encendidos  
S5 y S4 conmutan a alta frecuencia y S1 conmuta a frecuencia de línea

Con S2 y S3 desactivados, durante el lapso de voltaje cero en la carga S4 y S5 se mantienen apagados; la ruta de la corriente pasa libre a través de S1 y D3, como se muestra en la Figura 22.

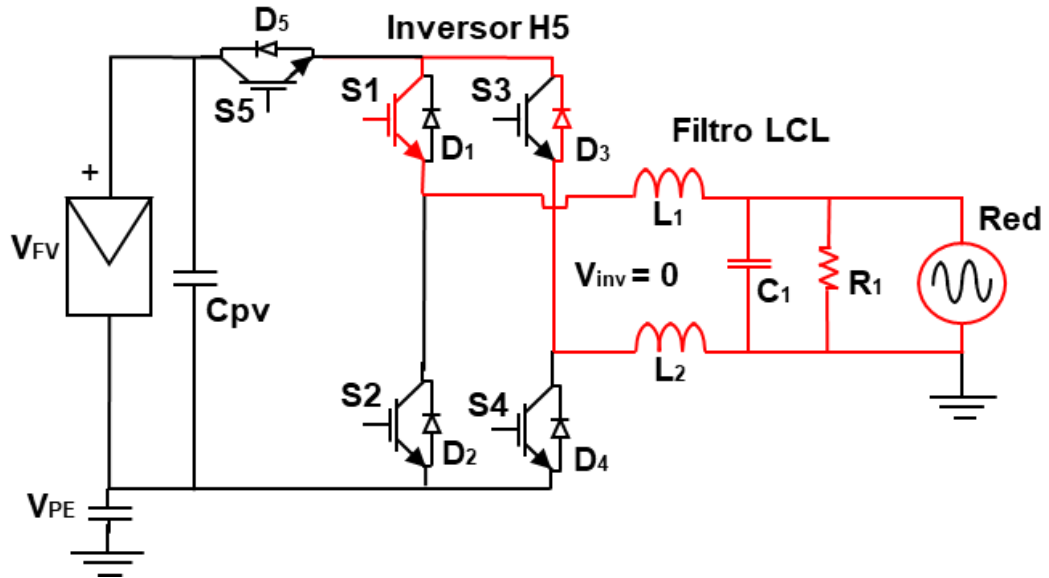


Figura 22. Tensión 0 en H5 con S5 y S4 apagados, S1 y D3 encendidos

Para el voltaje negativo, S1 se apaga y S3 se enciende, mientras que la conmutación de alta frecuencia sucede entre los interruptores S2 y S5. El flujo de corriente se lleva a cabo de S5 a S3 y regresa a través de S2 (véase la Figura 23).

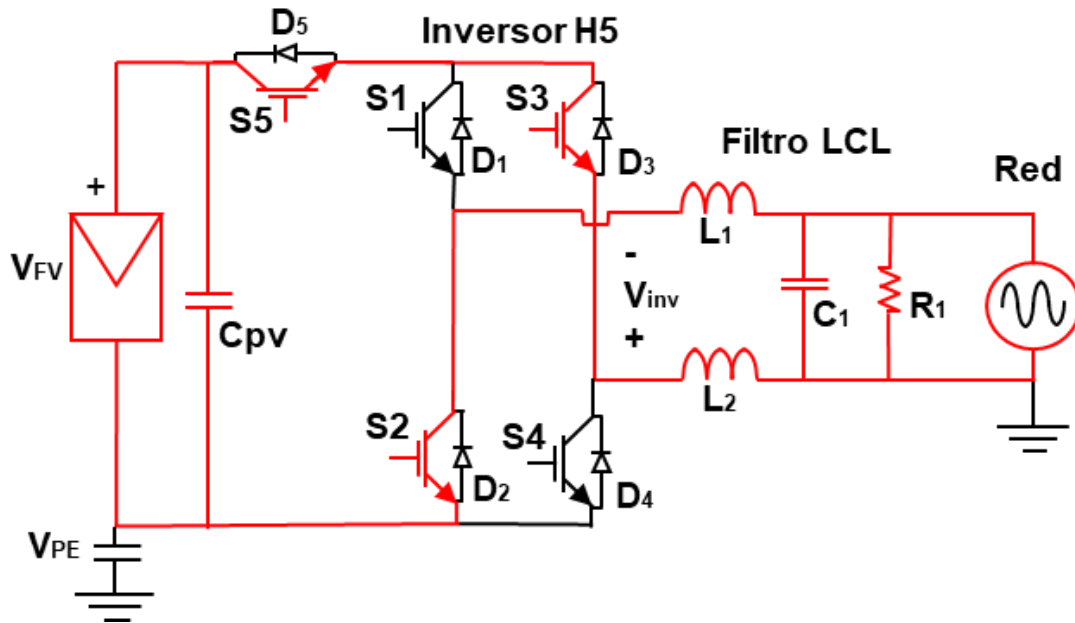


Figura 23. Tensión  $-V_{inv}$  en H5 con S5, S2 y S3 encendidos  
S5 y S2 conmutan a alta frecuencia; S3 conmuta a frecuencia de línea

A continuación, S5 y S2 se apagan, durante el segundo lapso de voltaje cero; la corriente fluye libre a través de S3 a D1 como se muestra en la Figura 24.

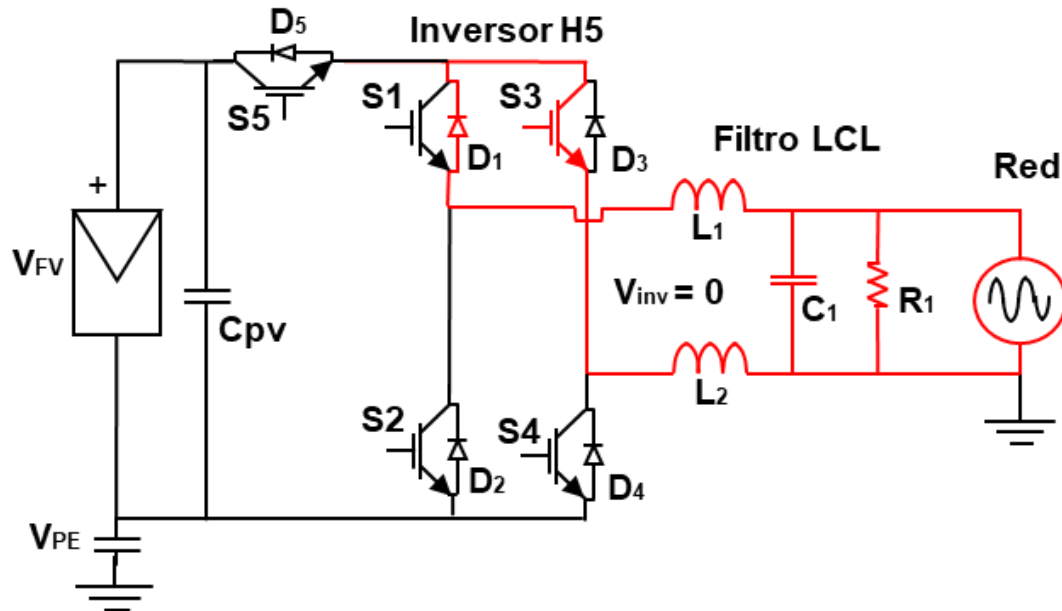


Figura 24. Tensión 0 en H5 con S5 y S2 apagados, D1 y S3 encendidos

El inversor H5 se ha simulado en la plataforma de Matlab/Simulink (véase en la Figura 25, el esquema), con la finalidad de validar su comportamiento. Las condiciones de la carga corresponden a las de un aparato de AA.

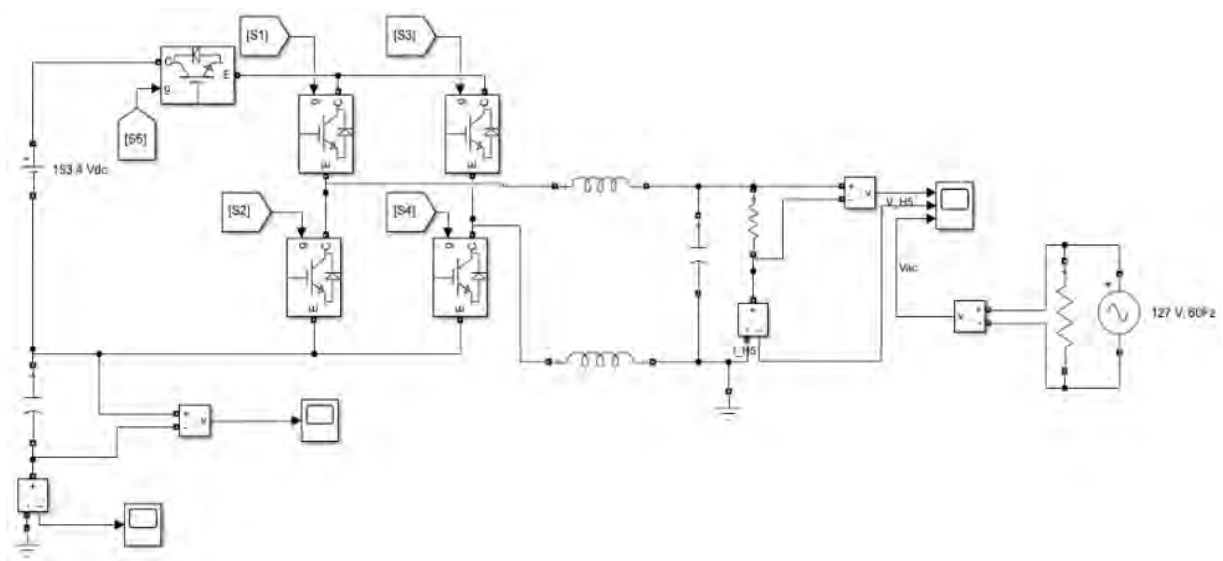


Figura 25. Circuito eléctrico de H5 en Matlab/Simulink

La modulación aplicada para el inversor sin transformador H5 fue Modulación Sinusoidal del Ancho de Pulso (del inglés *Sinusoidal Pulse Width Modulation*) bipolar; el esquemático de la simulación se muestra en la Figura 26. La señal de encendido de S3 es la complementaria de la que se aplica al interruptor S1; los dos transistores trabajan a frecuencia de línea, S2 y S4 trabajan a alta frecuencia. En cuanto a S5, siempre está conmutando al ser la suma de los dos interruptores anteriores (S2 y S4).

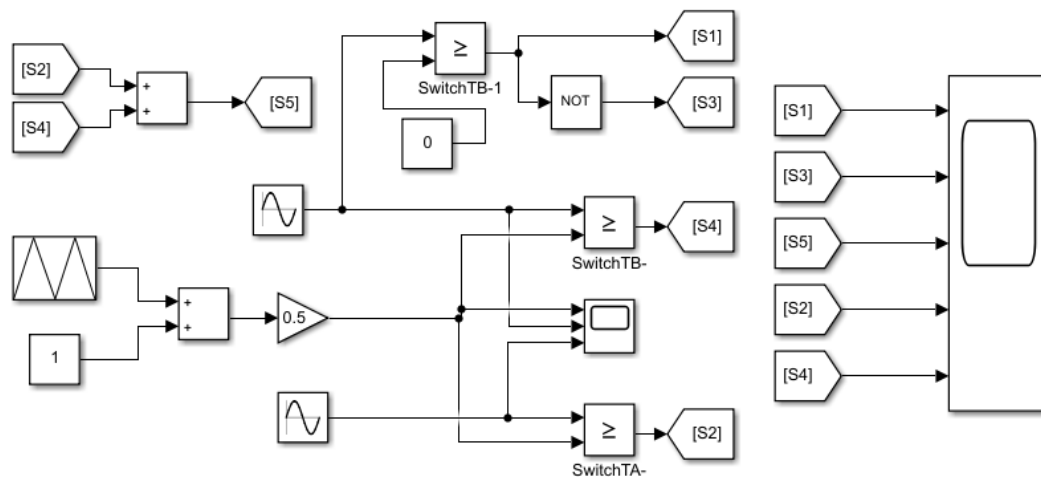


Figura 26. Modulación SPWM bipolar para la topología H5

## 4.5.2 HERIC

La topología *Highly Efficient and Reliable Inverter Concept*, abreviada como *HERIC*, es un inversor sin transformador que puede operar con la modulación unipolar o con la bipolar [28], [35], [42]. Se deriva del convertidor puente completo, en el que se añade una rama de *bypass* en el lado de CA usando dos Transistores Bipolares de Puerta Aislada (*Insulated Gate Bipolar Transistors*, por sus iniciales en inglés), véase la Figura 27. La rama de *bypass* tiene como principal función cortocircuitar la carga durante los instantes en los que no existe intercambio de energía entre los lados de CD y CA [37], [38], [43]–[45], con lo que se evita la resonancia entre el inductor del filtro y la capacitancia parásita del panel. Dos interruptores del puente H conmutan a baja frecuencia y los otros dos a la frecuencia de la portadora de la modulación. Al no contar con transformador, esta topología de inversor tiene un precio reducido [46], [47].

El *bypass* de CA proporciona las mismas dos funciones esenciales que el quinto interruptor de la topología H5:

- Evita el intercambio de potencia reactiva entre  $L_1$  y  $C_{PV}$  durante el estado cero de tensión, incrementando así su eficiencia.
- Aísla el módulo fotovoltaico de la red durante el estado cero de tensión, eliminando así la resonancia en  $V_{PE}$ .

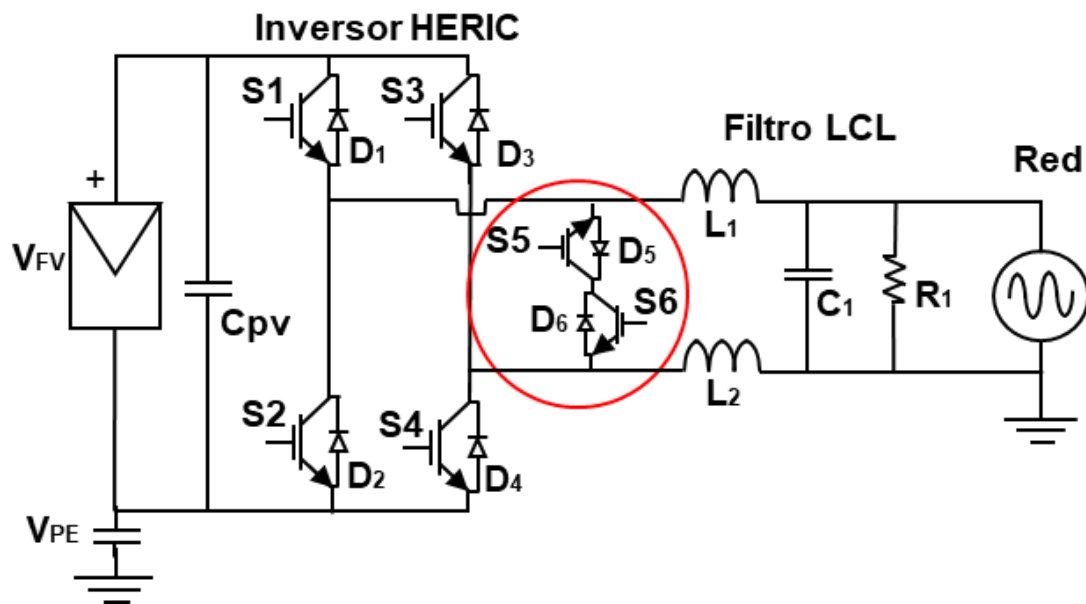


Figura 27. Inversor sin transformador HERIC

Los estados de conmutación de los interruptores para los semiciclos positivo y negativo se muestran en las Figuras 28 a 31. Las características primordiales de este inversor son:

- S1 - S4 y S2 - S3 son interruptores que se activan a frecuencia de conmutación, mientras que S5 y S6. se encienden según la polaridad del voltaje de la red.
- Es posible obtener dos estados de tensión cero a la salida con S5 y S6 encendidos, siempre que el puente H esté desconectado.
- Se reporta una eficiencia del 97 %.

El inversor opera de la siguiente manera. Durante la media onda positiva de la tensión de red, S6 está activo, S1 y S4 se activan simultáneamente a la frecuencia de conmutación, suministrando un voltaje positivo a la carga, todo cuando S5, S2 y S3 permanecen desactivados (véase la Figura 28).

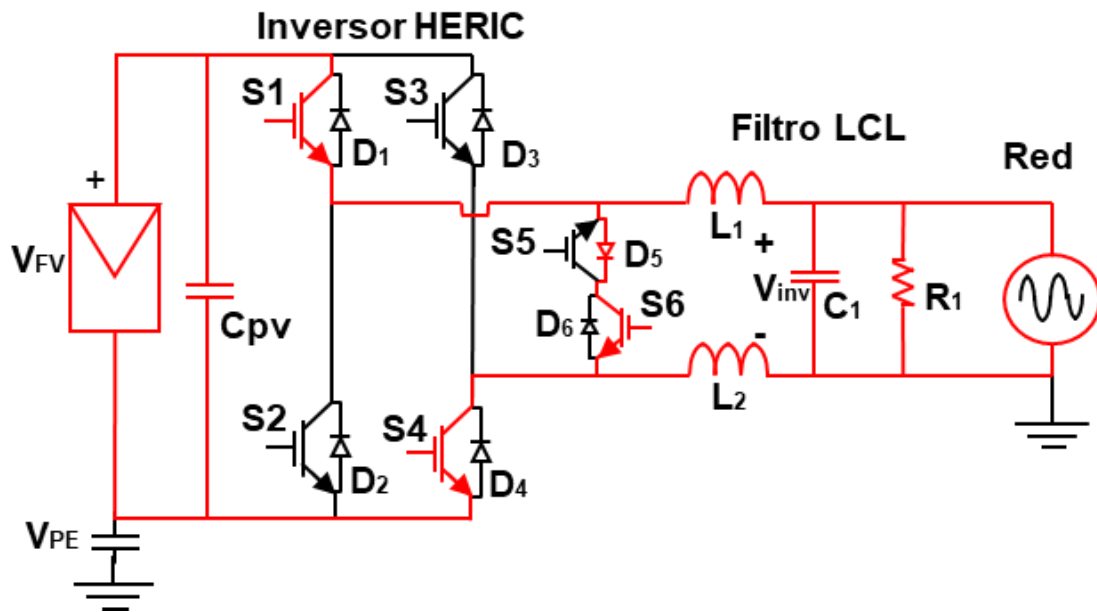


Figura 28. Tensión  $V_{inv}$  en HERIC con S1, S4 y S6 encendidos. S1 y S4 conmutan a alta frecuencia y S6 conmuta a frecuencia de línea

Mientras S2 y S3 están desactivados, la tensión cero en la carga se obtiene cuando S1 y S4 se apagan y la corriente fluye a través de S6 y D5, este es el periodo de libre circulación, tal como se muestra en la Figura 29.



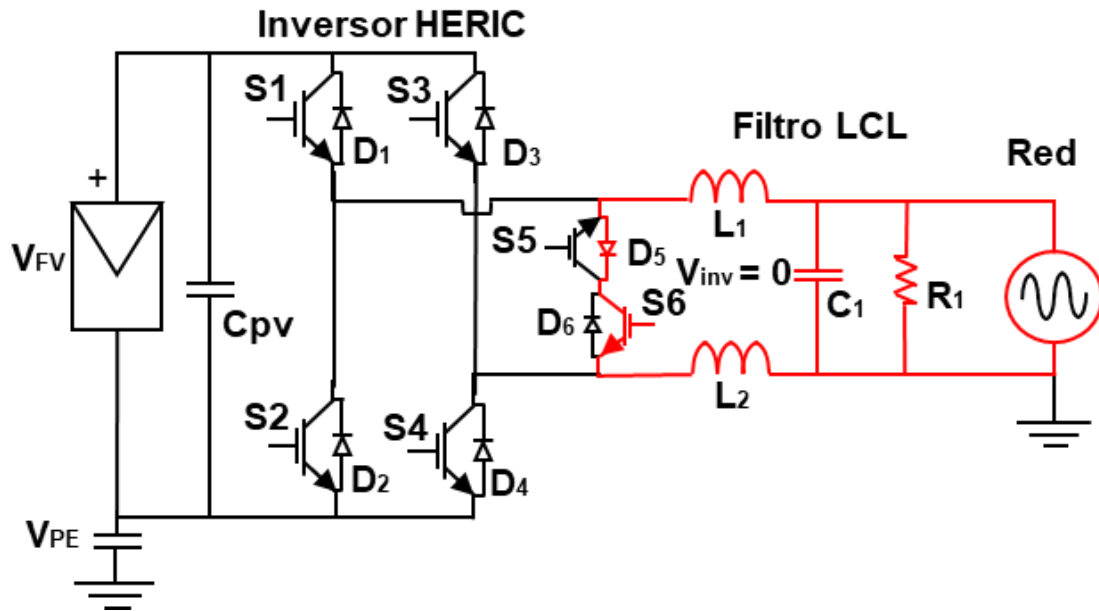


Figura 29. Tensión 0 en HERIC con S1 y S4 apagados, S6 y D5 encendidos

Por el contrario, cuando la tensión de red es negativa, S6 se apaga y S5 se enciende, mientras que S2 y S3 conmutan a la frecuencia de conmutación. En este período, durante la media onda negativa S2 y S3 están encendidos (véase la Figura 30).

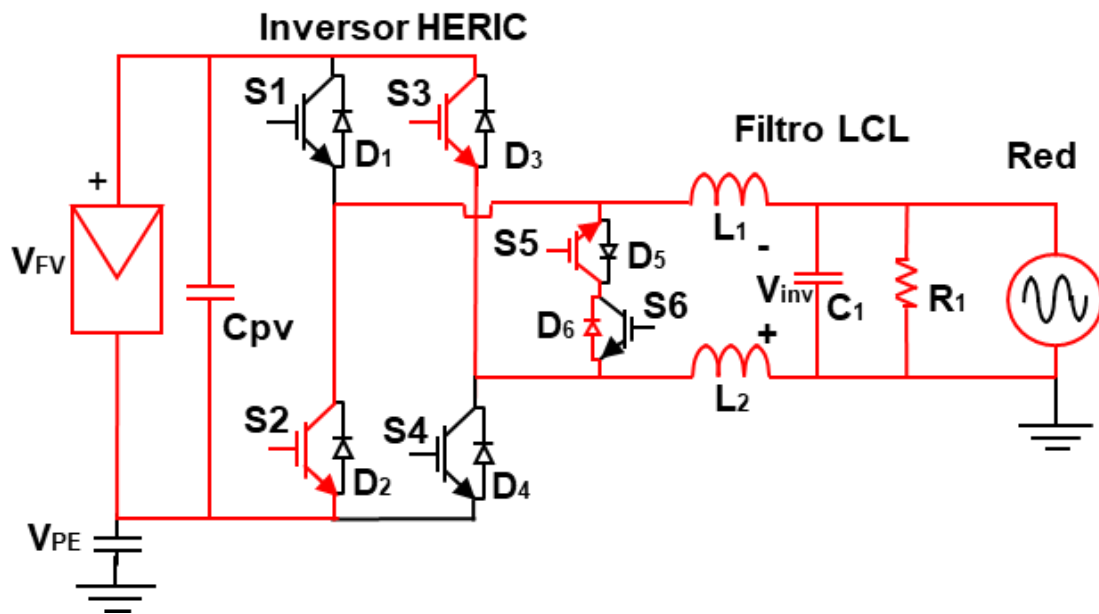


Figura 30. Tensión  $-V_{inv}$  en HERIC con S2, S3 y S5 encendidos S2 y S3 conmutan a alta frecuencia y S5 conmuta a frecuencia de línea

Luego, cuando S2 y S3 se apagan, el voltaje cero está presente en la carga, en ese momento, la corriente fluye a través de S5 y D6 [28], tal como se ve en la Figura 31.

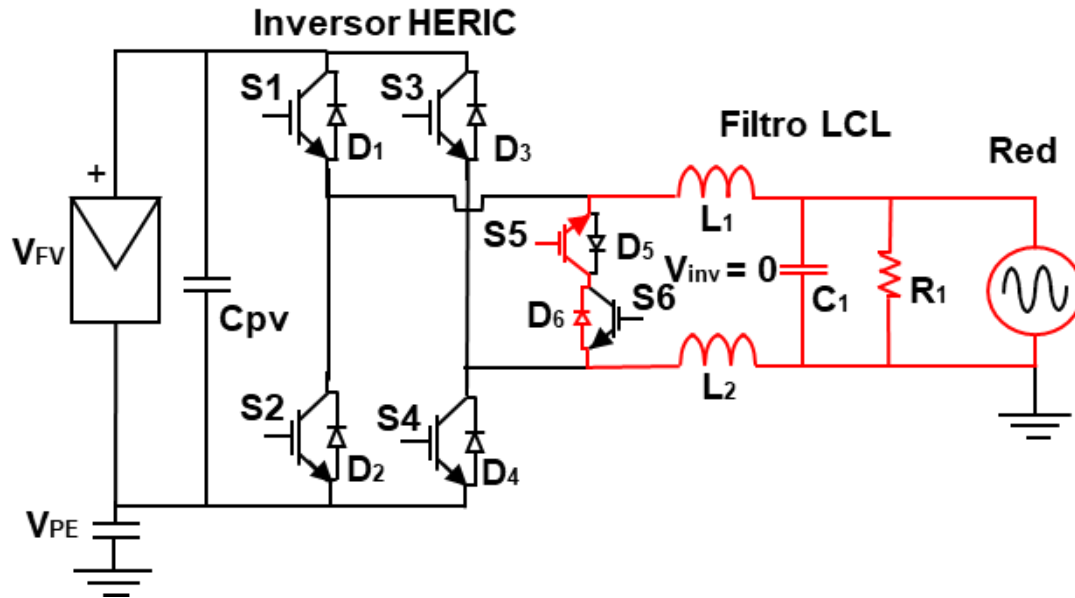


Figura 31. Tensión 0 en HERIC con S2 y S3 apagados, S5 y D6 encendidos

Al igual que el inverso H5, el inversor HERIC se ha simulado en la plataforma Matlab/Simulink (véase la Figura 32). El propósito fue validar el buen funcionamiento de la topología. Los valores de potencia no se modificaron, con la finalidad de evaluar los inversores en igualdad de condiciones. La carga a la salida del filtro corresponde a la del aire acondicionado, con el fin de visualizar la comparación de la tensión que se inyecta a la red eléctrica.

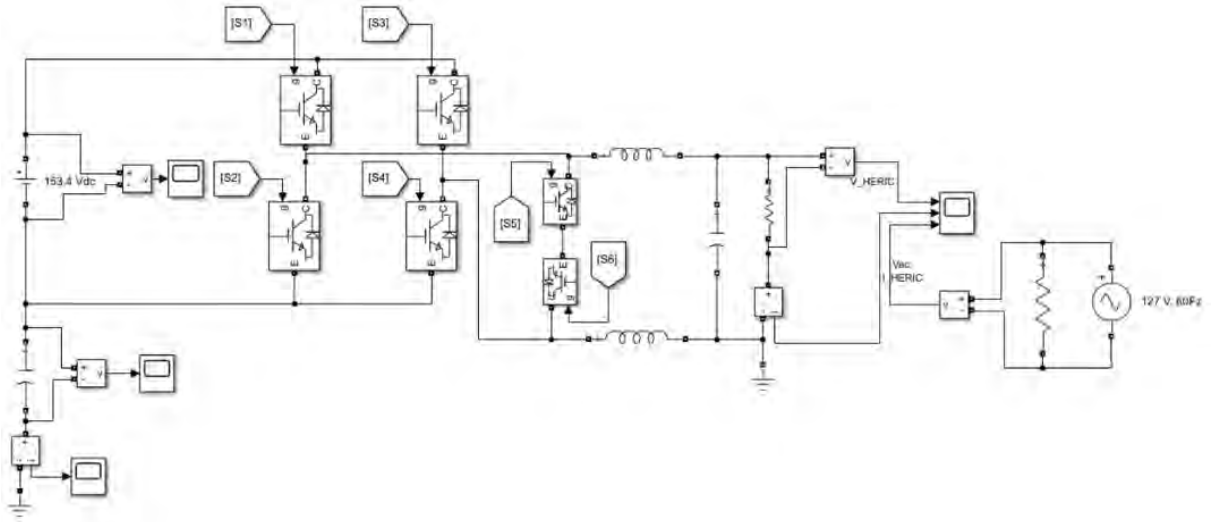


Figura 32. Circuito eléctrico del SFV con inversor HERIC en Matlab/Simulink

Los interruptores de HERIC conmutan siguiendo la modulación SPWM bipolar, al igual que la topología H5 (véase la Figura 33). Por otro lado, la activación de los transistores del inversor HERIC se realiza de manera un poco distinta en comparación con la topología H5. En el convertidor HERIC, los interruptores tienen un tiempo de descanso (no se están activando). Por otro lado, los interruptores S1 y S4 conducen a la par, al igual que S2 y S3.

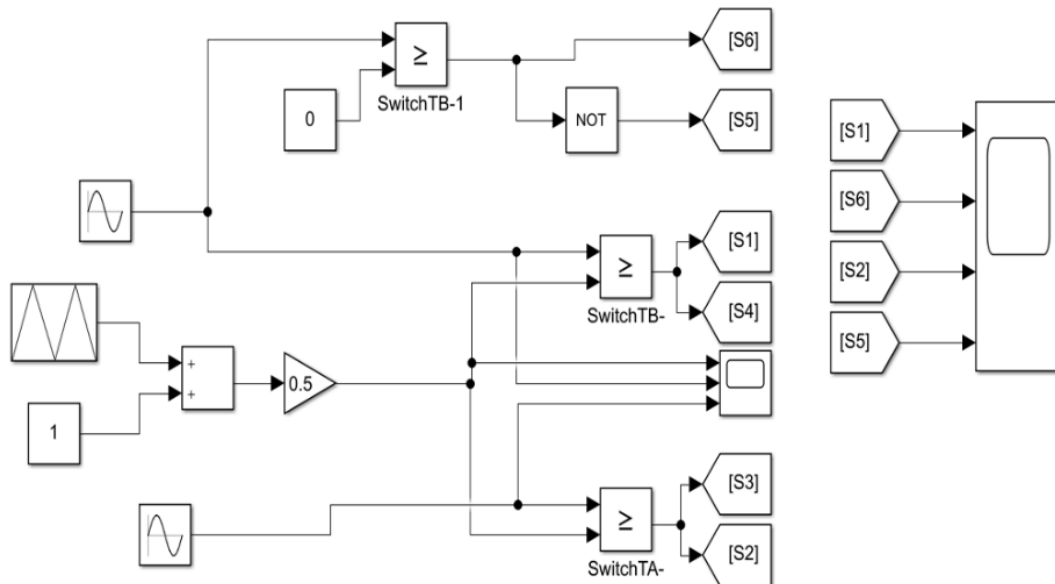


Figura 33. Modulación SPWM para la activación de los interruptores del inversor HERIC

### 4.5.3 H6\_II

En la Figura 34 se muestra el inversor sin transformador de tipo H6\_II. La topología se deriva de la topología H6 y del puente H convencional con una ruta de circulación libre [33], [34], [48]. Este inversor se conforma por seis interruptores (S1 a S6) y dos diodos (D7 y D8) [39], [48].

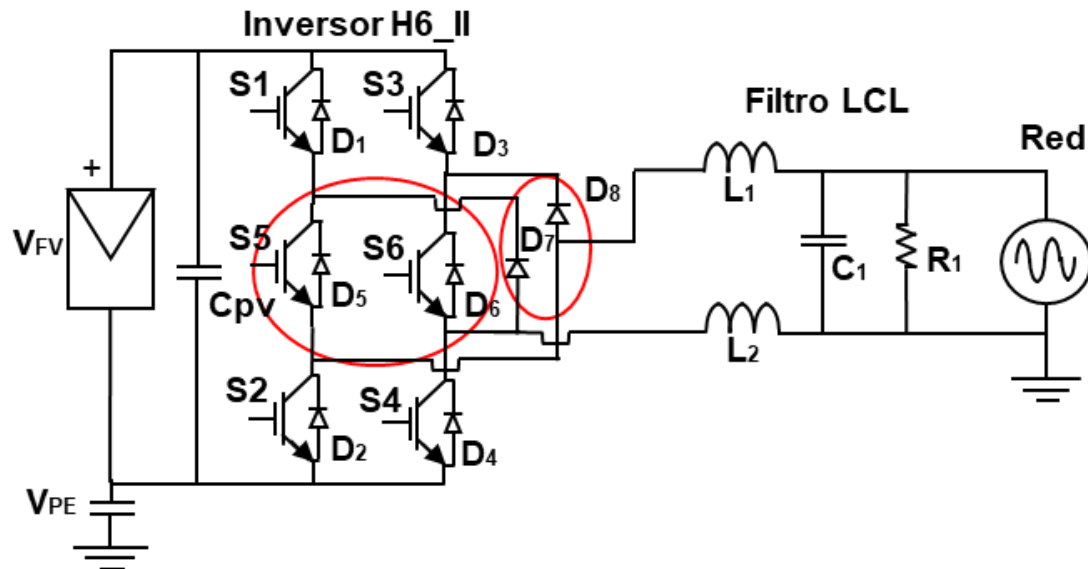


Figura 34. Inversor sin transformador H6\_II

Los interruptores S1 al S4 conmutan a la frecuencia de la portadora, mientras que S5 y S6 conmutan a la frecuencia de línea. La topología H6\_II, tiene una alta eficiencia y puede suprimir con eficacia la corriente de fuga [49], [50]. Además:

- El interruptor S6 siempre se enciende durante el semiciclo positivo de corriente a la red eléctrica.
- El interruptor S5 siempre se activa durante el semiciclo negativo de corriente a la red eléctrica.

Al conmutar los interruptores del inversor H6\_II se genera en la carga una tensión positiva o negativa. Las Figura 35 a la Figura 38, muestran la activación de los transistores, lo mismo

que las trayectorias por donde circula la corriente. Las principales características de esta topología son:

- S1, S2, S3, S4 son interruptores que conmutan a frecuencias altas, S5, S6 conmutan a frecuencia de línea, D7 y D8 son diodos de bypass.
- Es posible obtener dos estados de tensión cero a la salida con S5, S6, D7 y D8 encendidos, siempre que S1, S2, S3 y S4 estén abiertos.
- Se reporta una eficiencia del 98 %.

El inversor H6\_II se activa como se describe a continuación. Durante el medio ciclo positivo de la red, el interruptor S5 permanece encendido, mientras que S1 y S4 conmutan a la frecuencia de conmutación SPWM, para tener un voltaje positivo a la carga. Los interruptores S3, S2, S6, D7 y D8 permanecen desactivados (véase la Figura 35).

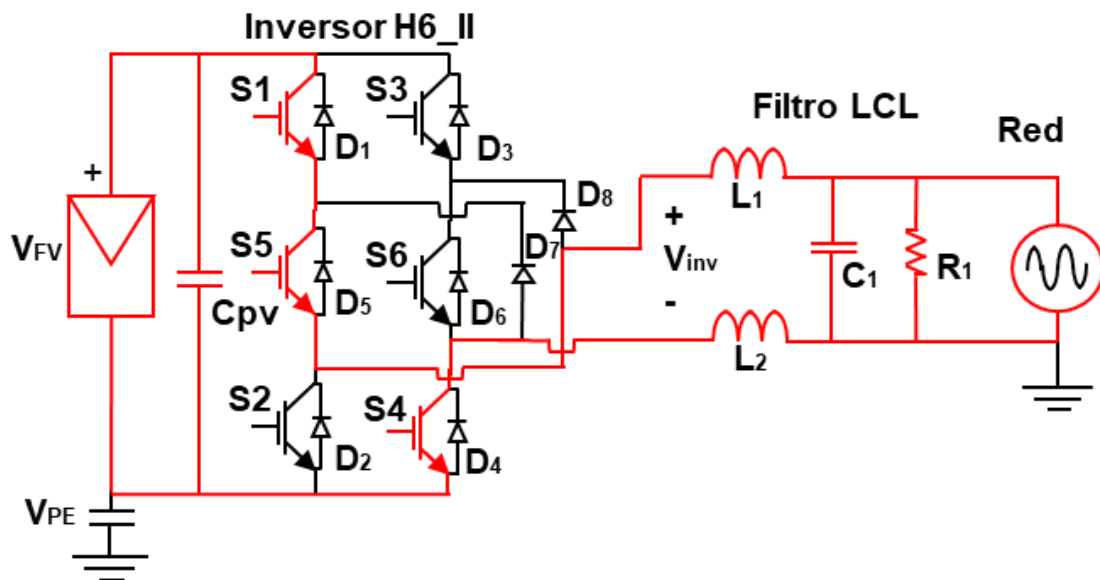


Figura 35. Tensión  $V_{inv}$  en H6\_II con S1, S5 y S4 encendidos. S1 y S4 conmutan a alta frecuencia y S5 conmuta a frecuencia de línea

La tensión cero sucede cuando S1 y S4 están desactivados, la corriente circula libre por S5 y D7, como se puede apreciar en la Figura 36.

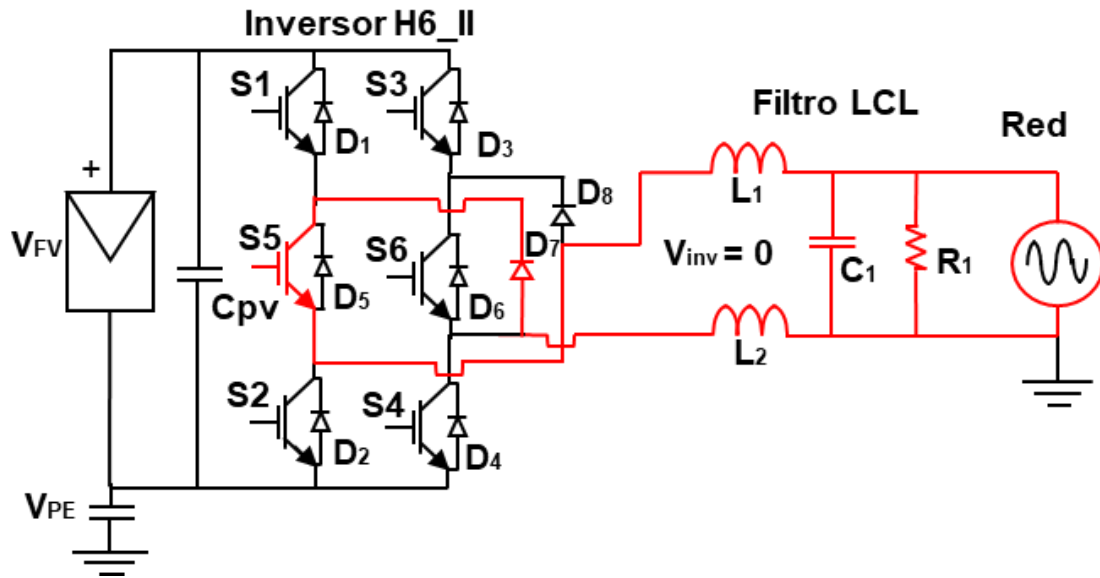


Figura 36. Tensión 0 en H6\_II con S1 y S4 apagados, S5 y D7 encendidos

De manera complementaria, cuando la tensión de la red es negativa, S5 se apaga y S6 se activa, mientras que S3 y S2 conmutan a frecuencia de conmutación. La tensión de salida es negativa durante este periodo (véase la Figura 37).

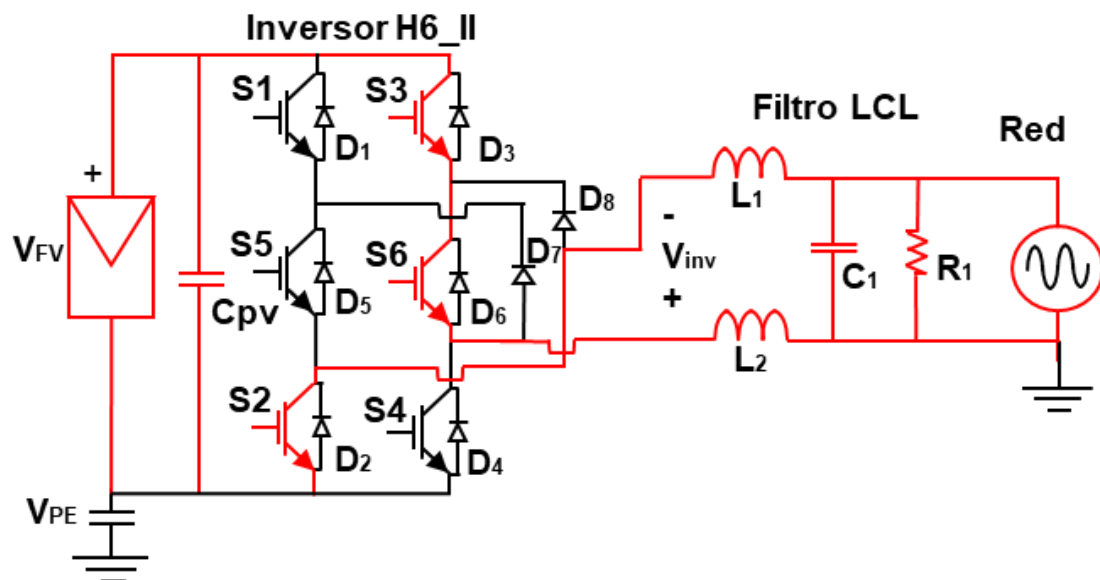


Figura 37. Tensión  $-V_{inv}$  en H6\_II con S3, S6 y S2 encendidos. S2 y S3 conmutan a alta frecuencia y S6 conmuta a frecuencia de línea

La segunda tensión cero sucede cuando S3 y S2 se apagan, mientras S6 y D8 estén activados la corriente fluye libre a través de ellos (véase la Figura 38).

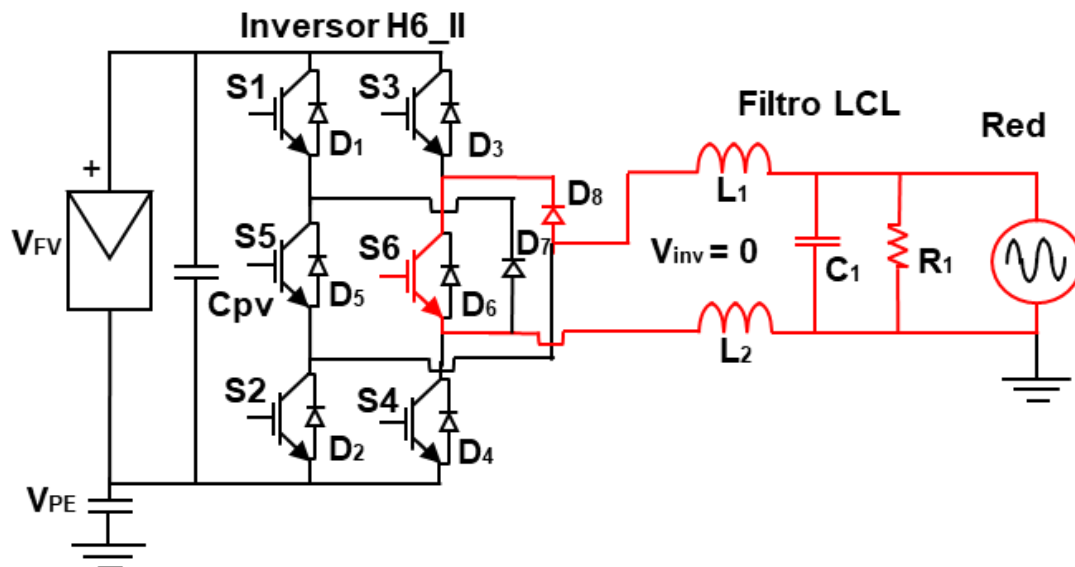


Figura 38. Tensión 0 en H6\_II con S2 y S3 apagados, S6 y D8 encendidos

La Figura 39 muestra el circuito del inductor H6\_II desarrollado en la plataforma Matlab/Simulink. La topología se ha simulado con el propósito de visualizar su comportamiento. Las condiciones eléctricas son similares a los dos circuitos anteriores.

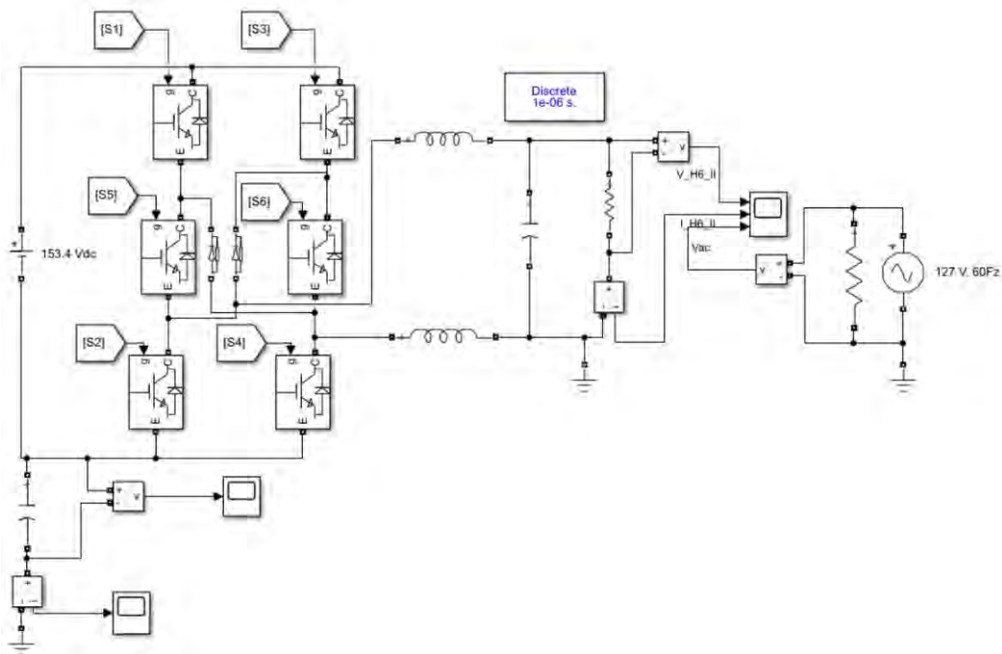


Figura 39. Circuito eléctrico del inductor H6\_II en la plataforma Matlab/Simulink

La modulación para el inversor H6\_II es similar al HERIC, con un ligero cambio de posición de los interruptores (véase la Figura 40). La topología usa una modulación SPWM bipolar. S1 se activa al mismo tiempo que S4, S2 conmuta igual que S3, mientras que S5 y S6 conmutan de manera alternada.

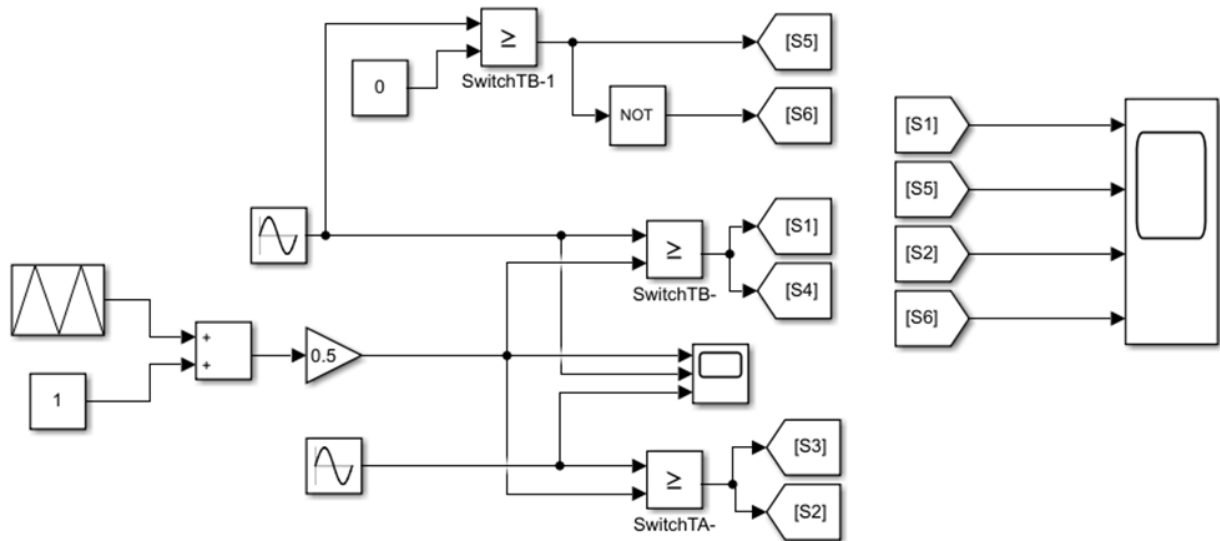


Figura 40. Modulación de los interruptores en el inversor H6\_II

## 4.6 Cálculo del filtro LCL

El filtro eléctrico es un circuito que atenúa una frecuencia o rango de frecuencias. En [24] se describen y consideran los filtros pasivos L, LC y LCL. El filtro de tercer orden LCL se muestra en la Figura 41; en términos de atenuación tiende a ser mejor que los L y LC, de primero y segundo orden respectivamente [51].

El filtro LCL debe seleccionarse de acuerdo a la corriente absorbida por la carga conectada a la salida [52]. Como se mencionó en el capítulo 2, el límite de distorsión armónica se especifica en la norma IEEE 519, la cual indica que la distorsión armónica no debe superar un porcentaje del 3 %. Al tenerse una distorsión armónica menor, la interconexión a la red eléctrica es más sencilla.



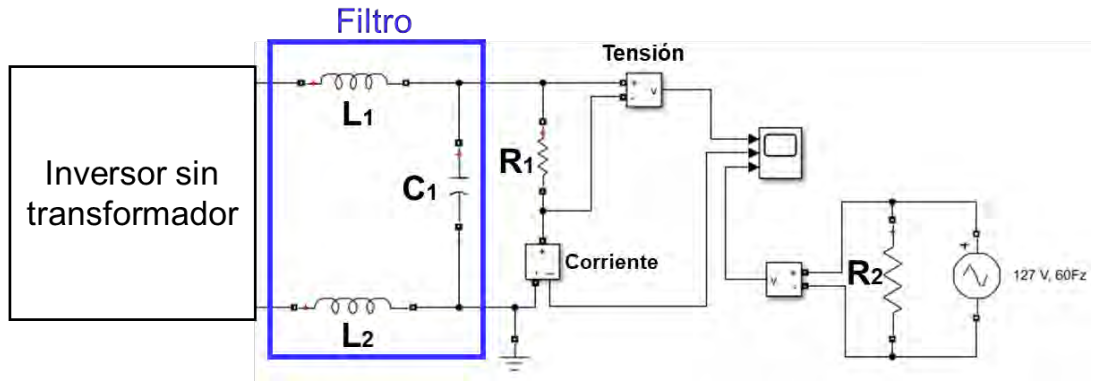


Figura 41. Circuito del filtro

Como paso inicial, deben proporcionarse las especificaciones del filtro (véase la Tabla 8):

- Potencia a inyectar a la red eléctrica  $P_{salida}$ ,
- Voltaje de entrada al inversor  $V_{inversor}$  y
- Tensión de salida del inversor  $V_{salida\ rms}$ .

Para dimensionar los elementos del filtro se recomienda que la frecuencia de resonancia del LCL  $f_{res}$  sea diez veces la frecuencia de línea  $f_o$ , y la mitad de la frecuencia de conmutación  $f_{sw}$ . Con esto se proporciona una atenuación eficaz de armónicos (véase la fórmula 4).

$$10f_o < f_{res} < 0.5f_{sw} \quad (4)$$

Tabla 8. Valores requeridos para el dimensionamiento del filtro LCL

Datos proporcionados	Valor
Frecuencia de conmutación del inversor ( $f_{sw}$ )	10 kHz
Frecuencia de salida del sistema ( $f_o$ )	60 Hz
Voltaje de CD de entrada al inversor ( $V_{inversor}$ )	153.4 V
Voltaje RMS de salida del sistema ( $V_{salida\ rms}$ )	127 V
Potencia inyectada a la red ( $P_{salida}$ )	6,442.8 W

Sean,  $Z_{base}$  y  $C_{base}$  la impedancia y la capacitancia base respectivas;  $C_f$  es el condensador del filtro, el cual es menor al 5 % de  $C_{base}$ ;  $L_{inversor}$  es el inductor del lado del inversor, mientras que  $L_{salida}$  es el inductor de retorno al inversor,  $\Delta I_{max}$  es la corriente de salida máxima.

Además,  $R_d$  es la resistencia de amortiguamiento que se usa para garantizar un valor bajo de frecuencia resonante. En algunas ocasiones este elemento no es necesario, lo cual es el caso del trabajo de investigación.

Los parámetros del filtro LCL se calculan mediante las fórmulas 5 a la 12. En primera instancia se calcula la impedancia base, dividiendo la tensión de salida al cuadrado entre la potencia inyectada a la red eléctrica.

$$Z_{base} = \frac{V_{salida\ rms}^2}{P_{salida}} \quad (5)$$

Sustituyendo valores, se obtiene una impedancia de:

$$Z_{base} = \frac{127^2\ V}{6,442.8\ W} = 2.5034\ Ohm$$

El valor de la impedancia se utiliza para el cálculo de la capacitancia base, de acuerdo a.

$$C_{base} = \frac{1}{2 * \pi * f_o * Z_{base}} \quad (6)$$

El valor de la capacitancia base es igual a:

$$C_{base} = \frac{1}{2 * \pi * 60\ Hz * 2.5034\ Ohm} = 1.0595\ mF$$

Como se mencionó antes, el condensador del filtro debe ser menor al 5% de la capacitancia base.

$$C_f < 0.05 C_{base} \quad (7)$$

Aplicando valores:

$$0.05 * C_{base} = 52.9795\ \mu F$$

$$C_f < 52.9795\ \mu F \cong 53\ \mu F$$

Se toma el 0.8 del resultado anterior.

$$C_f = 0.8 * 53 \mu\text{F} = 42.4 \mu\text{F}$$

Un valor importante es este cálculo de filtro es la diferencial de la corriente máxima de salida, la cual se calcula mediante la fórmula 8.

$$\Delta I_{max} = 0.1 \frac{P_{salida} * \sqrt{2}}{V_{salida rms}} \quad (8)$$

Sustituyendo valores, el resultado que se obtiene es:

$$\Delta I_{max} = 0.1 \frac{6,442.8 \text{ W} * \sqrt{2}}{127 \text{ V}} = 7.1744 \text{ A}$$

Para calcular el primer inductor del filtro (el inductor a la salida del inversor) se deben de considerar la frecuencia de conmutación del inversor, la tensión de entrada al inversor y la diferencial de la máxima corriente de salida.

$$L_{inversor} = \frac{V_{inversor}}{16 * f_{sw} * \Delta I_{max}} \quad (9)$$

El primer inductor tiene un valor de:

$$L_{inversor} = \frac{153.4 \text{ V}}{16 * 10 \text{ kHz} * 7.1744 \text{ A}} = 133.63 \mu\text{H}$$

El segundo inductor (inductor de retorno al inversor) resulta del 0.8 del valor del primer inductor.

$$L_{salida} = 0.8 L_{inversor} \quad (10)$$

Sustituyendo valores numéricos:

$$L_{salida} = 0.8 * 133.63 \mu\text{H} = 106.91 \mu\text{H}$$

El valor de la frecuencia de resonancia asociada con el filtro es (véase la fórmula 11).

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{inversor} + L_{salida}}{L_{inversor} * L_{salida} * C_f}} \quad (11)$$

Al introducir valores numéricos, resulta un valor de frecuencia de:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{133.63 \mu\text{H} + 106.9 \mu\text{H}}{133.63 \mu\text{H} * 106.9 \mu\text{H} * 42.3836 \mu\text{F}}} = 3.1721 \text{ kHz}$$

De acuerdo con la fórmula 4, el valor de la frecuencia de resonancia cumple con las condiciones:

$$600 \text{ Hz} < 3.1721 \text{ kHz} < 3.2214 \text{ kHz}$$

Al final se calcula la resistencia de amortiguamiento.

$$R_d = \frac{1}{6 * \pi * f_{res} * C_f} \quad (12)$$

El valor de la resistencia de amortiguamiento es:

$$R_d = \frac{1}{6 * \pi * 3.1721 \text{ kHz} * 42.3836 \mu\text{F}} = 0.3946 \Omega$$

Por otro lado, se puede decir que  $C_f$  es  $C_1$ ,  $L_{inversor}$  es  $L_1$  y  $L_{salida}$  es  $L_2$ .

Los parámetros del filtro LCL se determinaron mediante las fórmulas anteriores, los valores se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de los componentes para el filtro LCL

Parámetros del filtro LCL	Valor
Inductor de lado del inversor ( $L_{inversor}$ )	133.63 $\mu\text{H}$
Inductor de lado de la carga ( $L_{salida}$ )	106.91 $\mu\text{H}$
Filtro del capacitor ( $C_f$ )	42.383 $\mu\text{F}$
Resistencia de amortiguamiento ( $R_d$ )	0.3946 $\Omega$
Frecuencia resonante	3.1721 kHz

# Capítulo 5 Resultados y conclusiones

---

En este capítulo se describen los resultados y las conclusiones de la investigación. Los resultados que se obtuvieron de los inversores sin transformador se muestran de manera individual. Al final se ilustra la comparación de las topologías de acuerdo a las condiciones establecidas: la frecuencia de modulación de los interruptores, tensiones de salida, forma de onda de salida, contenido armónico y corrientes de fuga.

Con el propósito de obtener una buena evaluación, la tensión en el bus de CD fue del mismo valor para todos los casos de inversores sin transformador; lo mismo aplica para la corriente, potencia de entrada, frecuencia de conmutación, filtro y capacitancia parásita.

## 5.1 Resultados

La simulación de los inversores se realizó en Matlab/Simulink y para ello se consideraron los parámetros eléctricos de la Tabla 10. Cabe recordar que las condiciones de energía deben cubrir la demanda eléctrica de un aire acondicionado de una tonelada de refrigeración; por tal motivo, los valores de potencia se dimensionaron para ese caso específico.

Tabla 10. Parámetros eléctricos para el análisis de los inversores

Parámetros de operación	Valor
Frecuencia de salida del sistema ( $f_o$ )	60 Hz
Voltaje de entrada del inversor CD ( $V_{\text{inversor}}$ )	153.4 V
Potencia de entrada al inversor ( $P_{\text{inversor}}$ )	6,442.8 W

Al ser topologías diferentes, los inversores conmutan de manera distinta. Para el trabajo de investigación los interruptores se sometieron a una frecuencia de 10 kHz. A continuación, se describen los resultados individuales de las topologías, lo mismo que las gráficas de formas de onda, corriente de fuga, contenido armónico y voltaje a la salida del inversor.

### 5.1.1 Inversor H5

En el capítulo 4 se describió la topología H5, con sus características principales, al igual que la modulación de los transistores. La Figura 42, muestra los estados de conmutación de este inversor, a una frecuencia de 10 kHz. En ella se pueden ver los interruptores que trabajan a frecuencia de línea y conmutación.

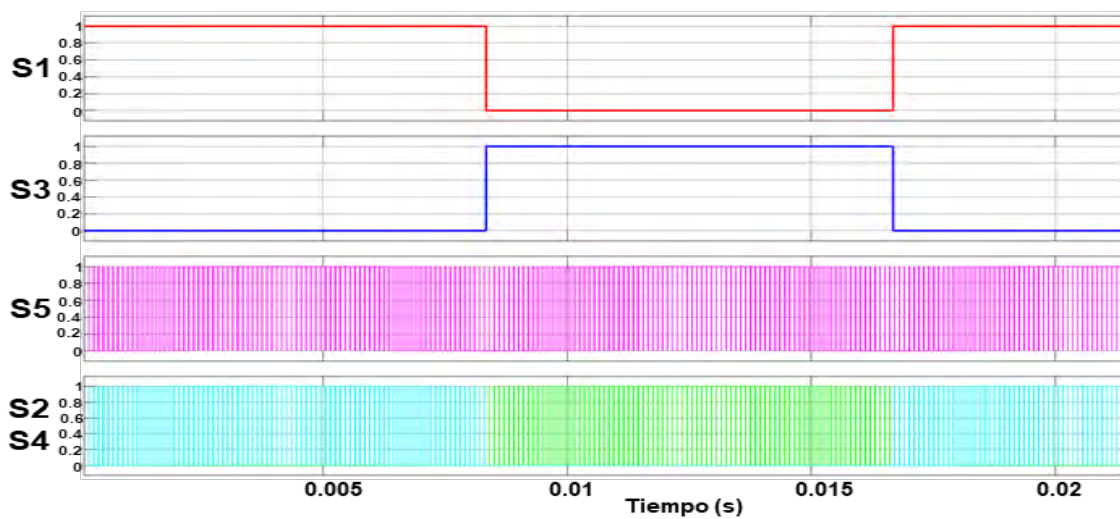


Figura 42. Estados de conmutación del inversor H5

La tensión en el bus de CD fue de 153.4 V. La Figura 43, muestra la onda a la salida del inversor H5 sin filtrar, con la técnica de modulación SPWM. Se puede notar que el voltaje de salida es CA con un alto contenido armónico. La técnica SPWM activa los interruptores de forma que se tienen semiciclos positivos y negativos. Debido a la distorsión armónica, la tensión resultante no pueda inyectarse a la red eléctrica.

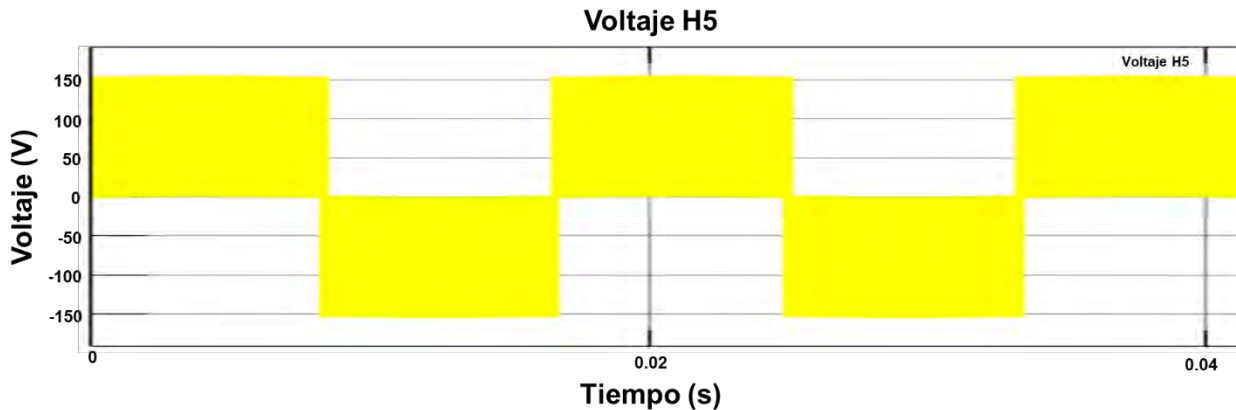


Figura 43. Tensión a la salida del inversor sin filtrar

La Figura 44 ilustra la comparación entre la tensión a la salida del inversor una vez filtrada (amarilla) y la red eléctrica (roja). La tensión de salida de la topología pasa por el filtro de tercer orden LCL, lográndose una forma de onda sinusoidal y reduciéndose su contenido armónico. Anteriormente, se mencionó que el voltaje de salida por el inversor debería ser mayor a la red eléctrica. En la gráfica se aprecia que se cumple con este requisito. Además, las formas de onda tienen la misma frecuencia.

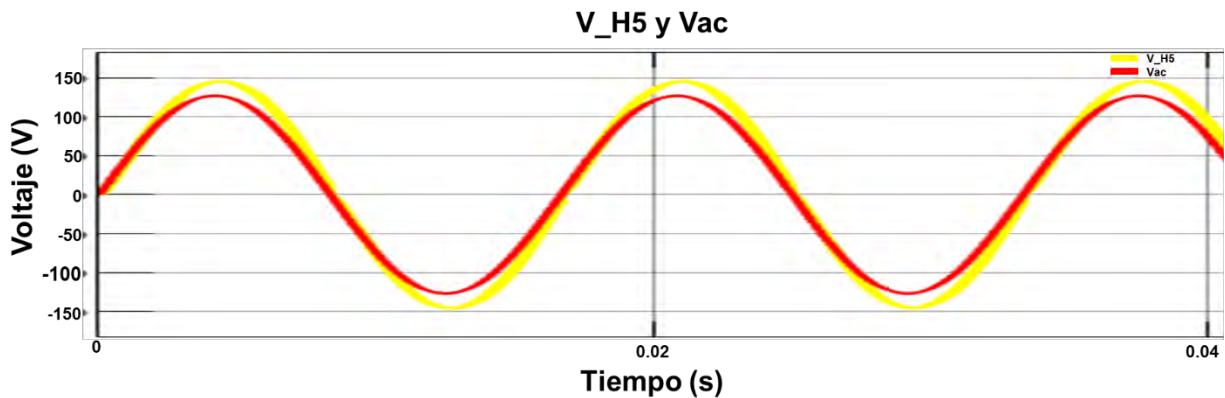


Figura 44. Comparación de la señal a la salida del inversor (V\_H5) y red eléctrica (V<sub>CA</sub>)

Se considera la norma 519 de la IEEE, donde se especifica que el contenido armónico de tensión debe ser menor al 3 %, para que pueda inyectarse a la red eléctrica. Por norma se considera hasta el 50 armónico para el análisis de la distorsión armónica; a partir de este armónico, las amplitudes comienzan a ser constantes.

En la Figura 45, se muestra el contenido armónico del inversor H5. Cabe mencionar que la amplitud de la componente fundamental es de 145.1 V a 60 Hz. El porcentaje en THD fue de 1.08 %, cumpliendo con la normativa.

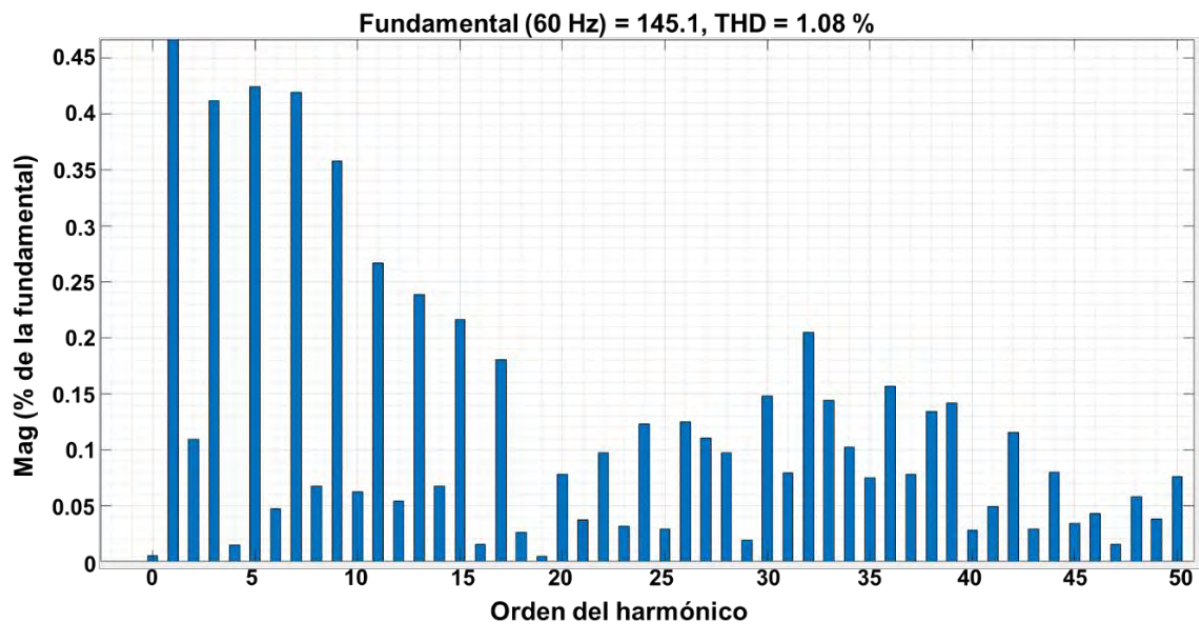


Figura 45. Contenido armónico del inversor H5

Un punto importante es la potencia que demanda el aire acondicionado. Recordando que el sistema no se conecta al AA, sino a la red convencional, la Figura 46, muestra las gráficas de la potencia que se presenta a la red eléctrica, su promedio (rojo) y la demandada por el dispositivo de comodidad térmica (azul).



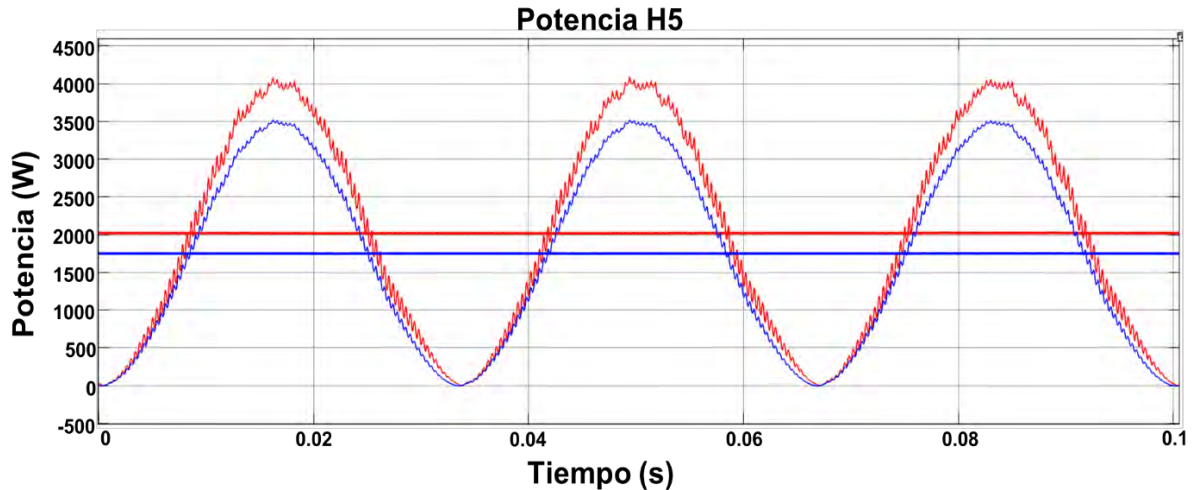


Figura 46. Potencia eléctrica en inversor H5

A continuación se muestra la forma de onda de la corriente que pasa por la carga, simulando el consumo de energía del aire acondicionado (véase la Figura 47). Como resultado, se obtiene la forma de onda de 27.77 A pico. Las nuevas tecnologías de AA permiten que los aparatos tengan un periodo de descanso, cuando se logra equilibrar la temperatura, provocando la desactivación del compresor. Pero esto basta de sobra ya que, siempre que el sistema produzca energía, ésta se inyectará a la red eléctrica.

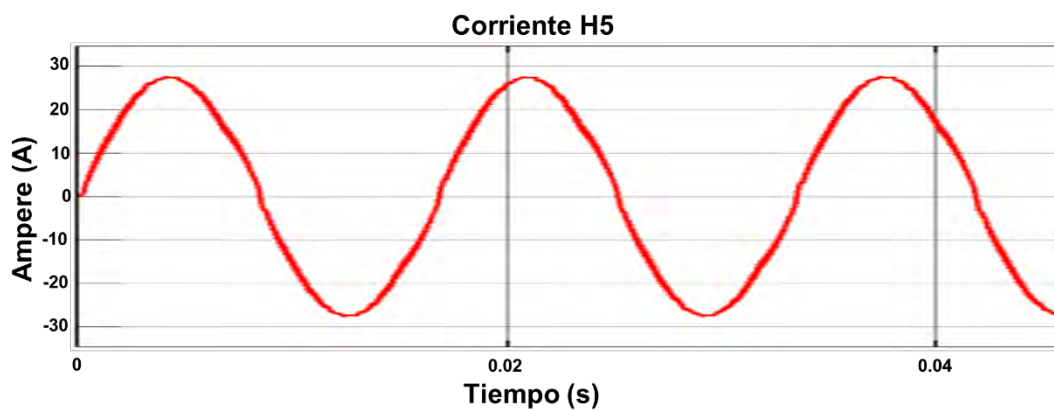


Figura 47. Corriente circulada por el aire acondicionado

El inversor H5 tuvo una tensión de salida filtrada en CA de 145.1 V de valor máximo, contenido armónico de 1.08 %, y eficiencia del 94.5 %. La corriente de fuga que se obtuvo fue de 178.2 mA (pico) con una capacitancia parásita de 50 nF (véase la Figura 48).

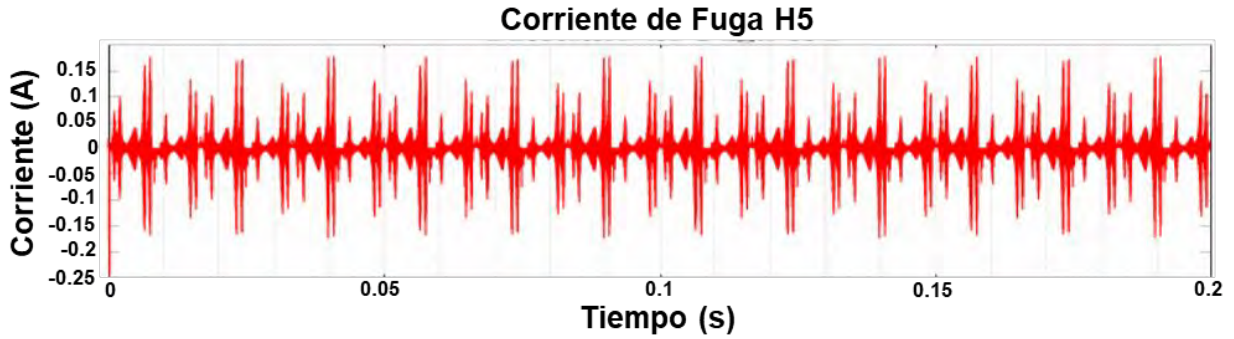


Figura 48. Corriente de fuga con capacitancia de 50nF

### 5.1.2 Inversor HERIC

Los estados de activación de los interruptores para el inversor HERIC se muestran en la Figura 49. Al igual que en la topología H5, los transistores conmutan a 10 kHz, a diferencia de S5 y S6. En las gráficas se puede apreciar que los interruptores S5 y S6 trabajan a frecuencia de línea.

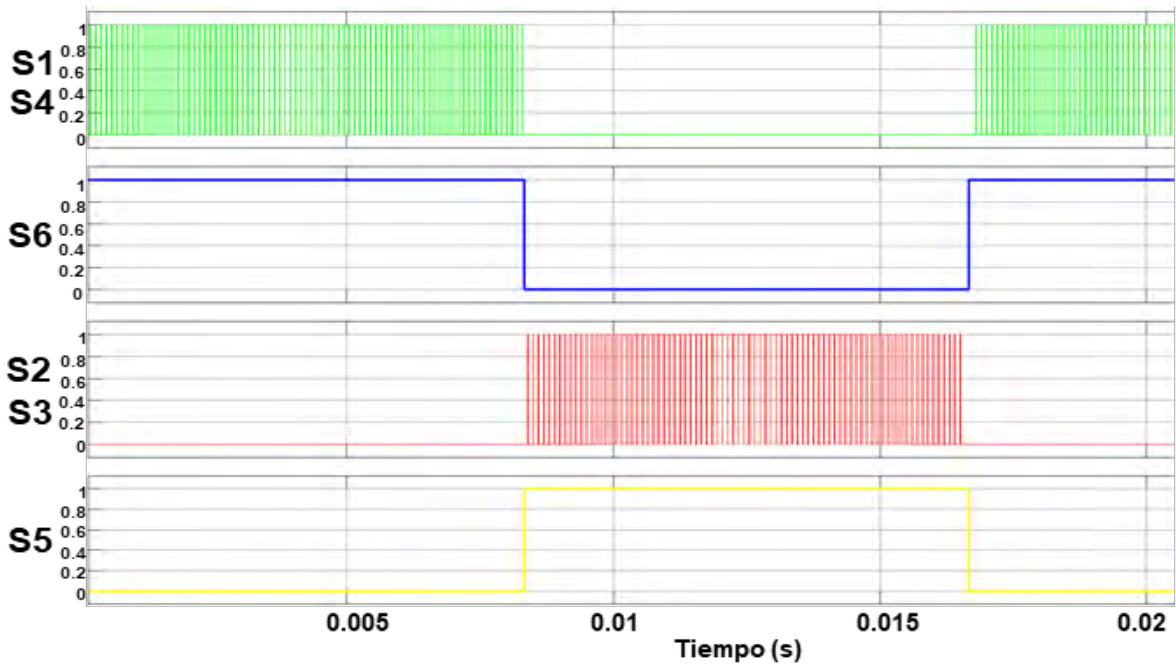


Figura 49. Estados de conmutación del inversor HERIC

Algunos interruptores de este inversor conmutan a la par, por ejemplo, S1 y S4 se sincronizan, al igual que S2 y S3, pero en distintos tiempos. Por otro lado, los interruptores S5 y S6 siempre estarán desfasados uno del otro.

Como se ha explicado, la tensión en el bus de CD es igual para los tres casos a estudiar. La Figura 50, muestra la gráfica del voltaje de salida del inversor, la cual es de 153.4 V. La modulación SPWM genera la onda a la salida del inversor (CA), inadecuada para la conexión a la red. La señal exhibe un contenido armónico muy alto, por tal motivo no cumple con la normativa para inyectarse a la red convencional.

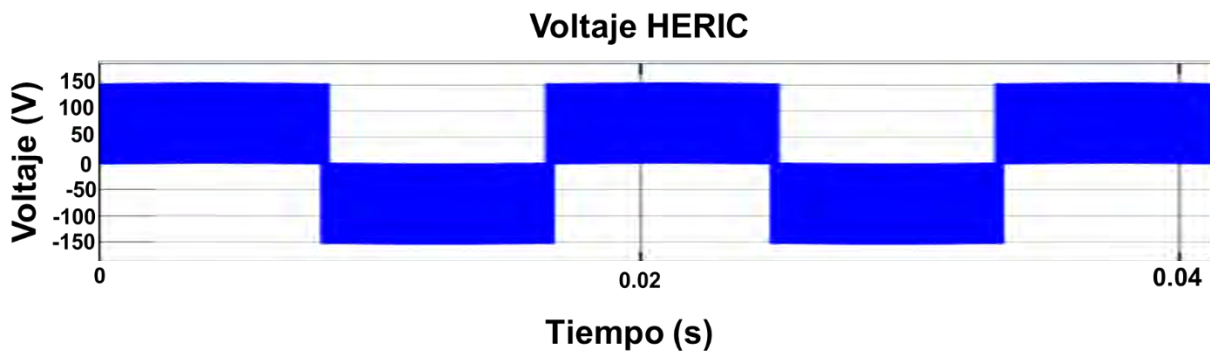


Figura 50. Tensión en el bus CD del inversor HERIC

La tensión en la figura anterior no puede inyectarse a la red convencional. Para lograr esto, la tensión debe ser sinusoidal por norma. Al igual que la topología anterior, el filtro para la topología HERIC fue de tercer orden LCL. Como resultado la tensión se atenúa, llegan a parecerse a la señal de la red eléctrica (véase la Figura 51).

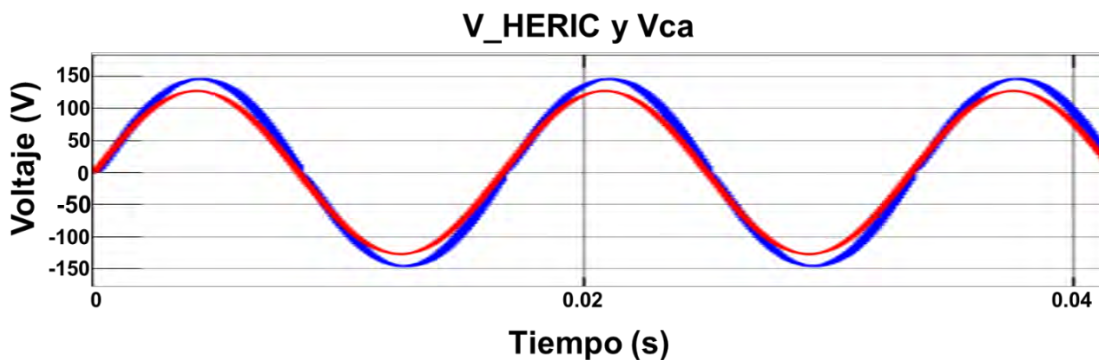


Figura 51. Señal a la salida del filtro LCL del inversor HERIC

El contenido armónico presente en el inversor HERIC es diferente en comparación con el inversor H5 (véase la Figura 52). El HERIC presenta una amplitud de la componente fundamental de 145.3 V, exhibe un THD de 1.19%, es decir 0.11% mayor al H5. La evaluación del contenido armónico para este caso se realizó también hasta el armónico número 50.

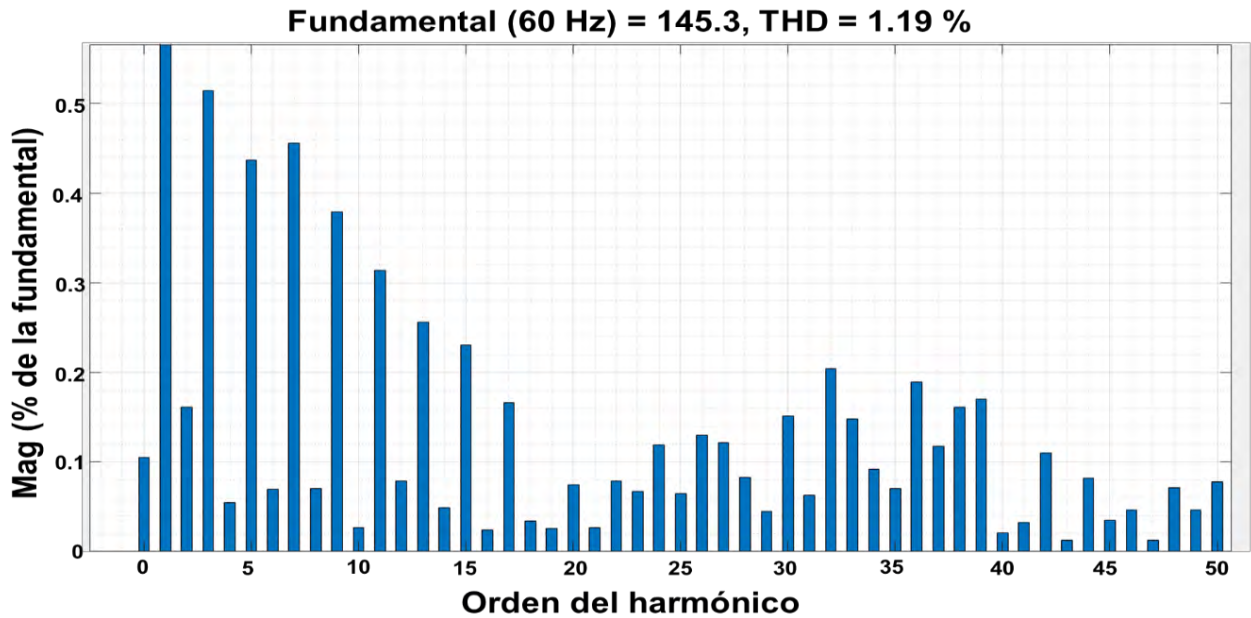


Figura 52. Contenido armónico del inversor HERIC

La Figura 53 ilustra la potencia que se inyectará a la red convencional, junto a su promedio (onda azul). De igual manera, se muestra la potencia por el aire acondicionado (gráfica roja). Podemos ver que la energía inyectada es mayor a la usada por el AA.

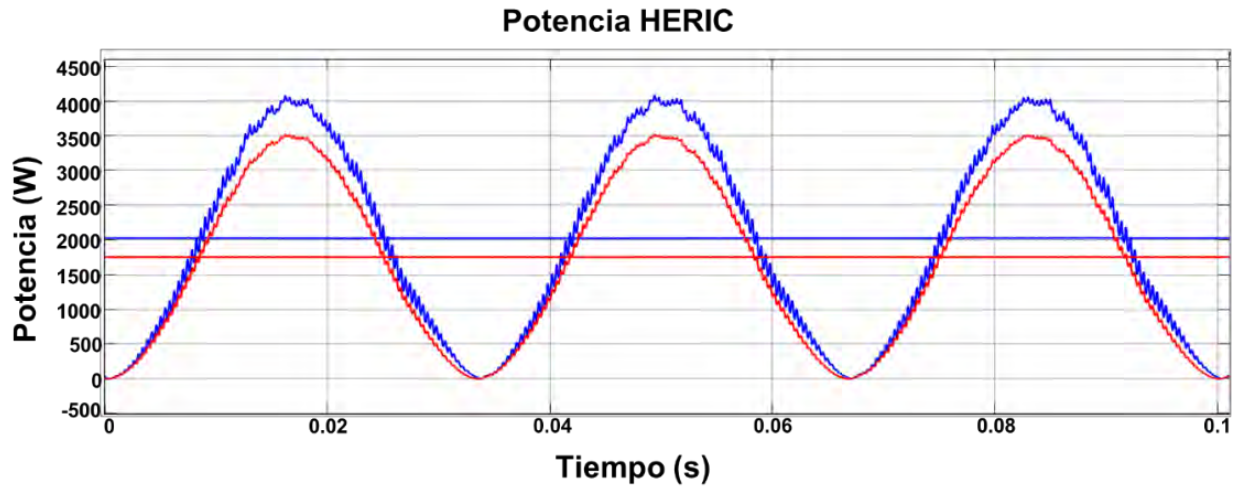


Figura 53. Potencia eléctrica en inversor HERIC

A continuación (véase la Figura 54), se aprecia la curva de corriente presente en la carga, simulando al aire acondicionado. Para el inversor sin transformador HERIC se obtiene un flujo de corriente de 27.48 A.

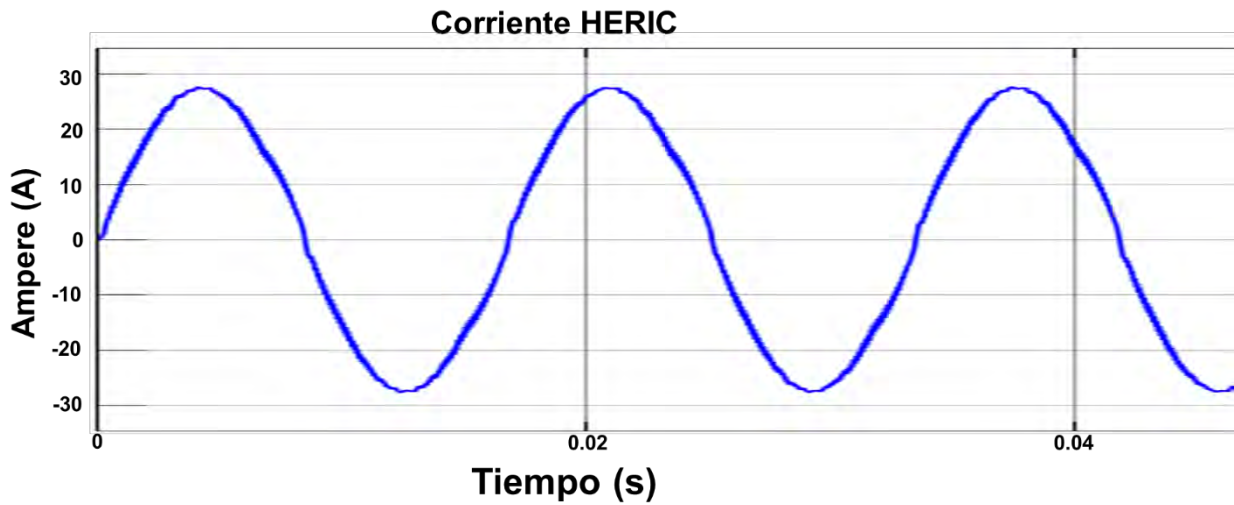


Figura 54. Corriente consumida por el dispositivo de comodidad térmica en inversor HERIC

La tensión de salida en CA filtrada del inversor HERIC fue de 145.3 V de valor máximo con una eficiencia de 94.7%. El valor de la corriente de fuga fue de 153.3 mA (pico), con una capacitancia parásita de 50 nF (véase la Figura 55).

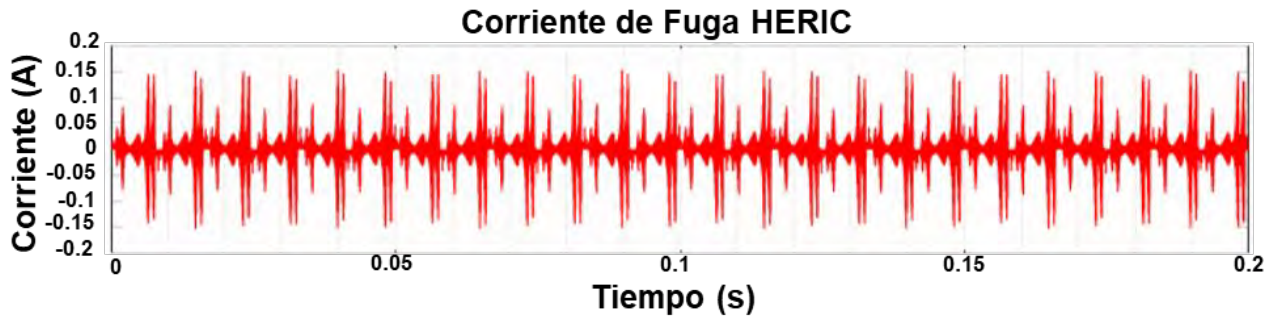


Figura 55. Corriente de fuga del inversor HERIC con capacitancia de 50 nF

### 5.1.3 Inversor H6\_II

En la Figura 56 se pueden apreciar los pulsos de los interruptores creados por la conmutación SPWM bipolar a 10 kHz en el inversor H6\_II. Las señales son muy parecidas a las del inversor HERIC, ya que las dos cuentan con seis transistores; la diferencia radica en la posición de cada uno de ellos. En la Figura 56 se puede apreciar que S5 y S6 trabajan a frecuencia de línea, y el resto conmuta a frecuencia de conmutación.

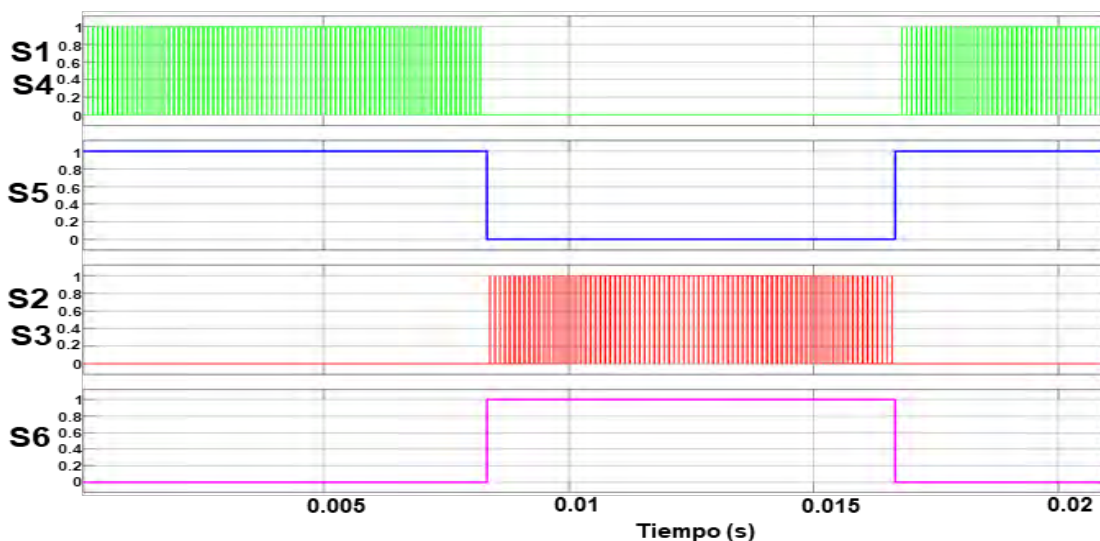


Figura 56. Estados de conmutación del inversor H6\_II

A continuación se presenta lo relacionado con la topología H6\_II. En primera instancia se muestran la tensión generada por la modulación SPWM al inversor sin filtrar (véase la Figura 57). Al igual que los inversores anteriores, la tensión a la salida no tiene las condiciones para inyectarse a la red eléctrica, por lo tanto se tiene que filtrar.

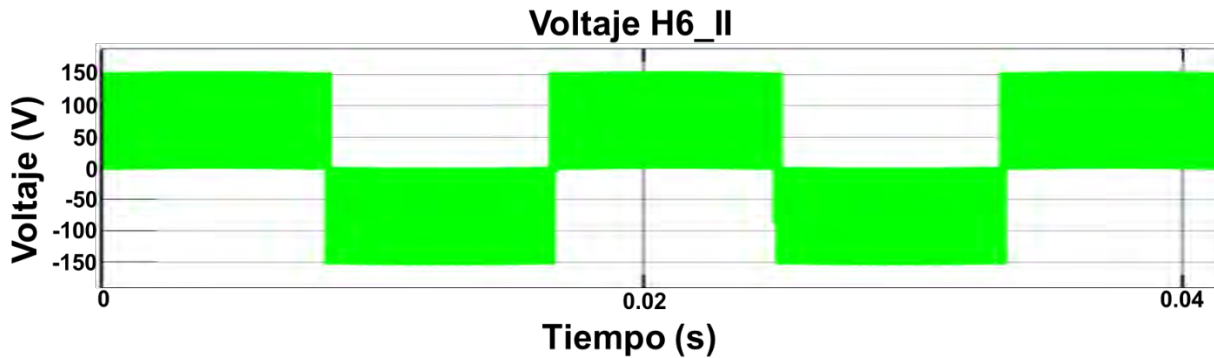


Figura 57. Tensión a la salida del inversor H6\_II

La tensión del inversor se atenúa cuando pasa a través del filtro LCL, reduciéndose su contenido armónico (véase la Figura 58). La Figura 58 muestra la comparación entre la onda filtrada y la señal de la red eléctrica, donde el voltaje de H6\_II es más alto.

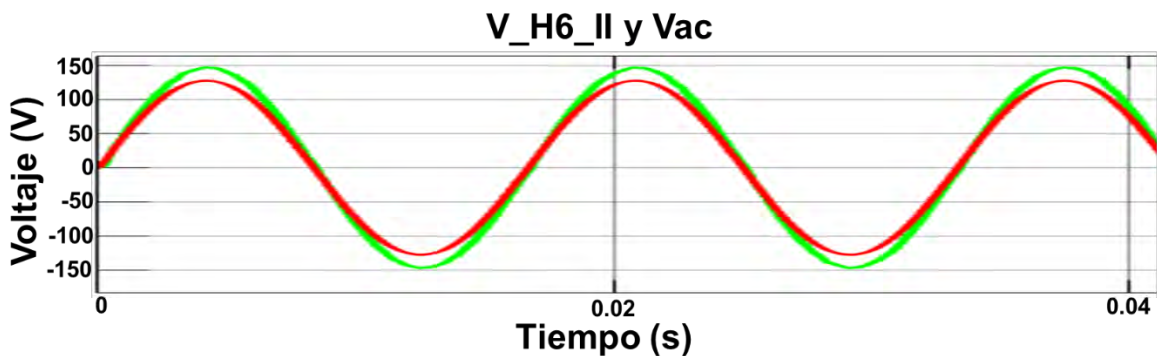


Figura 58. Tensión filtrada del inverso H6\_II

El contenido armónico del inversor H6\_II se ilustra en la Figura 59. La Figura 59 muestra la amplitud de la componente fundamental, la cual es igual a 144.9 V, a una frecuencia de 60 Hz. Esta topología presenta una THD del 1.02%, menor a la que presentan los dos inversores antes mencionados.

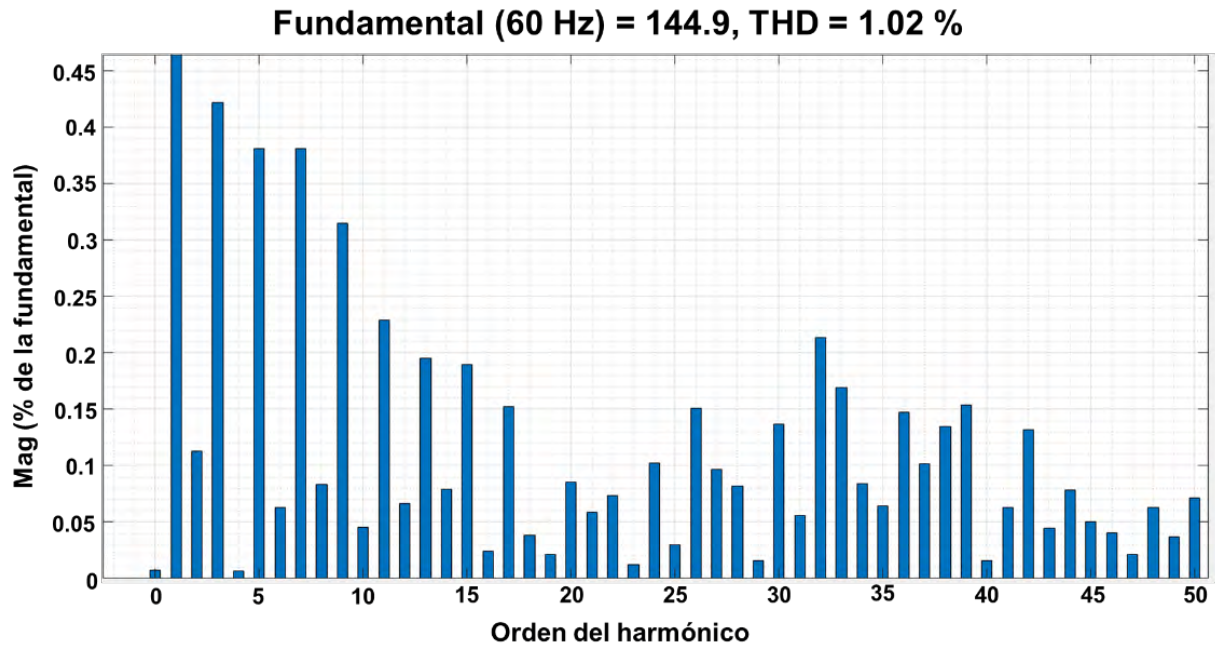


Figura 59. Contenido armónico del inverso sin transformador H6\_II

La potencia en H6\_II es distinta a las topologías antes mencionadas (véase la Figura 60). La H6\_II presenta un desfase en la potencia producida, en comparación con la del dispositivo de comodidad térmica. Sin embargo, no afecta al mismo, ya que este se inyecta a la red eléctrica y no al aire acondicionado directamente.

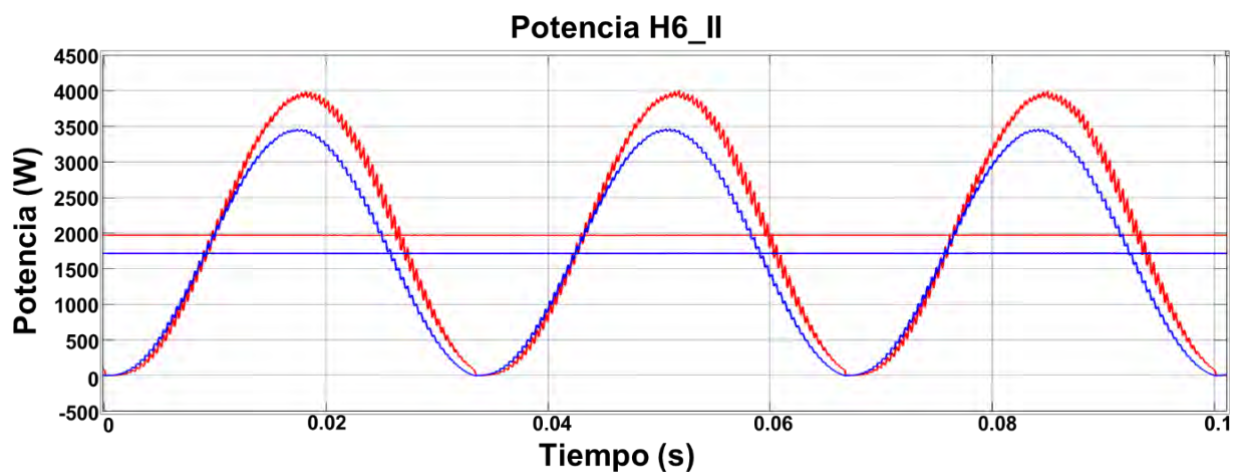


Figura 60. Potencia eléctrica en inversor H6\_II



La corriente que fluye por la carga en el inversor H6\_II simula al aire acondicionado (véase la Figura 61). La imagen se muestra con el fin de demostrar que para los tres casos de estudio se aplicaron las mismas condiciones de análisis. El resultado para este caso en corriente es de 27.77 A, similar los inversores H5 y HERIC.

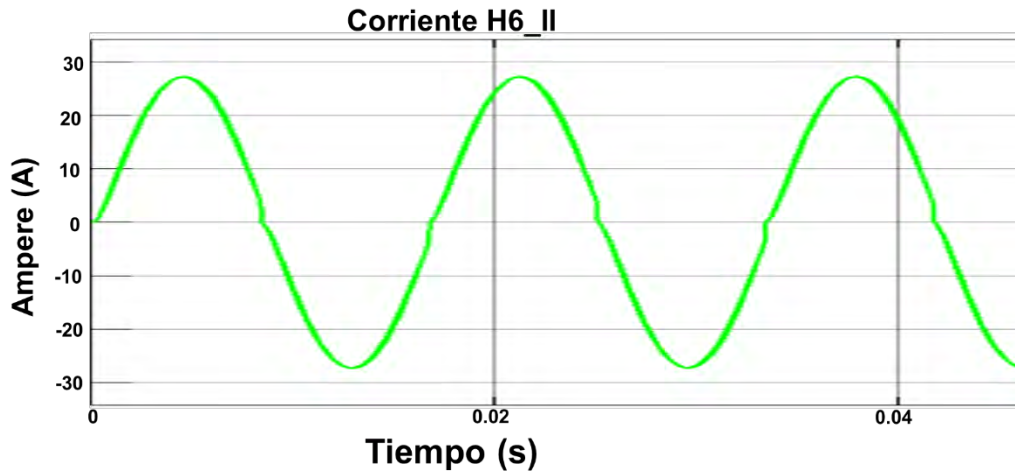


Figura 61. Corriente consumida por el dispositivo de comodidad térmica en H6\_II

En H6\_II se obtuvo una tensión en CA a la salida del filtro de 144.9 V de valor máximo, menor a las dos topologías anteriores. Este inversor cuenta con una eficiencia del 94.4%, siendo la magnitud más baja de las tres topología que se analizaron. En la Figura 62 se puede apreciar la corriente de fuga, la cual fue de 148.6 mA (pico) para un valor de capacitancia parásita de 50 nF, siendo este, de menor amplitud, aunque esto no quiere decir que sea el mejor inversor para el caso de estudio.

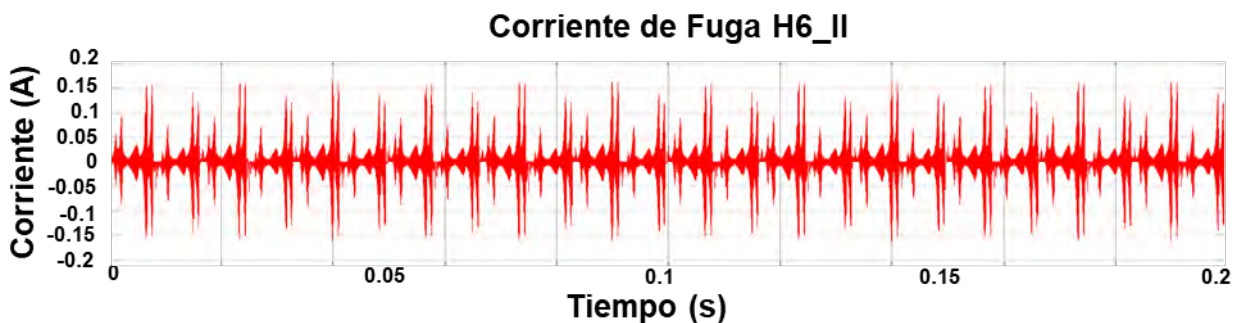


Figura 62. Corriente de fuga del inversor H6\_II

## 5.2 Comparación de resultados

A fin de elegir la mejor topología de inversor sin transformador, estos se compararon con los mismos valores de potencia y modulación (véanse los resultados anteriores).

Los armónicos a la salida del inversor se redujeron por medio de un filtro de tercer orden LCL. El THD del convertidor HERIC es el que ofrece la mayor amplitud de salida (véase la Tabla 11); la topología H6\_II se encuentra en el nivel más bajo.

Tabla 11. Parámetros de los inversores sin transformador

Parámetros	H5	HERIC	H6_II
Voltaje de entrada $V_{in}$ (V)	153.4	153.4	153.4
Voltaje de salida $V_o$ (V)	145.1	145.3	144.9
Número de interruptores	5	6	6
Interruptores baja frecuencia	2	2	2
Corriente de fuga (mA)	178.2	153.3	148.6
THD (%)	1.08	1.19	1.02
Eficiencia (%)	94.5	94.7	94.4

En cuanto a la corriente de fuga, los resultados de los inversores sin transformador son distintos, según lo demuestra la Figura 63. Las configuraciones H5, HERIC y H6\_II satisfacen la norma DIN V 0-126-1-1, la cual exige una corriente de fuga inferior a 300 mA (pico). El inversor H6\_II presenta la menor corriente de fuga; el H5 muestra la más elevada.

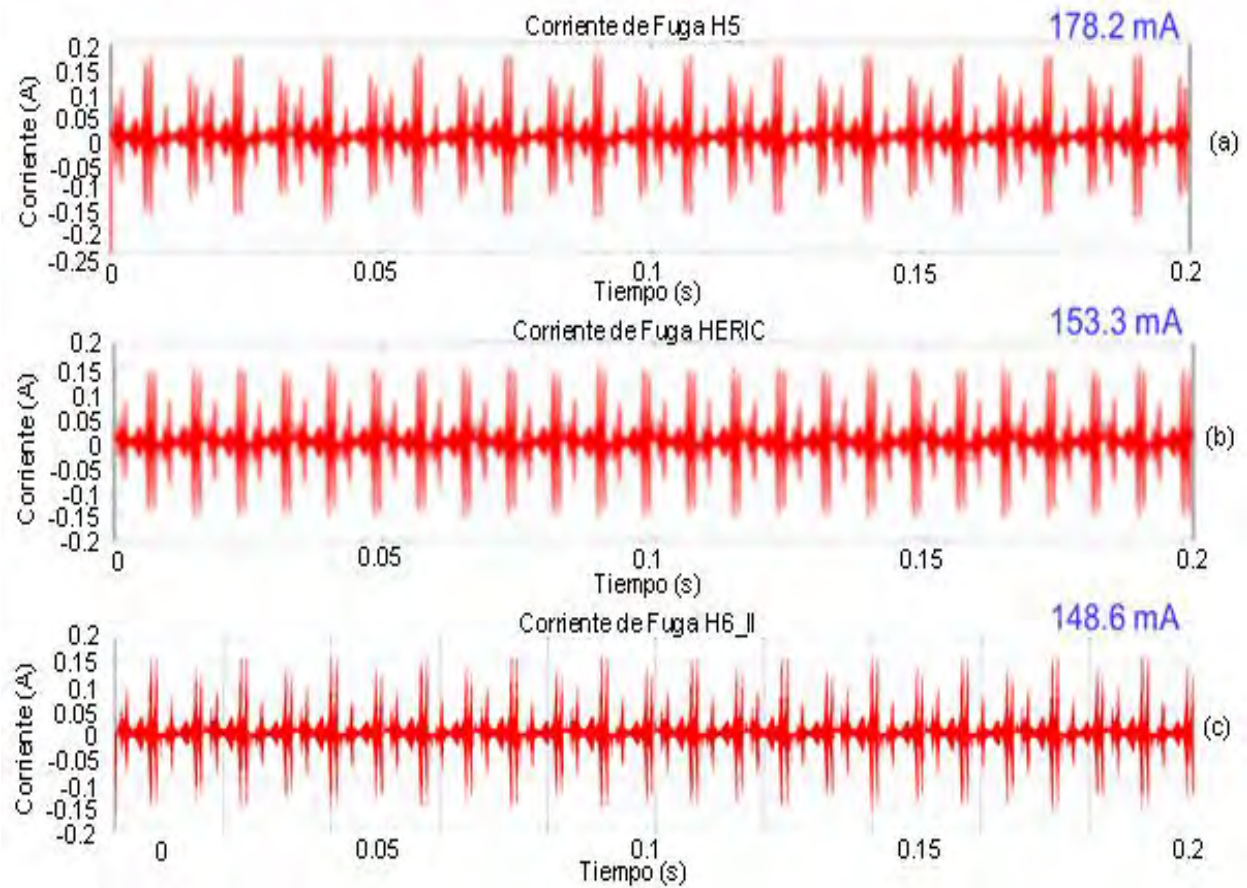
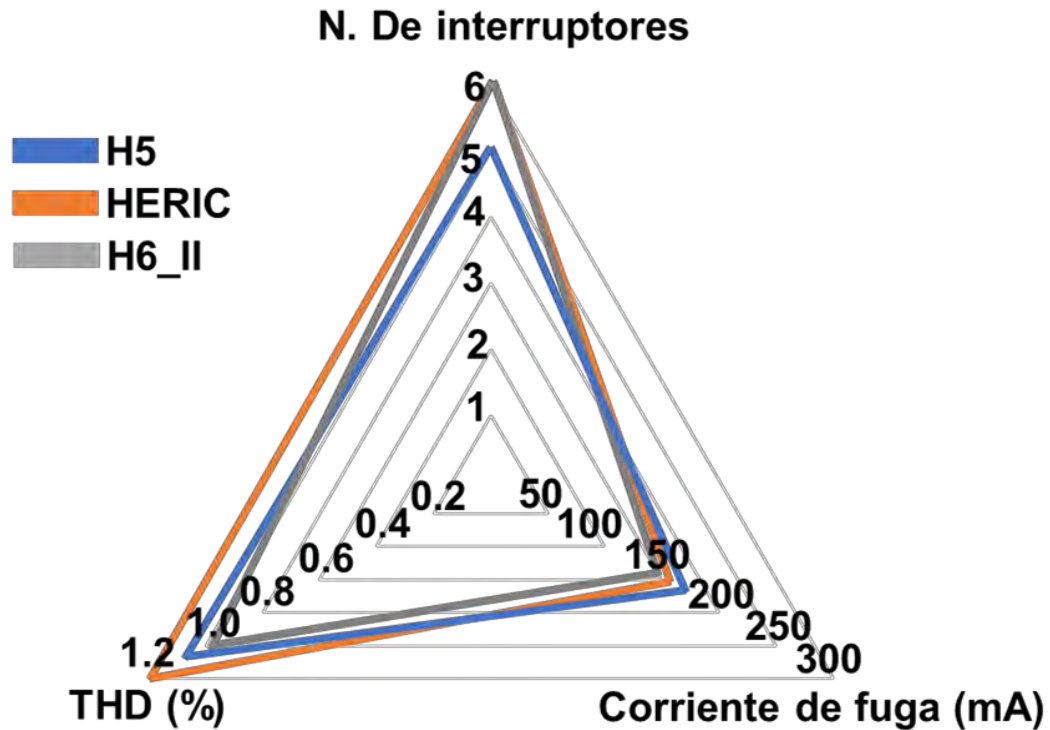


Figura 63. Corriente de fuga de los inversores sin transformador (a)H5, (b)HERIC y (c)H6\_II

La comparación visual es una buena opción para elegir la mejor topología en este caso de estudio. La Figura 64 muestra una gráfica radial en donde se comparan los inversores sin transformador (H5, HERIC y H6\_II), tomando en consideración tres factores principales, corriente de fuga, distorsión armónica y número de interruptores del convertidor.

En la gráfica se puede apreciar que el H5, muestra la menor área en el análisis. Por lo tanto, corresponde a la mejor opción tomando en consideración los tres factores mostrados en la figura mencionada.



*Figura 64. Comparación de los inversores, en consideración de su área*

Otro resultado obtenido fue la comparación de la corriente que se demanda al bus de CD (tensión de alimentación). Las magnitudes resultan iguales para las tres configuraciones de inversores sin transformador (véase la Figura 65). El resultado era de predecir, ya que las topologías cuentan con:

- a) Cantidades similares de componentes
- b) Conmutaban a la misma frecuencia de conmutación
- c) Misma carga
- d) Mismo filtro de tercer orden LCL

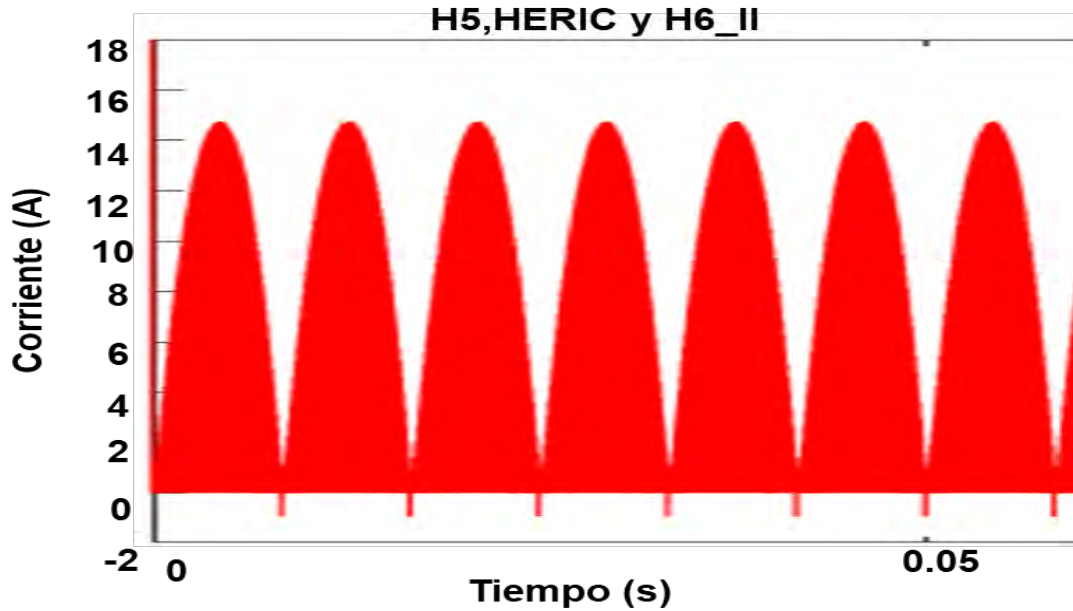


Figura 65. Corriente de retorno al bus de CD de los inversores H5, HERIC y H6\_II

### 5.3 Conclusiones y recomendaciones

Las tres configuraciones satisfacen la norma alemana DIN V 0-126-1-1, la cual exige una corriente de fuga inferior a 300 mA (pico). Con una capacitancia parásita de 50 nF, el inversor H6\_II presenta la corriente de fuga más baja y H5 la más elevada.

Con la intención de reducir costos se elige el inversor H5, ya que es más económico al tener cinco interruptores, dos de ellos conmutando a baja frecuencia. La topología H5 exhibe los valores más altos de corriente de fuga y la THD como segunda posición; no obstante, satisface las normas establecidas para la interconexión a la red eléctrica.

En la simulación del sistema se utilizaron una frecuencia de modulación al inversor de 10 kHz, tensión de entrada de 153.4 V y potencia de 6,442.8 W. Los componentes que integran al inversor deben cumplir con estas especificaciones: uno de los cinco interruptores de la topología elegida conmuta a frecuencia de la red eléctrica; es decir, a 60 Hz. Los interruptores del inversor deben ser de respuesta rápida, con un rango de operación mayor a los especificados.

El filtro LCL cuenta con dos inductores, un capacitor y una resistencia (en algunos casos). Las especificaciones de estos componentes se muestran en la Tabla 9.

En simulación, se logró atenuar la señal del inversor con el filtro diseñado para las especificaciones de potencia, modulación de los interruptores y normas de la red eléctrica.

## 6 Referencias

- [1] Secretaría de energía (SENER) and Comisión nacional para el uso eficiente de la energía (CONUEE), “Infografía Confort térmico,” 2018.
- [2] L. W. Davis and P. J. Gertler, “Air conditioning and global inequality,” *Global Environmental Change*, vol. 69, Elsevier Ltd, Jul. 01, 2021. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2021.102299.
- [3] L. W. Davis and P. J. Gertler, “Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 112, no. 19, pp. 5962–5967, May 2015, doi: 10.1073/pnas.1423558112.
- [4] F. Pavanello *et al.*, “Air-conditioning and the adaptation cooling deficit in emerging economies,” *Nat Commun*, vol. 12, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-26592-2.
- [5] Secretaría de Energía SENER and Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía CONUEE, “Infografía Confort térmico,” ENCEVI, 2018.
- [6] Carrier Mex, “Elite Serie A High Wall Inverter,” Jan. 26, 2016
- [7] M. Ricardo and R. Juan, “Links between Production and Consumption of Electricity with Economic Performance in Mexico,” *14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, vol. 14, pp. 1–6, Jun. 06, 2017.
- [8] CFE, “Tarifas de la electricidad CFE,” *CERIBO - CFE*, May 08, 2023.
- [9] CFE, “Tarifa (DAC) Doméstica de Alto Consumo de la CFE,” *RECIBO - CFE*, May 08, 2023.
- [10] R. Rafael Alexandri, G. G. Luis Gerardo, R. B. Fabiola, U. H. Alain de los Ángeles, and R. B. Ana Lilia, *Prospectiva del Sector Eléctrico 2015 - 2029*, vol. 1. México, 2015.
- [11] O. Perpiñán Lamigueiro, *Energía Solar Fotovoltaica*, vol. Versión 1.5. 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/249012821>
- [12] M. A. Abella, “Sistemas Fotovoltaicos,” Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, MADRID.

- [13] M. A. González García, V. M. Cárdenas Galindo, and R. Álvarez Salas, "Inversores inteligentes en sistemas de energía solar fotovoltaica," in *Universitarios Potosinos*, San Luis Potosí, 2019, pp. 24–29.
- [14] Solargis.com, "Mapas de recursos solares de México," Sep. 12, 2023. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico> (accessed Mar. 07, 2023).
- [15] O. D. Cortés Gómez and Y. E. Torres Riveros, "Diseño de sistema fotovoltaico para el aire acondicionado del data center de la empresa C&C Services," Universidad Distrital Francisco José de Calda, 2019.
- [16] W. Chen, X. Yang, W. Zhang, and X. Song, "Leakage Current Calculation for PV Inverter System Based on a Parasitic Capacitor Model," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 31, no. 12, pp. 8205–8217, Dec. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2016.2517740.
- [17] J. S. Lai, "Power conditioning circuit topologies," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 3, no. 2, pp. 24–34, 2009. doi: 10.1109/MIE.2009.932580.
- [18] E. Espitia, H. López, N. Vázquez, U. Rey, and J. Carlos, "REDUCCIÓN DE CORRIENTE DE FUGA EN INVERSOR TRIFASICO PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS Joaquín Vaquero," 2018. [Online]. Available: <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>
- [19] E Durán, M. B Ferrera, J. M Andújar, and M. S Mesa, "I-V and P-V curves measuring system for PV modules based on DC-DC converters and portable graphical environment," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 3323–3328, 2010. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637972.
- [20] T Kerekes, R Teodorescu, C Klumpner, M Sumner, D Floricau, and P Rodríguez, "Evaluation of Three-phase Transformerless Photovoltaic Inverter Topologies," *Renewable energy systems*, pp. 1–10, 2016.
- [21] N. standards A, "E DIN VDE V 0126-1-1 (VDE V 0126-1-1):2012-09," *DKE NORMAS. MACHEN. ZUKUNFT.*, Apr. 18, 2012.
- [22] E. Elizabeth, L. Héctor, V. Nimrod, and V. Joaquín, "REDUCCIÓN DE CORRIENTE DE FUGA EN INVERSOR TRIFASICO PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS,"



- Tecnológico Nacional de México en Celaya Pistas Educativas*, vol. 40, no. 130, pp. 90–100, 2018. [Online]. Available: <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>
- [23] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. (Electrical engineer) Rodríguez, “Photovoltaic Inverter Structures,” in *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*, 2011, pp. 5–29.
- [24] K Sateesh Kumar, A Kirubakaran, and N Subrahmanyam, “Bi-Directional Clamping Based H5, HERIC and H6-Type Transformerless Inverter Topologies with Improved Modulation Technique,” *IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, Le Méridien Cochin, Kerala, India., pp. 1–6, Jun. 02, 2020.
- [25] D. A. José, “ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS,” 2019. [Online]. Available: <http://www.ieb.com.co>
- [26] A. Villa Manrique and J. Eloy-García Carrasco, “Estudio del Filtro LCL aplicado a Inversores Fotovoltaicos,” Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2011.
- [27] X. Guo, N. Wang, B. Wang, Z. Lu, and F. Blaabjerg, “Evaluation of Three-Phase Transformerless DC-Bypass PV Inverters for Leakage Current Reduction,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 6, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 5918–5927, Jun. 01, 2020. doi: 10.1109/TPEL.2019.2954298.
- [28] P. Q. Dzung, D. N. Dat, N. B. Anh, and L. C. Hiep, “Design of HERIC Inverter for PV Systems by Using Hardware in the Loop (HIL) Concept,” *IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 2035–2040, Nov. 11, 2014.
- [29] Y. Gu, L. Zhang, Y. Xing, and H. Hu, “A Semi-Two-Stage H5 Inverter with Improved Efficiency and Low Leakage Current,” *IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers*, pp. 948–953, Oct. 20, 2018.
- [30] T. O. Diego A, J. V. Juan C, S. S. Franklin G, and G. M. Luis G, “Diseño de un inversor monofásico con topología H5,” *Maskana, I+D ingeniería*, MASKANA, pp. 119–126, Oct. 17, 2014.

- [31] G. Sharma, B. Joshi, and R. Orugnti, "A Double Bootstrap Gate Driving Scheme for HERIC Topology," *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1–6, Dec. 18, 2018.
- [32] J. Wang *et al.*, "An Improved Hybrid Modulation Method for the Single-Phase H6 Inverter with Reactive Power Compensation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 7674–7683, Sep. 01, 2018. doi: 10.1109/TPEL.2017.2768572.
- [33] T Padmapritha, V Nivetha, and S Sairam, "Analysis of Improved H6 Topology for grid-tied PV System to Minimize Leakage Current," *International Conference on Clean Energy and Energy Efficient Electronics Circuit for Sustainable Development (INCCES)*, pp. 978–981, Dec. 18, 2019.
- [34] N. Zhou, R. Zhao, L. Wang, P. Zhang, D. Yang, and C. Ma, "A Predictive Deadbeat Grid-connected Control Method of H6 Topology," *5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE 2020)*, Chengdu, China, pp. 673–677, Jun. 04, 2020.
- [35] S. M. Adam, S. Chumachenko, V. Hahanov, E. Litvinova, and K. L. Man, "Novel Design and Simulation of HERIC Transformerless PV Inverter in MATLAB/Simulink," *EasyChair Preprint*, pp. 1–5, 2021.
- [36] E. KABALCI and A. BOYAR, "Design and Analysis of Two-phase Interleaved Boost Converter and H5 Inverter Based Microinverter," *1st Global Power, Energy and Communication Conference (IEEE GPECOM2019)*, pp. 122–127, Jun. 12, 2019.
- [37] Z. Tang *et al.*, "A Hybrid UP-PWM Scheme for HERIC Inverter to Improve Power Quality and Efficiency," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 5, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 4292–4303, May 01, 2019. doi: 10.1109/TPEL.2018.2858784.
- [38] Quoc Dzong Phan, Ngoc Dat Dao, Bao Anh Nguyen, and Chi Hiep Le, "Design of HERIC Inverter for PV Systems by Using Hardware in the Loop (HIL) Concept," *IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS)*, Australia, pp. 2035–2040, Nov. 13, 2014.

- [39] M. Islam and S. Mekhilef, "H6-type transformerless single-phase inverter for grid-tied photovoltaic system," *IET Power Electronics*, vol. 8, no. 4, Institution of Engineering and Technology, pp. 636–644, Apr. 01, 2015. doi: 10.1049/iet-pel.2014.0251.
- [40] M. N. H. Khan, M. Forouzesh, Y. P. Siwakoti, L. Li, T. Kerekes, and F. Blaabjerg, "Transformerless Inverter Topologies for Single-Phase Photovoltaic Systems: A Comparative Review," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 8, no. 1, pp. 805–835, Mar. 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2908672.
- [41] A. K. Mohammed, H. Ahteshamul, and B. K. V. S, "Control and Stability Analysis of H5 Transformerless Inverter Topology," *International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON) Galgotias University*, IEEE, India, pp. 310–315, Sep. 28, 2018.
- [42] Z. Tang *et al.*, "Hybrid UP-PWM Scheme for HERIC Inverter to Improve Power Quality and Efficiency," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, no. 5, pp. 4292–4303, May 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2858784.
- [43] S. Gaurav, J. Bhakti, and O. Ramesh, "A Double Bootstrap Gate Driving Scheme for HERIC Topology," *Indian Institute of Technology IEEE*, Chennai, India, 2018.
- [44] Z. Tang *et al.*, "Hybrid UP-PWM Scheme for HERIC Inverter to Improve Power Quality and Efficiency," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, no. 5, pp. 4292–4303, May 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2858784.
- [45] F. D. Mudianto, I. Sudihato, A. B. Karso, and W. Zulfa, "Design of a Single Phase HERIC-SPWM," *INTEK Jurnal Penelitian*, vol. 9, no. 1, pp. 6–13, 2022. doi: 10.31963/intek.
- [46] K. Li, Y. Shen, Y. Yang, Z. Qin, and F. Blaabjerg, "A transformerless single-phase symmetrical Z-source HERIC inverter with reduced leakage currents for PV systems," *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, vol. 2018-March, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 356–361, Apr. 18, 2018. doi: 10.1109/APEC.2018.8341035.
- [47] K. Li, Y. Shen, Y. Yang, Z. Qin, and F. Blaabjerg, "Modulation for the AVC-HERIC Inverter to Compensate for Deadtime and Minimum Pulsewidth Limitation Distortions,"

- IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 3, pp. 2571–2584, Mar. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2925549.
- [48] J. Wang *et al.*, “An Improved Hybrid Modulation Method for the Single-Phase H6 Inverter with Reactive Power Compensation,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 33, no. 9, pp. 7674–7683, Sep. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2768572.
- [49] M. M. Rahman, M. Shafayet Hossain, M. S. Islam Talukder, and M. Nasir Uddin, “Transformerless Six-Switch (H6)-based Single-Phase Inverter for Grid-Connected Photovoltaic System with Reducd Leakage Current,” *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2020*, Oct. 2020, doi: 10.1109/IAS44978.2020.9334750.
- [50] W. Yu, J. S. Lai, H. Qian, and C. Hutchens, “High-efficiency MOSFET inverter with H6-type configuration for photovoltaic nonisolated AC-module applications,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1253–1260, 2011. doi: 10.1109/TPEL.2010.2071402.
- [51] A Benrabah, F Khoudir, K Marouani, A Kheloui, A Raza, and D Xu, “Improved Grid-Side Current Control of LCL-Filtered Grid-Tied Inverters Under Weak Grid Conditions,” *IEEE*, 2019.
- [52] M Dursun and M. Kenan Dosoglu, “LCL Filter Design for Grid Connected Three-Phase Inverter,” *2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Sep. 2018.