

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica

Análisis de la distorsión armónica en la red de distribución de CENTROSUR debido a la conexión de generación distribuida

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Eléctrico

Autor:

Alex Daniel Lozado Bermeo

Diego Paúl Guachichullca Bermeo

Director:

Juan Bautista Sanango Fernández

ORCID: 0000-0002-3654-6134

Cuenca, Ecuador

2023-03-07

Resumen

Es importante analizar el comportamiento armónico de la red de distribución ante la conexión de sistemas de generación solar fotovoltaica (SFV), ya que la conexión de estos sistemas puede provocar problemas de calidad de energía en el sistema de distribución; por lo cual, en el presente artículo se presenta la implementación de métodos útiles para el análisis de armónicos en el punto común de acoplamiento (PCC por sus siglas en inglés). Los métodos a implementar utilizan las mediciones de calidad del producto realizadas por la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur - CENTROSUR. Inicialmente, se estima la impedancia armónica del consumidor y de la red con el objetivo de determinar la contribución armónica, antes y después de la conexión de un SFV. Posteriormente se analiza el impacto en los armónicos de voltaje y corriente ante la conexión de un SFV en el PCC mediante simulaciones, para lo cual se debe generar un modelo equivalente que represente el comportamiento armónico de la carga y la red de distribución. Para esto, previo a conectar el SFV, se calibra el voltaje armónico del modelo equivalente de la red, contrastando los resultados de las simulaciones con los valores medidos. En primera instancia se utiliza el método de estimación de estado armónico (HSE por sus siglas en inglés), para posteriormente aplicar algoritmos de optimización: aproximación estocástica de perturbación simultánea (SPSA por sus siglas en inglés) y genético, de tal forma que las simulaciones representen el estado real del sistema, minimizando la diferencia entre mediciones y simulaciones.

Palabras clave: impedancia armónica, contribución armónica, estimación de estado, algoritmo SPSA, algoritmo genético.

Abstract

It is important to analyze the harmonic behavior of the distribution network when connecting solar photovoltaic generation systems (PVS), since the connection of these systems can cause power quality problems in distribution system; therefore, this article presents the implementation of useful methods for harmonic analysis at the point of common coupling (PCC). The methods to be implemented use the product quality measurements performed by Empresa Eléctrica Regional Centro Sur - CENTROSUR. Initially, the harmonic impedance of the consumer and the utility is estimated in order to determine the harmonic contribution, before and after the connection of a PVS. Subsequently, the impact on voltage and current harmonics when a PVS is connected to the PCC is analyzed by simulations, for which an equivalent model representing the harmonic behavior of the load and the distribution network must be generated. For this, before connecting the PVS, it is necessary to calibrate the harmonic voltage of the utility model, contrasting the results of the simulations with the measured values. In the first instance, the harmonic state estimation (HSE) method is used, and then optimization algorithms are applied: simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA) and genetic algorithms, so that the simulations represent the real state of the system, minimizing the difference between measurements and simulations.

Keywords: harmonic impedance, harmonic contribution, harmonic state estimation, SPSA algorithm, genetic algorithm.

Índice de Contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Introducción.....	15
Antecedentes	17
Estimación de la Impedancia Armónica	17
Estimación de la Contribución Armónica de la red y del Consumidor en el PCC	18
Estimación de Estado Armónico	19
Procedimiento de Simulación - Optimización Para la Calibración de Modelo de Simulación de Sistema de Distribución	20
Metodología	22
Estimación de la Impedancia Armónica y Contribución Armónica	22
Impedancia Armónica de la red	22
Impedancia Armónica del consumidor.....	25
Calibración del Modelo de Simulación del Sistema de Distribución	29
Valor Inicial de Fuentes Armónicas Mediante Estimación de Estado Armónico Estático	31
Calibración con Algoritmo de Aproximación Estocástica de Perturbación Simultánea ..	32
Calibración con Algoritmos Genéticos	34
Impedancia Armónica y Contribución Armónica	36
Caso de Estudio	36
Resultados Obtenidos	37
Impedancia y Contribución Armónica en el PCC sin Generación Solar Fotovoltaica.....	37
Impedancia y contribución armónica en el PCC con generación solar fotovoltaica	40
Simulación Para Evaluar el Impacto de la Generación Fotovoltaica.....	43
Caso de Estudio	43
Calibración del Modelo del Sistema	43
Implementación de Estimación de Estado Armónico	44
Implementación de SPSA	45
Implementación de Algoritmos Genéticos	47
Modelo del Sistema Fotovoltaico	48

Resultados Obtenidos	49
Conclusiones.....	56
Recomendaciones	58
Referencias	59
Anexos	63
Anexo A: Comparación entre impedancia armónica de la red e impedancia de cortocircuito antes de la conexión del sistema de generación fotovoltaica.	63
Anexo B: Comparación entre impedancia armónica de la red antes y después de la conexión del sistema de generación fotovoltaica.	66
Anexo C: Comparación de la impedancia armónica del consumidor antes y después de la conexión del sistema de generación fotovoltaica.	70
Anexo D: Contribución armónica de voltaje y corriente antes de la conexión del sistema de generación fotovoltaica.	74
Anexo E: Contribución armónica de voltaje y corriente después de la conexión del sistema de generación fotovoltaica.	82
Anexo F: Ajuste de armónicos de voltaje en el PCC mediante HSE.	90
Anexo G: Ajuste de armónicos de voltaje en el PCC mediante SPSA.	93
Anexo H: Ajuste de armónicos de voltaje en el PCC mediante algoritmos genéticos.	97
Anexo I: Armónicos de corriente generados por el SFV.	100
Anexo J: Armónicos de voltaje y corriente en el PCC con la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo SPSA.	104
Anexo K: Armónicos de voltaje y corriente en el PCC con la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo genético.	111
Anexo L: Armónicos de voltaje y corriente en el lado de medio voltaje.	118

Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de los procedimientos para la medición de la impedancia armónica (Kannan & Meyer, 2019).....	18
Figura 2. Circuito equivalente en el PCC (Xu et al., 2020).	23
Figura 3. Procedimiento para promediar todos los n valores de V_{uh} donde M es el número total de muestras, N es el número de muestras por subintervalo y p es el número subintervalos.	24
Figura 4. Modelo de carga armónica del consumidor (Dugan et al., 2015; Ramos et al., 2015; Vieira et al., 2018).....	25
Figura 5. (a) Circuito equivalente de Thévenin. (b) Modelo de superposición para la evaluación del voltaje armónico (Farhoodnea et al., 2010; Gül & Gündoğdu, 2015).	28
Figura 6. Diagrama fasorial de la contribución armónica de voltaje.....	28
Figura 7. Modelo equivalente para la evaluación de la distorsión armónica.....	30
Figura 8. Referencia de lugar de mediciones de calidad realizada por CENTROSUR.	36
Figura 9. Mediciones de calidad procesadas en el software WinPQ mobil para el tercer armónico.	37
Figura 10. Magnitud y ángulo de impedancia armónica de la red para el tercer armónico. ..	38
Figura 11. Fuente de voltaje armónica de la red para el tercer armónico.....	38
Figura 12. Impedancia armónica del consumidor para el tercer armónico.	39
Figura 13. Fuente de corriente armónica del consumidor para el tercer armónico.	39
Figura 14. Contribución armónica de voltaje y corriente para el tercer armónico.....	40
Figura 15. Promedio de contribución armónica de voltaje y corriente.	40
Figura 16. Magnitud y ángulo de impedancia armónica de la red para el tercer armónico después de la conexión del SFV.	41
Figura 17. Magnitud y ángulo de impedancia armónica del consumidor para el tercer armónico después de la conexión del SFV.	41
Figura 18. Promedio de contribución armónica de voltaje y corriente después de la conexión del SFV.	42
Figura 19. Tercer armónico de corriente en el PCC.	44
Figura 20. Tercer armónico de voltaje ajustado mediante HSE.	45
Figura 21. Ajuste del tercer armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.	46
Figura 22. Ajuste del tercer armónico de voltaje mediante algoritmos genéticos.....	48
Figura 23. Potencia activa y reactiva promedio del sistema fotovoltaico.	49
Figura 24. Tercer armónico de corriente generado por el SFV.	49

Figura 25. Tercer armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	50
Figura 26. Tercer armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	50
Figura 27. Tercer armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	52
Figura 28. Tercer armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	52
Figura 29. Tercer armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.....	54
Figura 30. Tercer armónico de corriente en el lado de medio voltaje.....	55
Figura 31. Impedancia armónica de la red para el tercer armónico.....	63
Figura 32. Impedancia armónica de la red para el quinto armónico.....	63
Figura 33. Impedancia armónica de la red para el séptimo armónico.....	64
Figura 34. Impedancia armónica de la red para el noveno armónico.....	64
Figura 35. Impedancia armónica de la red para el onceavo armónico.....	65
Figura 36. Impedancia armónica de la red para el treceavo armónico.....	65
Figura 37. Impedancia armónica de la red para el quinceavo armónico.....	66
Figura 38. Impedancia armónica de la red para el tercer armónico antes y después de la conexión del SFV.....	66
Figura 39. Impedancia armónica de la red para el quinto armónico antes y después de la conexión del SFV.....	67
Figura 40. Impedancia armónica de la red para el séptimo armónico antes y después de la conexión del SFV.....	67
Figura 41. Impedancia armónica de la red para el noveno armónico antes y después de la conexión del SFV.....	68
Figura 42. Impedancia armónica de la red para el onceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.....	68
Figura 43. Impedancia armónica de la red para el treceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.....	69
Figura 44. Impedancia armónica de la red para el quinceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.....	69
Figura 45. Impedancia armónica del consumidor para el tercer armónico antes y después de la conexión del SFV.....	70
Figura 46. Impedancia armónica del consumidor para el quinto armónico antes y después de la conexión del SFV.....	71

Figura 47. Impedancia armónica del consumidor para el séptimo armónico antes y después de la conexión del SFV.....	71
Figura 48. Impedancia armónica del consumidor para el noveno armónico antes y después de la conexión del SFV.....	72
Figura 49. Impedancia armónica del consumidor para el onceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.....	72
Figura 50. Impedancia armónica del consumidor para el treceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.....	73
Figura 51. Impedancia armónica del consumidor para el quinceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.....	73
Figura 52. Contribución armónica de voltaje para el tercer armónico.....	74
Figura 53. Contribución armónica de corriente para el tercer armónico.....	74
Figura 54. Contribución armónica de voltaje para el quinto armónico.....	75
Figura 55. Contribución armónica de corriente para el quinto armónico.....	75
Figura 56. Contribución armónica de voltaje para el séptimo armónico.....	76
Figura 57. Contribución armónica de corriente para el séptimo armónico.....	76
Figura 58. Contribución armónica de voltaje para el noveno armónico.....	77
Figura 59. Contribución armónica de corriente para el noveno armónico.....	77
Figura 60. Contribución armónica de voltaje para el onceavo armónico.....	78
Figura 61. Contribución armónica de corriente para el onceavo armónico.....	78
Figura 62. Contribución armónica de voltaje para el treceavo armónico.....	79
Figura 63. Contribución armónica de corriente para el treceavo armónico.....	79
Figura 64. Contribución armónica de voltaje para el quinceavo armónico.....	80
Figura 65. Contribución armónica de corriente para el quinceavo armónico.....	80
Figura 66. Promedio de contribución armónica de voltaje.....	81
Figura 67. Promedio de contribución armónica de corriente.....	81
Figura 68. Contribución armónica de voltaje para el tercer armónico después de la conexión del SFV.....	82
Figura 69. Contribución armónica de corriente para el tercer armónico después de la conexión del SFV.....	82
Figura 70. Contribución armónica de voltaje para el quinto armónico después de la conexión del SFV.....	83
Figura 71. Contribución armónica de corriente para el quinto armónico después de la conexión del SFV.....	83
Figura 72. Contribución armónica de voltaje para el séptimo armónico después de la conexión del SFV.....	84

Figura 73. Contribución armónica de corriente para el séptimo armónico después de la conexión del SFV.....	84
Figura 74. Contribución armónica de voltaje para el noveno armónico después de la conexión del SFV.....	85
Figura 75. Contribución armónica de corriente para el noveno armónico después de la conexión del SFV.....	85
Figura 76. Contribución armónica de voltaje para el onceavo armónico después de la conexión del SFV.....	86
Figura 77. Contribución armónica de corriente para el onceavo armónico después de la conexión del SFV.....	86
Figura 78. Contribución armónica de voltaje para el treceavo armónico después de la conexión del SFV.....	87
Figura 79. Contribución armónica de corriente para el treceavo armónico después de la conexión del SFV.....	87
Figura 80. Contribución armónica de voltaje para el quinceavo armónico después de la conexión del SFV.....	88
Figura 81. Contribución armónica de corriente para el quinceavo armónico después de la conexión del SFV.....	88
Figura 82. Promedio de contribución armónica de voltaje después de la conexión del SFV.	89
Figura 83. Promedio de contribución armónica de corriente después de la conexión del SFV.	89
Figura 84. Ajuste de tercer armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.	90
Figura 85. Ajuste de quinto armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.	90
Figura 86. Ajuste de séptimo armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.....	91
Figura 87. Ajuste de noveno armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.	91
Figura 88. Ajuste de onceavo armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.....	92
Figura 89. Ajuste de treceavo armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.	92
Figura 90. Ajuste de quinceavo armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.....	93
Figura 91. Ajuste del tercer armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.	93
Figura 92. Ajuste del quinto armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.	94
Figura 93. Ajuste del séptimo armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.....	94
Figura 94. Ajuste del noveno armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.	95
Figura 95. Ajuste del onceavo armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.....	95
Figura 96. Ajuste del treceavo armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.	96
Figura 97. Ajuste del quinceavo armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.....	96

Figura 98. Magnitud de voltaje armónico de orden 3.....	97
Figura 99. Magnitud de voltaje armónico de orden 5.....	97
Figura 100. Magnitud de voltaje armónico de orden 7.	98
Figura 101. Magnitud de voltaje armónico de orden 9.	98
Figura 102. Magnitud de voltaje armónico de orden 11.	99
Figura 103. Magnitud de voltaje armónico de orden 13.	99
Figura 104. Magnitud de voltaje armónico de orden 15.	100
Figura 105. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 3.	100
Figura 106. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 5.	101
Figura 107 . Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 7.	101
Figura 108. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 9.	102
Figura 109. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 11.	102
Figura 110. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 13.	103
Figura 111. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 15.	103
Figura 112. Tercer armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	104
Figura 113. Tercer armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	104
Figura 114. Quinto armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	105
Figura 115. Quinto armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	105
Figura 116. Séptimo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	106
Figura 117. Séptimo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	106
Figura 118. Noveno armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	107
Figura 119. Noveno armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	107
Figura 120. Onceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	108
Figura 121. Onceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	108
Figura 122. Treceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	109

Figura 123. Treceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	109
Figura 124. Quinceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	110
Figura 125. Quinceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	110
Figura 126. Tercer armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	111
Figura 127. Tercer armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	111
Figura 128. Quinto armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	112
Figura 129. Quinto armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	112
Figura 130. Séptimo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	113
Figura 131. Séptimo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	113
Figura 132. Noveno armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	114
Figura 133. Noveno armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	114
Figura 134. Onceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	115
Figura 135. Onceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	115
Figura 136. Treceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	116
Figura 137. Treceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	116
Figura 138. Quinceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	117
Figura 139. Quinceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	117
Figura 140. Tercer armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.....	118
Figura 141. Tercer armónico de corriente en el lado de medio voltaje.....	118

Figura 142. Quinto armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.....	119
Figura 143. Quinto armónico de corriente en el lado de medio voltaje.	119
Figura 144. Séptimo armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.	120
Figura 145. Séptimo armónico de corriente en el lado de medio voltaje.	120
Figura 146. Noveno armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.....	121
Figura 147. Noveno armónico de corriente en el lado de medio voltaje.	121
Figura 148. Onceavo armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.....	122
Figura 149. Onceavo armónico de corriente en el lado de medio voltaje.	122
Figura 150. Treceavo armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.	123
Figura 151. Treceavo armónico de corriente en el lado de medio voltaje.....	123
Figura 152. Quinceavo armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.	124
Figura 153. Quinceavo armónico de corriente en el lado de medio voltaje.	124

Índice de Tablas

Tabla 1. Error promedio del voltaje armónico en el PCC – modelo calibrado mediante HSE.	45
Tabla 2. Error promedio del voltaje armónico en el PCC – modelo calibrado mediante SPSA.	46
Tabla 3. Error promedio del voltaje en el PCC – modelo calibrado mediante algoritmos genéticos.....	48
Tabla 4. Valores promedio de la simulación sin la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	51
Tabla 5. Valores promedio de la simulación con la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo SPSA.....	51
Tabla 6. Valores promedio de la simulación sin la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	53
Tabla 7. Valores promedio de la simulación con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.....	53
Tabla 8. Valores promedio de la simulación con la conexión del SFV en medio voltaje.....	54

**ESTE TRABAJO DE TITULACIÓN HA SIDO DESARROLLADO DENTRO DEL
CONVENIO MARCO ENTRE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA Y LA EMPRESA
ELÉCTRICA REGIONAL CENTRO SUR C.A.**

Los autores agradecen al departamento de planificación de la Empresa Eléctrica Regional CENTRO SUR C.A. por la información y los conocimientos aportados durante el desarrollo de este trabajo de titulación.

Introducción

La creciente demanda de energía eléctrica conlleva a la necesidad de establecer un modelo diferente al de generación centralizada ya que con el aprovechamiento de los recursos naturales como el viento y la radiación solar se pueden implementar modelos energéticos de generación distribuida en donde el recurso energético se encuentra en la localidad de los consumidores. El modelo de generación distribuida representa la implementación de instalaciones pequeñas, en contraste con las grandes centrales eléctricas, conectadas cerca de los consumidores. Si se considera una alta penetración de generación distribuida se deben tomar en cuenta problemas técnicos en cuanto a la capacidad de alojamiento, calidad de energía, disminución de la confiabilidad, eficiencia, sobretensiones, problemas de seguridad, etc., por lo que se deben comprobar el impacto de la implementación de la generación distribuida en los sistemas de distribución, además de considerar que los sistemas de distribución no fueron diseñados para la incorporación de sistemas de generación distribuida (L. Álvarez, 2017).

El avance de la tecnología en el desarrollo de dispositivos electrónicos, como los rectificadores e inversores, y la masificación de aparatos de electrónica de potencia, hacen que la carga conectada a la red de distribución genere una variedad de componentes armónicos; esto, junto con los diferentes periodos de utilización o funcionamiento de los dispositivos y las diferentes categorías de consumidores (Bosovic et al., 2016), producen una distorsión armónica en la forma de onda de corriente y voltaje en los sistemas de distribución generando un grave problema de calidad de energía (Liu et al., 2020),(Xu et al., 2020).

Una manera de disminuir los niveles de contaminación armónica es mediante iniciativas de recompensa y castigo (Liu et al., 2020), para lo cual, se debe cuantificar correctamente el nivel de contaminación armónica que emite el usuario y la propia red de distribución. Para esto es necesario conocer de forma precisa la impedancia armónica equivalente del lado de la red y del consumidor, ya que con el circuito equivalente se puede calcular los aportes a la distorsión armónica de cada uno. Además de la impedancia, se deben estimar las fuentes de voltaje o corriente que generan la distorsión. Las cargas del consumidor inyectan armónicos a la red, generalmente son las cargas de bajo voltaje, no lineales, representadas por una impedancia constante y una fuente de corriente armónica. En el PCC, la red de distribución en medio voltaje, también aporta armónicos; por lo que, la red puede representarse por una fuente de voltaje armónica que contiene la distorsión armónica de fondo (Bosovic et al., 2016), (Hui et al., 2012; Liu et al., 2020).

Actualmente debido a la extensión y composición de los sistemas eléctricos de distribución, es complejo la determinación de las componentes armónicas de la red, es por esto que se

estiman las fuentes armónicas mediante el método HSE, en donde se deben caracterizar los elementos del sistema de distribución como cargas, transformadores y el equivalente de la red. Resolviendo el sistema de manera matricial, se estiman las fuentes armónicas de la red con cierto error de cálculo. En el caso de que el error sea demasiado elevado, se debe complementar el método HSE con técnicas de optimización para mejorar el ajuste de las fuentes armónicas; es por esto que se propone dos algoritmos: SPSA y genético.

El ajuste de las fuentes de voltaje estimadas se puede representar como un problema de optimización en donde se debe minimizar la diferencia entre resultados de simulaciones y mediciones. Para este análisis, se considera las mediciones en un consumidor de medio voltaje perteneciente al alimentador 0821 de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur - CENTROSUR.

Antecedentes

Estimación de la Impedancia Armónica

La importancia de la determinación de la impedancia armónica se verifica en las áreas de estudio sobre el comportamiento armónico de los sistemas eléctricos (Xu et al., 2020), algunos de estos estudios son: la evaluación de los niveles de emisión armónica, la determinación de la responsabilidad armónica, el diseño de filtros, la comprobación de límites armónicos y estudios de resonancia del sistema. En (Kannan & Meyer, 2019) se implementa métodos de detección de resonancias armónicas basadas en la medición de la impedancia armónica. Un análisis nodal para evaluar la distribución de tensiones y corrientes a través de una red de potencia lineal y una metodología para el diseño de filtros en función de las impedancias armónicas del sistema se presenta en (Arrillaga et al., n.d.). Además, como las características de los elementos no lineales generalmente se plantean como fuentes de corriente, cuando se requiere verificar su influencia en el voltaje, las impedancias armónicas del sistema deben ser conocidas (Hendrik Venter & Cronje, 2001).

Debido a la complejidad y extensión del sistema eléctrico existen una gran variedad de metodologías para la estimación de la impedancia armónica, los cuales pueden agruparse en 2 tipos de procedimientos: los métodos invasivos y no invasivos (Kannan & Meyer, 2019; Liu et al., 2020), como se resumen en la Figura 1. Los métodos invasivos requieren de la inyección de una señal eléctrica en el sistema para capturar las perturbaciones de voltaje y corriente, lo que permite determinar la impedancia armónica, como en (Shi et al., n.d.), dónde proponen un circuito para la obtención de la impedancia mediante la inyección de perturbaciones en la red. Por otro lado, los métodos no invasivos se basan en el procesamiento y análisis de datos obtenidos de mediciones de voltaje y corriente en el PCC; algunas de las metodologías para la estimación de la impedancia armónica basada en mediciones son: método de la selección de datos (Hui et al., 2012), método de la regresión lineal (Liu et al., 2020), método de la norma mínima (Xu et al., 2020), etc.

En el método de la selección de datos se plantean criterios estadísticos como el análisis de la varianza y el coeficiente de determinación de los datos medidos para encontrar rangos de datos válidos en donde la estimación de la impedancia armónica sea representativa (Hui et al., 2012). En el método de la regresión lineal se busca aplicar técnicas de procesamiento de datos, como el filtrado y agrupamiento, para determinar la correlación lineal entre voltaje y corriente armónicos medidas en el PCC, de esta forma la impedancia armónica estará determinada por uno de los parámetros estimados del modelo lineal que relaciona las variables de voltaje y corriente armónicos (Liu et al., 2020). El método de la norma mínima considera que la impedancia armónica varía con el tiempo, pero estas variaciones no son

grandes en intervalos adyacentes por lo que propone un método de minimización de la función objetivo que considera la norma de la diferencia de la impedancia y voltaje armónico de la red en momentos adyacentes (Xu et al., 2020).

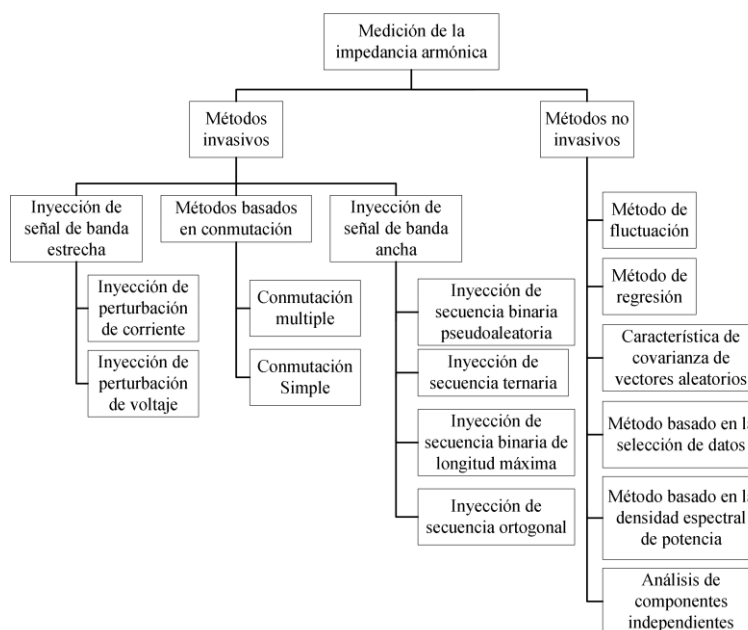


Figura 1. Clasificación de los procedimientos para la medición de la impedancia armónica (Kannan & Meyer, 2019).

La determinación de la contribución armónica en el PCC es una de las principales aplicaciones de impedancia armónica (Liu et al., 2020), para lo cual se deben determinar con precisión los parámetros equivalentes de la red y consumidor, y así plantear el circuito equivalente de Thévenin para el armónico h .

Estimación de la Contribución Armónica de la red y del Consumidor en el PCC

El objetivo de la estimación de la contribución armónica es determinar el nivel de distorsión que emite el lado de la red y el lado del consumidor individualmente en el PCC (Liu et al., 2020). La evaluación precisa de los niveles de contribución permite la aplicación de iniciativas de recompensas y castigos para los consumidores, lo cual tiene como propósito disminuir la contaminación armónica (Liu et al., 2020), (Pfajfar, Blažič, et al., 2008).

La variedad de tipos de cargas conectadas en el PCC, generalmente dispositivos de electrónica de potencia, y los sistemas de generación distribuida conectados mediante inversores, hacen que sea de suma importancia la evaluación apropiada de los niveles de perturbación armónica generados por las cargas y por la red, este último denominado también como distorsión de fondo, principalmente para la prevención de un posible impacto negativo

a la red en el momento de la conexión de nuevos elementos emisores de armónicos y además, por las siguientes razones:

- Para mantener los límites de distorsión armónica dentro de los rangos establecidos por las normativas (Spelko et al., 2017).
- Para establecer e implementar políticas que incentiven una adecuada asignación de responsabilidades debido a problemas de calidad de energía (Spelko et al., 2017).

Existen varios métodos para determinar la contribución armónica. Una metodología precisa es instalar medidores de calidad sincronizados en varios puntos de la red para medir los niveles de contribución, pero debido a la complejidad y extensión del sistema esto, representa una tarea difícil y costosa (Pfajfar, Blažič, et al., 2008); por lo que se han desarrollado métodos más prácticos que se basan en mediciones en un solo punto de la red (PCC). Uno de los métodos empleados para determinar la contribución armónica es el método de vector armónico, en el cual se requiere el cálculo de los parámetros equivalentes de la red y del consumidor para establecer el circuito equivalente de Thévenin para cada armónico (Liu et al., 2020), (Spelko et al., 2017). Por otro lado, el método de fasor de voltaje se basa en comparar los cambios en las distorsiones armónicas de voltaje antes y después de conectar la carga del usuario; este método también representa el lado de la red y del cliente por medio de un circuito equivalente de Thévenin, además, se considera como un parámetro conocido la impedancia de la red, o una impedancia de referencia y plantea la condición de que se puede calcular la emisión armónica solo si la magnitud de voltaje medido es mayor que la magnitud de voltaje de fondo calculada (Iec, 2008). También existen métodos basados en algoritmos de flujos armónicos, en donde se pretende encontrar únicamente la dirección del flujo, es decir, simplemente se puede conocer quién es el responsable de la contaminación armónica (Spelko et al., 2017).

Estimación de Estado Armónico

Debido al aumento de la demanda de energía eléctrica, los armónicos que se inyectan en las redes de distribución generados por cargas no lineales van en aumento, es por esto que para garantizar la calidad de energía se deben implementar técnicas de monitoreo y control. La estimación del estado armónico es una de las principales técnicas que se han desarrollado para obtener valores de tensiones y corrientes con cierta precisión en varias ubicaciones de la red en base a datos medidos. Las principales partes que constituyen las metodologías de estimación de estados son: modelado del sistema y el algoritmo de estimación (Mohd Nor et al., 2011), las cuales mediante comparaciones de valores calculados con los datos medidos de voltaje o corriente en ciertos puntos pretenden estimar los niveles de armónicos en ubicaciones no supervisadas (Bhujel et al., 2017).

Existen varias metodologías para la estimación del estado armónico, tales como: mínimos cuadrados ponderados, maximización de la dispersión, Transformada rápida de Fourier, Jacobiano construido sistemáticamente, la Transformada de Wavelet, redes neuronales, algoritmos híbridos, etc. Además, a lo largo del tiempo se ha demostrado la eficiencia de cada una de estas metodologías (Mohd Nor et al., 2011).

Las variables del sistema se relacionan mediante ecuaciones básicas de circuitos eléctricos o ecuaciones nodales, por lo que se emplean métodos matriciales para la estimación de estado armónico. En ocasiones las matrices que se generan con los parámetros o configuración de los elementos (líneas, transformadores, cargas, etc.) del sistema eléctrico son singulares, lo que representa un problema matemático. En (Bhujel et al., 2017) se determina las variables armónicas del sistema mediante la estimación de estados armónicos, en la cual para resolver sus sistemas matriciales se utiliza la descomposición de valores singulares (SVD por sus siglas en inglés) la cual es una técnica matemática robusta para la obtención de soluciones singulares o cuasi singulares.

Procedimiento de Simulación - Optimización Para la Calibración de Modelo de Simulación de Sistema de Distribución

La utilidad de un modelo está determinada por la precisión de sus resultados cuando son comparados con datos reales, es decir un modelo es útil cuando sus resultados son cercanos a valores medidos en un sistema real, para ello los parámetros que caracterizan el modelo deben tomar valores que permitan que sus resultados sean realistas. Por lo tanto, el proceso de calibración de un modelo tiene como objetivo determinar los valores que deben tomar ciertos parámetros para que el modelo represente correctamente un sistema real. La calibración de un modelo se basa específicamente en asignar valores a ciertos parámetros y comparar los resultados de simulaciones con datos medidos, es decir se buscan los parámetros que minimizan las diferencias entre resultados simulados y datos medidos (Balcázar Castell Directores & Montero Mercadé Jaume Barceló Bugeda, 2016).

Los modelos informáticos se desarrollan en base a leyes físicas y matemáticas que generalmente suponen simplificaciones para que los problemas sean manejables, esto implica que las predicciones realizadas en base a estos modelos fallen cuando las suposiciones no son tomadas en cuenta, es por esto que los parámetros deben estimarse con precisión (Cao et al., 2018).

Las metodologías de calibración son técnicas de optimización de una función objetivo que depende de los errores entre resultados simulados y datos medidos. Dado que las simulaciones son costosas en términos computacionales y que generalmente no se las

pueden representar como funciones analíticas, es decir no tienen funciones diferenciables, se puede aplicar aproximaciones. Es por esto que se han desarrollado metodologías para la calibración de modelos basados en error y aproximación, con lo cual se trata de minimizar el error de una función objetivo. Por ejemplo, el método SPSA aproxima el valor del gradiente con solo dos medidas de la función objetivo para modificar los parámetros en el sentido opuesto del gradiente aproximado (Balcázar Castell Directores & Montero Mercadé Jaime Barceló Bugeda, 2016).

Se pueden aplicar también algoritmos metaheurísticos para realizar la búsqueda de los parámetros que mejor se ajusten a un modelo. En (Elvira-Ortiz et al., n.d.) se implementa algoritmos genéticos para la búsqueda de los parámetros de un modelo matemático que mejor se ajusten al comportamiento de la potencia de un sistema fotovoltaico en un día. En (Augusto et al., 2004) se plantea una metodología para la predicción de las corrientes armónicas generadas por cargas residenciales no lineales mediante la implementación de redes neuronales artificiales en donde se plantean como parámetros de entrada a las magnitudes de los armónicos de voltaje, para obtener a la salida la magnitud de las componentes de corriente.

Metodología

Estimación de la Impedancia Armónica y Contribución Armónica

El primer paso para el análisis de la distorsión en el PCC, es la elección de un método confiable y preciso para evaluar la contribución armónica. Según el grupo de trabajo CIGRE/CIREN C4.42 (Spelko et al., 2017), el método de vector armónico proporciona resultados más precisos para la determinación de esta contribución, por lo tanto, se selecciona este método para evaluar el voltaje y corriente armónica en el PCC, antes y después de la conexión del SFV.

El método de vector armónico requiere como parámetros de entrada el voltaje y corriente armónica en el PCC (V_{pcc}^h e I_{pcc}^h), la impedancia armónica de la red (Z_u^h), la impedancia armónica del consumidor según su modelo de carga (Z_c^h), la fuente armónica de la red (V_u^h o I_u^h) y la fuente armónica del consumidor (V_c^h o I_c^h); las fuentes armónicas pueden ser de voltaje o de corriente dependiendo de la contribución que se necesite calcular. Los parámetros V_{pcc}^h e I_{pcc}^h serán tomados de las mediciones de calidad en el lado de bajo voltaje del transformador de distribución. Las fuentes armónicas pueden obtenerse a partir de las impedancias armónicas Z_u^h y Z_c^h , que son los parámetros que describen el comportamiento en la frecuencia del sistema eléctrico de distribución en el PCC. Los métodos para la obtención de las impedancias armónicas se describen a continuación:

Impedancia Armónica de la red

De manera sencilla y práctica, la impedancia armónica de la red - Z_u^h puede ser considerada como una impedancia de referencia obtenida mediante la suma de la impedancia de cortocircuito de la red y la última impedancia del transformador antes del PCC como se indica en (Gül & Gündoğdu, 2015; Pfajfar, Blazic, et al., 2008); sin embargo, no se considera los cambios en la red, manteniéndose constante para todo el periodo de análisis de armónicos, lo cual genera error en el análisis. Este método no es muy conveniente para analizar un sistema de distribución, ya que la impedancia puede variar debido a cambios en el modo de funcionamiento del sistema, compensación de potencia reactiva o principalmente por la conexión y desconexión de cargas de usuarios que se encuentran aguas arriba del PCC.

Para estimar Z_u^h con el mínimo error, se usará el método no invasivo basado en la norma mínima de diferencia de impedancia presentado en (Xu et al., 2020), el cual se plantea que la impedancia armónica de la red varía en el periodo de medición, pero la variación de la impedancia no es grande entre muestras adyacentes. El método seleccionado es ideal para las mediciones de calidad, ya que no se supone que la impedancia armónica es constante en

el periodo de medición, además el método es robusto cuando la emisión armónica de fondo es alta y la impedancia armónica del lado del usuario es similar al lado de la red.

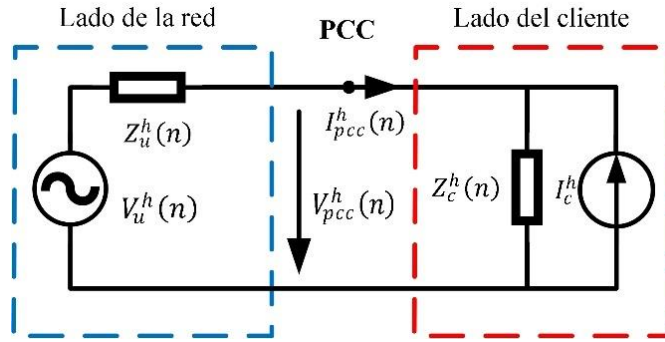


Figura 2. Circuito equivalente en el PCC (Xu et al., 2020).

El modelo del sistema está constituido por el equivalente de Thévenin para el circuito del lado de la red, mientras que el equivalente de Norton representa el circuito del lado del consumidor, como se muestra en la Figura 2. Según el modelo establecido, la siguiente ecuación describe el circuito equivalente de la red (Xu et al., 2020):

$$V_{pcc}^h(n) + Z_u^h(n)I_{pcc}^h(n) = V_u^h(n) \quad (1)$$

Donde todas las variables son vectores de N elementos para el armónico h , y n indica el n -ésimo elemento de los diferentes vectores. Además, todas las variables en el método son fasores. La impedancia armónica de la red puede obtenerse minimizando la función objetivo compuesta por las normas al cuadrado de la diferencia de impedancia armónica de la red $\Delta Z_u^h(n)$ y la diferencia del voltaje armónico de la red $\Delta V_u^h(n)$, como se indica en la ecuación (2); $\Delta Z_u^h(n)$ y $\Delta V_u^h(n)$ son valores pequeños, ya que corresponden a la diferencia de muestras adyacentes. Según (Xu et al., 2020), la solución de la función objetivo está dada por la ecuación (3), donde \widehat{V}_u^h es un vector de dimensión N , b_u es un vector de dimensión $N - 1$, H representa la transpuesta conjugada, A_u y B son matrices de dimensión $(N - 1) \times N$. El coeficiente de restricción λ tiene poca influencia en los errores de estimación, por lo tanto, se fija en 1 para el cálculo de Z_u^h (Xu et al., 2020), la cual se determina despejando la ecuación (1).

$$J = \|\Delta Z_u^h(n)\|^2 + \lambda \|\Delta V_u^h(n)\|^2 \quad (2)$$

$$\widehat{V}_u^h = (A_u^H A_u + \lambda B^H B)^{-1} A_u^H b_u \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_u = \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{pcc}^h(1)} & \frac{-1}{I_{pcc}^h(2)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_{pcc}^h(2)} & \frac{-1}{I_{pcc}^h(3)} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{I_{pcc}^h(N-1)} & \frac{-1}{I_{pcc}^h(N)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$b_u = \begin{bmatrix} \frac{V_{pcc}^h(1)}{I_{pcc}^h(1)} - \frac{V_{pcc}^h(2)}{I_{pcc}^h(2)} \\ \vdots \\ \frac{V_{pcc}^h(N-1)}{I_{pcc}^h(N-1)} - \frac{V_{pcc}^h(N)}{I_{pcc}^h(N)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{matrix} & n=1 & n=2 & n=3 & \dots & n=N & n=N+1 & n=N+2 & \dots & \dots & \dots & \dots & n=M \\ \text{Sub 1} & V_{1,1}^h & V_{1,2}^h & V_{1,3}^h & \dots & V_{1,N}^h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \text{Sub 2} & 0 & V_{2,1}^h & V_{2,2}^h & V_{2,3}^h & \dots & V_{2,N}^h & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \text{Sub 3} & 0 & 0 & V_{3,1}^h & V_{3,2}^h & V_{3,3}^h & \dots & V_{3,N}^h & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \text{Sub p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & V_{p,1}^h & V_{p,2}^h & V_{p,3}^h & \dots & V_{p,N}^h \end{matrix}$$

Figura 3. Procedimiento para promediar todos los n valores de \widehat{V}_u^h donde M es el número total de muestras, N es el número de muestras por subintervalo y p es el número subintervalos.

Los pasos para aplicar el método de la norma mínima de diferencia de impedancia se resumen a continuación (Xu et al., 2020):

- a) Obtener los datos de voltaje y corriente armónica en el PCC a partir de las mediciones de calidad.
- b) Se divide todos los puntos de medición en subintervalos. Para cada subintervalo se debe usar una ventana deslizante que abarque todos los datos de entrada del paso a).
- c) En cada subintervalo se deberá calcular B , A_u y b_u de acuerdo a las ecuaciones (4), (5) y (6), respectivamente.
- d) Calcular \widehat{V}_u^h mediante la ecuación (3) para cada subintervalo. Es necesario crear una matriz con todos los valores calculados en cada subintervalo, de esta forma se obtendrá el promedio de $\widehat{V}_u^h(n)$ para cada n punto de medición. En la Figura 3 se muestra que los

resultados de \widehat{V}_u^h para cada subintervalo son almacenados en filas, cada fila de resultados se desplaza una posición adelante para indicar el deslizamiento de la ventana de subintervalos. Se realiza el promedio para cada columna según el número de datos no nulos.

e) Una vez obtenido el vector $\widehat{V}_u^h(n)$ del paso d), se calcula Z_u^h mediante la ecuación (1).

Impedancia Armónica del consumidor

La impedancia armónica del consumidor - Z_c^h puede ser calculada por los parámetros armónicos medidos en el PCC. En (Farhoodnea et al., 2010; Gül & Gündoğdu, 2015) se muestra que la impedancia armónica del consumidor puede ser modelada mediante un circuito RLC, en el cual sus parámetros son calculados en base de las mediciones de voltaje y corriente. Esta impedancia definida mediante un modelo RLC a partir de mediciones, da un resultado equivalente a calcular la impedancia de forma directa con las relaciones eléctricas de potencia; usando en este caso las mediciones de potencia, voltaje y corriente a frecuencia fundamental; los parámetros que varían con la frecuencia son la reactancia y susceptancia del modelo. La impedancia armónica del consumidor es representada por un equivalente de Norton, como se muestra en la Figura 2; la ecuación que describe el equivalente del lado del consumidor viene dada por (7).

$$V_{pcc}^h - Z_c^h I_{pcc}^h = Z_c^h I_c^h \tag{7}$$

El modelo RLC puede ser válido para el cálculo de la impedancia armónica del consumidor, sin embargo, se utilizará el modelo de la carga armónica de OpenDSS (Dugan et al., 2015; Ramos et al., 2015; Vieira et al., 2018), el cual describe de mejor manera el comportamiento real de la carga; este modelo se muestra en la Figura 4.

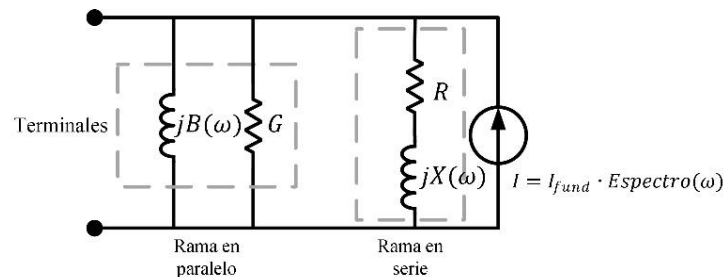


Figura 4. Modelo de carga armónica del consumidor (Dugan et al., 2015; Ramos et al., 2015; Vieira et al., 2018).

La rama en paralelo $G - B$ tomará el 50% del porcentaje de la carga mientras que el otro 50% será tomado para modelar la rama en serie $R - X$, es decir, para el modelado de los

parámetros necesarios para el cálculo de la impedancia armónica del consumidor, la potencia medida en el PCC se repartirá equitativamente en la rama en serie y en la rama en paralelo. El cálculo de los parámetros es determinado de la siguiente manera:

$$P_{pcc}^1 = P_{G-B} + P_{R-X} \quad (8)$$

$$P_{G-B} = \frac{P_{pcc}^1}{2} \quad (9)$$

$$P_{R-X} = \frac{P_{pcc}^1}{2} \quad (10)$$

$$Q_{pcc}^1 = Q_{G-B} + Q_{R-X} \quad (11)$$

$$Q_{G-B} = \frac{Q_{pcc}^1}{2} \quad (12)$$

$$Q_{R-X} = \frac{Q_{pcc}^1}{2} \quad (13)$$

Donde P_{pcc}^1 y Q_{pcc}^1 son la potencia activa y reactiva medida en el PCC a frecuencia fundamental, respectivamente, P_{G-B} y Q_{G-B} son la potencia activa y reactiva para modelar la rama $G - B$, P_{R-X} y Q_{R-X} son la potencia activa y reactiva para modelar la rama $R - X$. Es necesario que todos los parámetros sean calculados usando el voltaje a frecuencia fundamental V_{pcc}^1 .

$$G = \frac{P_{G-B}}{|V_{pcc}^1|^2} \quad (14)$$

Para $Q_{G-B} > 0$:

$$B^h = \frac{-Q_{G-B}}{|V_{pcc}^1|^2 h} \quad (15)$$

Para $Q_{G-B} < 0$:

$$B^h = \frac{-Q_{G-B}}{|V_{pcc}^1|^2 h} \quad (16)$$

$$Y_{G-B}^h = G + jB^h \quad (17)$$

La admitancia armónica de la rama en paralelo es calculada mediante la ecuación (17), donde G es conductancia y B^h es susceptancia en función del armónico h . La susceptancia puede ser inductiva o capacitiva, como se indica en las ecuaciones (15) y (16), respectivamente.

$$R = P_{R-X} \frac{|V_{pcc}^1|^2}{P_{R-X}^2 + Q_{R-X}^2} \quad (18)$$

Para $Q_{R-X} > 0$:

$$X^h = Q_{R-X} \frac{|V_{pcc}^1|^2}{P_{R-X}^2 + Q_{R-X}^2} h \quad (19)$$

Para $Q_{R-X} < 0$:

$$X^h = Q_{R-X} \frac{|V_{pcc}^1|^2}{P_{R-X}^2 + Q_{R-X}^2} \left(\frac{1}{h}\right) \quad (20)$$

$$Z_{R-X}^h = R + jX^h \quad (21)$$

$$Z_C^h = \frac{1}{Y_{G-B}^h} || Z_{R-X}^h \quad (22)$$

La impedancia armónica de la rama en serie es calculada mediante la ecuación (21), donde R es resistencia y X^h es reactancia en función del armónico h . La reactancia puede ser inductiva o capacitiva, como se indica en las ecuaciones (19) y (20), respectivamente. Con todos los parámetros ya calculados, se puede obtener la impedancia armónica del consumidor mediante la ecuación (22), que es el paralelo del recíproco de la admitancia armónica de la rama en paralelo con la impedancia armónica de la rama en serie. Con la impedancia armónica del consumidor se puede calcular la fuente armónica del consumidor (I_C^h) mediante la ecuación (7).

Luego de haber obtenido todos los parámetros de entrada, se puede calcular la contribución armónica de voltaje y corriente mediante el método de vector armónico en el PCC. La contribución armónica se aplicará antes y después de la conexión del sistema de generación de energía fotovoltaica para analizar el impacto en la distorsión armónica. La contribución armónica, así como las impedancias y fuentes armónicas, se calculan para cada punto de medición.

Para hallar la contribución armónica de voltaje se utiliza el equivalente de Thévenin para ambos lados del sistema de distribución en el PCC, como se muestra en la Figura 5 (a).

Aplicando el principio de superposición mostrado en la Figura 5 (b), la contribución de voltaje armónico en el punto de conexión del consumidor y de la red puede ser determinada de la siguiente manera:

$$V_{pcc-u}^h = \frac{Z_c^h}{Z_u^h + Z_c^h} V_u^h \quad (23)$$

$$V_{pcc-c}^h = \frac{Z_u^h}{Z_u^h + Z_c^h} V_c^h \quad (24)$$

$$V_{pcc}^h = V_{pcc-u}^h + V_{pcc-c}^h \quad (25)$$

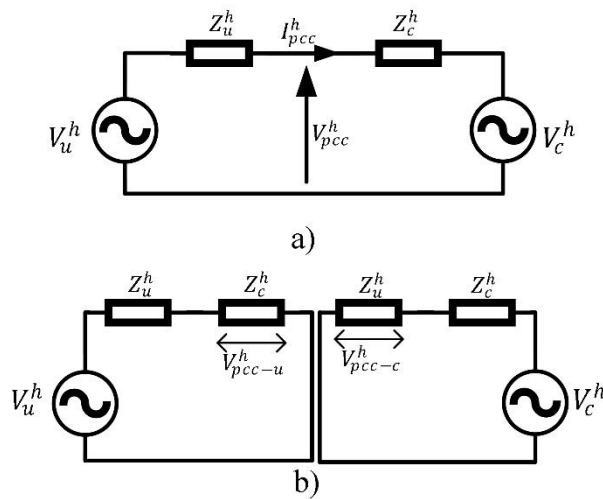


Figura 5. (a) Circuito equivalente de Thévenin. (b) Modelo de superposición para la evaluación del voltaje armónico (Farhoodnea et al., 2010; Gül & Gündoğdu, 2015).

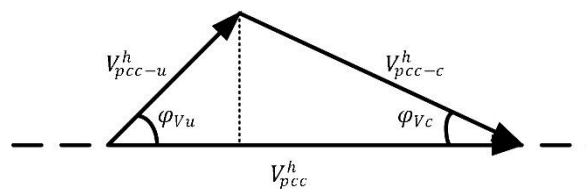


Figura 6. Diagrama fasorial de la contribución armónica de voltaje.

Donde V_{pcc-u}^h y V_{pcc-c}^h son las contribuciones armónicas de voltaje de la red y del cliente para el armónico h . El diagrama fasorial que describe la ecuación (23) se muestra en la Figura 6, de este diagrama se puede obtener la contribución armónica escalar porcentual de la red y del consumidor basándose en la proyección de los vectores V_{pcc-u}^h y V_{pcc-c}^h sobre el voltaje armónico en el PCC (V_{pcc}^h). La contribución armónica porcentual de voltaje de la red y del consumidor puede ser obtenida de la siguiente forma:

$$\%V_{pcc-u}^h = \frac{|V_{pcc-u}^h| \cos \varphi_{Vu}}{|V_{pcc}^h|} \times 100\% \quad (26)$$

$$\%V_{pcc-c}^h = \frac{|V_{pcc-c}^h| \cos \varphi_{Vc}}{|V_{pcc}^h|} \times 100\% \quad (27)$$

La contribución armónica de corriente se halla de forma similar que la contribución armónica de voltaje, aplicando el principio de superposición en el PCC, con la única diferencia que, en vez de usar el equivalente de Thévenin, se usa el equivalente de Norton para ambos lados del sistema. La contribución de corriente armónica en el punto de conexión del consumidor y de la red puede ser calculada de la siguiente manera:

$$I_{pcc-u}^h = \frac{Z_u^h}{Z_u^h + Z_c^h} I_u^h \quad (28)$$

$$I_{pcc-c}^h = -\frac{Z_c^h}{Z_u^h + Z_c^h} I_c^h \quad (29)$$

$$I_{pcc}^h = I_{pcc-u}^h + I_{pcc-c}^h \quad (30)$$

Donde I_{pcc-u}^h y I_{pcc-c}^h son las contribuciones armónicas de corriente de la red y del cliente para el armónico h . El cálculo de la contribución armónica escalar porcentual de corriente de la red y del consumidor es similar que el cálculo de contribución de voltaje, por lo tanto, se tiene:

$$\%I_{pcc-u}^h = \frac{|I_{pcc-u}^h| \cos \varphi_{Iu}}{|I_{pcc}^h|} \times 100\% \quad (31)$$

$$\%I_{pcc-c}^h = \frac{|I_{pcc-c}^h| \cos \varphi_{Ic}}{|I_{pcc}^h|} \times 100\% \quad (32)$$

Las fuentes armónicas encontradas mediante el proceso de estimación de la impedancia armónica son V_u^h y I_c^h . Para hallar I_u^h y V_c^h se aplica simplemente una transformación de fuentes o se modifica las ecuaciones de contribución para que estén en función de las fuentes V_u^h y I_c^h .

Calibración del Modelo de Simulación del Sistema de Distribución

El modelo equivalente del sistema eléctrico de distribución se presenta en la Figura 7; el cual cuenta con una red de medio y bajo voltaje. La red de medio voltaje está representada por un

equivalente de Thévenin, formado por una fuente trifásica de voltaje en serie con la matriz de impedancia equivalente del sistema de distribución; la fuente trifásica de voltaje contiene la distorsión de fondo de la red (fuente de voltaje armónica), la cual representa todas las cargas no lineales de la red que alimenta al transformador de distribución. Luego del equivalente de la red, está conectado el transformador de distribución; el PCC se considera en el lado de bajo voltaje. En el PCC se coloca una carga trifásica constituida de tres cargas monofásicas repartidas en cada fase del sistema; cada una es considerada no lineal, por lo cual, se coloca en paralelo una fuente de corriente que representa la distorsión armónica, como se muestra en la Figura 4. Para evaluar el impacto del sistema de generación fotovoltaica, se conecta en el PCC su modelo equivalente.

Es necesario calibrar las fuentes armónicas de la red antes de conectar el modelo del sistema de generación fotovoltaica a la red, de tal manera que el modelo represente el comportamiento armónico en el sistema de distribución. Para esto, se debe minimizar el error que existe entre las mediciones y simulaciones en el PCC.

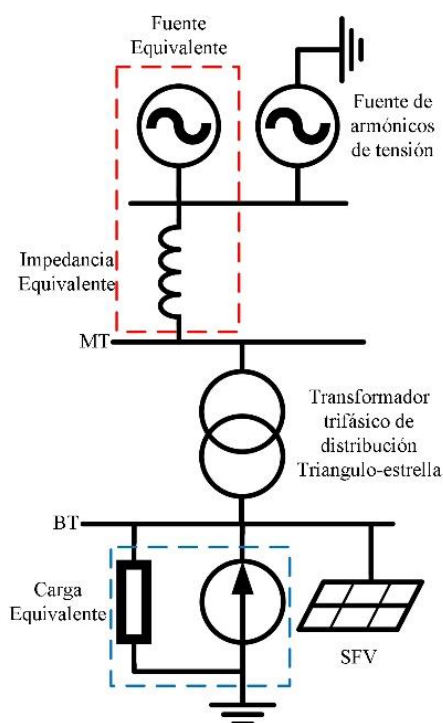


Figura 7. Modelo equivalente para la evaluación de la distorsión armónica.

La estimación de estado armónico estático será una de las herramientas que facilitará la calibración del modelo de simulación. Con las mediciones en el PCC, se puede dar un valor inicial a las fuentes armónicas de la red; sin embargo, el método por sí solo no es suficiente para minimizar el error que existe entre las mediciones y simulaciones en el PCC, por lo tanto,

debe complementarse con técnicas de optimización. Las técnicas de optimización a usarse son los algoritmos SPSA y genéticos.

Valor Inicial de Fuentes Armónicas Mediante Estimación de Estado Armónico Estático

El objetivo de la estimación de estado armónico es realizar la mejor estimación de la fuente armónica de voltaje de la red a partir de mediciones de calidad realizadas en el PCC. El problema de la estimación de estado parte de la ecuación (33).

$$z = Hx + e \tag{33}$$

Donde z es el vector de las mediciones en el PCC, x es el vector de las variables de estado, H es la matriz de mediciones y e es el error de las mediciones. Las mediciones y variables de estado son fasores de los armónicos de corriente y voltaje. Las variables de estado del sistema están relacionadas entre sí y pueden representarse matricialmente en forma de la ecuación nodal (34) (Bhujel et al., 2017).

$$[I_h] = [Y_h] [V_h] \tag{34}$$

Donde $[Y_h]$ es la matriz de admitancia, $[V_h]$ es el vector de voltaje de barra para el armónico h , $[I_h]$ es el vector de corriente inyectada para el armónico h . Como se requiere las fuentes armónicas de voltaje calibradas en el lado de media tensión, es necesario únicamente el modelo del transformador de distribución. La matriz de admitancia del transformador de distribución delta-estrella de grupo vectorial dy11 es definido según la ecuación (35) (Arrillaga & Watson, 2001; Wakileh, 2001). Según (Bhujel et al., 2017), la ecuación (34) y (35) del transformador pueden representarse como la ecuación (36).

$$\begin{bmatrix} y^h & 0 & 0 & -\frac{y^h}{\sqrt{3}} & \frac{y^h}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & y^h & 0 & 0 & -\frac{y^h}{\sqrt{3}} & \frac{y^h}{\sqrt{3}} \\ 0 & 0 & y^h & \frac{y^h}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{y^h}{\sqrt{3}} \\ -\frac{y^h}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{y^h}{\sqrt{3}} & \frac{2y^h}{3} & \frac{-y^h}{3} & \frac{-y^h}{3} \\ \frac{y^h}{\sqrt{3}} & -\frac{y^h}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{-y^h}{3} & \frac{2y^h}{3} & \frac{-y^h}{3} \\ 0 & \frac{y^h}{\sqrt{3}} & -\frac{y^h}{\sqrt{3}} & \frac{-y^h}{3} & \frac{-y^h}{3} & \frac{2y^h}{3} \end{bmatrix} \tag{35}$$

$$\begin{bmatrix} [I_k^h] \\ [I_{uk}^h] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_1^h] & [Y_2^h] \\ [Y_3^h] & [Y_4^h] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_k^h] \\ [V_{uk}^h] \end{bmatrix} \quad (36)$$

Donde y^h es la admitancia de fuga al armónico h , $[I_k^h]$ y $[V_k^h]$ son la corriente y voltaje armónica medida en el secundario para el armónico h , $[I_{uk}^h]$ y $[V_{uk}^h]$ son la corriente y voltaje armónica desconocida en el primario para el armónico h , $[Y_1^h]$ y $[Y_3^h]$ son sub matrices de la matriz de admitancia correspondientes a las tensiones armónicas conocidas para el armónico h , $[Y_2^h]$ y $[Y_4^h]$ son sub matrices de la matriz de admitancia correspondientes a las tensiones armónicas desconocidas para el armónico h . La ecuación (36) puede reorganizarse para estimar los parámetros desconocidos como se muestra en las ecuaciones (37) y (38).

$$[V_{uk}^h] = [Y_2^h]^+ ([I_k^h] - [Y_1^h][V_k^h]) \quad (37)$$

$$[I_{uk}^h] = [Y_3^h][V_k^h] + [Y_4^h][V_{uk}^h] \quad (38)$$

Donde $[Y_2^h]^+$ es la pseudo inversa de $[Y_2^h]$, la cual puede resolverse mediante descomposición de valores singulares. Siguiendo el modelo del equivalente del sistema de distribución, las fuentes de voltaje armónica pueden ser calculadas mediante la ecuación (39).

$$[V_U^h] = [V_{uk}^h] + [A][Z_{012}^h][A]^{-1}[I_{uk}^h] \quad (39)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$a = 1\angle 120^\circ, a^2 = 1\angle -120^\circ$$

Donde $[V_U^h]$ es el vector que contiene a los fasores de las fuentes de voltaje armónicas de la red, $[Z_{012}^h]$ es la matriz de impedancia de secuencia armónica que representa a la impedancia equivalente de la red.

Calibración con Algoritmo de Aproximación Estocástica de Perturbación Simultánea

La calibración de un modelo de simulación mediante la minimización de la función objetivo (Minimización de error entre mediciones y simulaciones) tiene que tener en consideración que el número de variables de decisión escogida debe adaptarse al algoritmo de optimización, la cantidad de evaluaciones de la función objetivo debe ser la mínima para evitar un alto costo computacional y el algoritmo no debe usar derivadas de la función objetivo, debido a que no se tratará como una función analítica (Balcázar Castell Directores & Montero Mercadé Jaime

Barceló Bugada, 2016); para que la calibración cumpla con estas características, se usará el algoritmo SPSA que consiste principalmente en estimar el gradiente de la función objetivo.

Se calibrará las fuentes armónicas de la red para las tres fases del sistema para cada armónico h . Las variables de decisión a trabajar son seis: 3 variables que corresponden la parte real de las fuentes de voltaje armónica para cada fase del sistema, 3 variables que corresponden la parte imaginaria de las fuentes de voltaje armónica para cada fase del sistema. La función objetivo a minimizar corresponde al error porcentual entre las mediciones y simulaciones en el PCC.

$$v^h = [R\{V_{U1}^h\}, I\{V_{U1}^h\}, R\{V_{U2}^h\}, I\{V_{U2}^h\}, R\{V_{U3}^h\}, I\{V_{U3}^h\}]^T \quad (41)$$

$$\min f = e_{|V|}^h(v^h) * A + e_{|\theta|}^h(v^h) * B \quad (42)$$

Sujeto a:

$$-T * V^1 \leq v^h \leq T * V^1 \quad (43)$$

Donde v^h son las variables de decisión correspondiente a la parte real e imaginaria de las fuentes de voltaje armónica para cada fase del sistema para el armónico h , $e_{|V|}^h(v^h)$ es el error porcentual de magnitudes entre las mediciones y simulaciones en función de las variables de decisión para el armónico h , $e_{|\theta|}^h(v^h)$ es el error porcentual de ángulos entre las mediciones y simulaciones en función de las variables de decisión para el armónico h . A y B son pesos para cuantificar la importancia del error de magnitud y ángulo, respectivamente; los valores de A y B tienen una relación de 10/1, esto debido a que principalmente se trata de calibrar la magnitud del voltaje en el PCC. Según el estándar IEEE 519 ("IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," 2014), cada armónico individual no debe superar el 3% de la frecuencia fundamental para medio voltaje. Por lo tanto, para establecer los límites de las variables de decisión se asigna un valor de T del 3%. V^1 es el voltaje de fase de medio voltaje a frecuencia fundamental. El algoritmo SPSA se implementó en Python, de tal forma que todos los armónicos pudiesen ser calibrados de manera simultánea siguiendo el algoritmo presentado a continuación:

Algoritmo 1: Calibración del modelo equivalente armónico del sistema de distribución mediante SPSA

-
- 1: Obtener los valores iniciales de las fuentes de voltaje armónica a partir de la estimación de estado armónica v_1^h .

- 2: Definir el número de iteraciones: $niter = 400$
- 3: Definir los parámetros iniciales de SPSA de acuerdo a (Spall, 1998): $a = 1, c = 1, A = niter * 0.01, \gamma = 0.101, \alpha = 0.602$
- 4: $k := 0$
- 5: **Mientras** $k < niter$ **Hacer**
- 6: $k := k + 1$
- 7: Calcular los vectores de ganancias ck y ak para cada k : $ck := c/(k + 1)^\gamma, ak := a/(A + 1 + k)^\alpha$
- 8: Generar el vector de perturbaciones simultáneas δ_k para cada armónico. Cada valor del vector se genera independientemente tomando valores aleatorios de -1 o 1 con una probabilidad de 0.5 de ocurrencia para cada uno de ellos. Se utiliza la distribución de Bernoulli para crear el vector aleatorio como se indica en (Spall, 1998).
- 9: Evaluar la función objetivo f en los puntos $v_k^h + ck * \delta_k$ y $v_k^h - ck * \delta_k$.
- 10: Conseguir la aproximación del mínimo gradiente gk para cada k según: $gk := \left[\frac{f(v_k^h + ck * \delta_k) - f(v_k^h - ck * \delta_k)}{2 * ck} \right] * \delta_k$
- 11: $v_{k+1}^h := v_k^h - ak * gk$
- 12: Si $v_{k+1}^h < -T * V^1$ entonces $v_{k+1}^h := -T * V^1$
- 13: Si $v_{k+1}^h > T * V^1$ entonces $v_{k+1}^h := T * V^1$
- 14: **Terminar Mientras**
- 15: El valor de v_{k+1}^h será el valor de la fuente de voltaje armónica calibrada

Calibración con Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos se basan en la teoría de la evolución de Darwin. La cual expone que los mejores individuos tendrán una mejor probabilidad de sobrevivir al ambiente, por lo tanto, tendrán mayores probabilidades de reproducirse y de pasar sus genes o características a la siguiente generación (Maldonado, 2016).

De igual forma que en SPSA, la calibración con algoritmos genéticos se realiza para aproximar datos de resultados de la simulación con datos medidos. La calibración se realiza para cada armónico individual, teniendo un total de 6 variables de decisión para cada armónico h , siendo este conjunto de variables de decisión un individuo determinado por 3 magnitudes y 3 ángulos de cada fase. El conjunto de individuos se denomina una población. Las magnitudes deben estar entre valores de 0 al 3 % del valor de la magnitud fundamental tomando de referencia el límite permitido de cada armónico individual indicado en el estándar IEEE 519 ("IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," 2014); los ángulos toman valores entre 0 a 360 grados.

La función objetivo a minimizar corresponde al error cuadrático medio normalizado (NRMSE) de los valores simulados con los valores medidos de magnitudes en el PCC, el NRMSE se define como la ecuación (33). Se toma esta forma de cuantificar las soluciones debido a que el NRMSE permite la comparación de variables a diferentes escalas, por lo que la magnitud de los errores se compara de manera más significativa (*How to Normalize the RMSE*, n.d.).

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (44)$$

En donde:

RMSE: Error cuadrático medio.

\bar{O} : Promedio de valores medidos.

NRMSE: El error medio cuadrático normalizado

Algoritmo 2: Calibración del modelo equivalente armónico del sistema de distribución mediante algoritmos genéticos.

- 1: Generar la población inicial con valores de las fuentes de voltaje armónica calculados por la estimación de estado armónica v_1^t y la mejor solución del instante anterior.
 - 2: Evaluar cada uno de los individuos de la población inicial generando un valor de calificación a cada solución.
 - 3: Seleccionar solo los mejores calificados
 - 4: Generar una nueva población en base a los individuos seleccionados.
 - 5: Evaluar la población con la función objetivo.
 - 6: Si algún individuo o solución cumple con el criterio de tolerancia, o si bien se alcanza el número máximo de iteraciones, el proceso termina, caso contrario retorna al paso 3
-

Impedancia Armónica y Contribución Armónica

Caso de Estudio

La impedancia y contribución armónica se determinarán en base a mediciones de calidad del producto realizadas en un periodo de 14 días en un punto trifásico de la red de distribución de 220V con conexión estrella de cuatro conductores, perteneciente al alimentador 0821, como se indica en la Figura 8. El sistema fotovoltaico, que está conectado durante los últimos 8 días de medición, es trifásico, con una potencia instalada de 69,12 kWp. El equipo de medición de calidad realiza el muestreo cada 10 minutos, por lo que la longitud total de los datos es de 2021 muestras. Las mediciones de calidad son procesadas mediante el software WinPQ mobil. Como los armónicos de orden superior son despreciables, se considerará los siguientes armónicos impares: 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15.

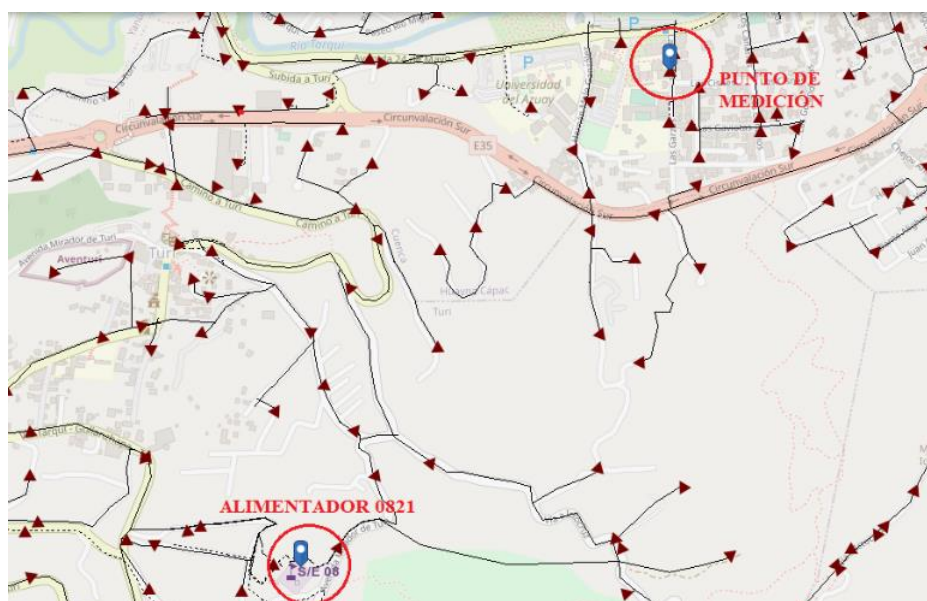


Figura 8. Referencia de lugar de mediciones de calidad realizada por CENTROSUR.

En la Figura 9, se muestra las formas de onda del tercer armónico de voltaje y corriente. Con el objetivo de verificar la influencia de la conexión del sistema fotovoltaico a la red de distribución y comparar sus resultados, se dividen los datos de medición en 2 conjuntos (antes y después de la conexión del SFV), cada uno con mediciones que corresponden a un día laboral, sábado y domingo. El día laboral será el promedio de los días laborales, excluyendo feriados. La longitud total de muestras de datos a utilizar para cada conjunto de datos es de 432 (3 días), debido a que se toma el promedio estadístico de los días laborales y los fines de semana completos.



Figura 9. Mediciones de calidad procesadas en el software WinPQ mobil para el tercer armónico.

Resultados Obtenidos

Por simplicidad, se presenta las gráficas con los resultados correspondientes al tercer armónico; sin embargo, las impedancias armónicas y contribuciones armónicas para los armónicos de orden 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 para las tres fases se incluyen en los Anexos del A al E.

Impedancia y Contribución Armónica en el PCC sin Generación Solar Fotovoltaica

El cálculo de la impedancia armónica de la red usa ventanas deslizantes de 192 datos para cada subintervalo, es decir, cada ventana contiene 32 horas de medición. La ventana deslizante toma 192 puntos a medida que recorre todos los datos de medición, es decir, tomará posiciones de 1-192, 2-193...241-432. El tamaño de la ventana, se eligió realizando evaluaciones del método con ventanas de diferente tamaño y se concluyó que la mejor solución de la impedancia armónica de la red era con ventanas mayores o iguales a 144 (lo cual representa un día de medición); sin embargo, para ventanas mayores a 192 datos, el coste computacional era alto, ya que se opera con matrices complejas de grandes dimensiones. Por lo tanto, el mejor valor de impedancia armónica se obtiene con una ventana de 192 datos, el cual representa una impedancia armónica como serie de tiempo con mínimo error y costo computacional moderado. Para verificar la validez del método utilizado, los resultados obtenidos se comparan con la impedancia de cortocircuito en el PCC $0.015 \angle 60.21^\circ$ [Ω]. La magnitud y ángulo de la impedancia armónica de la red para el tercer armónico de una fase se presenta en la Figura 10; así como la impedancia de cortocircuito. Se observa que la impedancia armónica calculada se encuentra en el mismo rango de valores que la impedancia de cortocircuito, pero no es constante durante el periodo de medición.

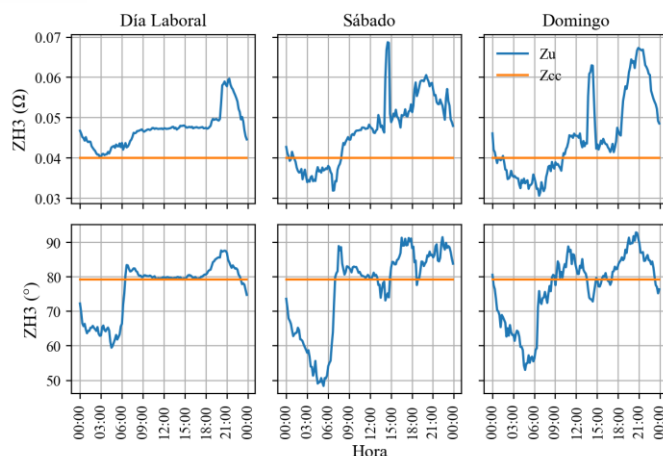


Figura 10. Magnitud y ángulo de impedancia armónica de la red para el tercer armónico.

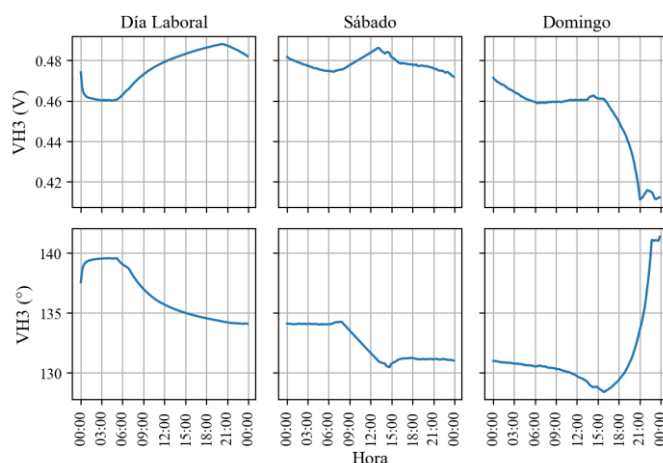


Figura 11. Fuente de voltaje armónica de la red para el tercer armónico.

Junto con el cálculo de la impedancia armónica de la red, se tiene el valor de la fuente armónica de la red. En la Figura 11, se presenta los niveles de esta fuente para el tercer armónico. Se observa que se obtiene como resultado una fuente casi constante.

Por otro lado, el cálculo de la impedancia armónica del consumidor se obtiene con las ecuaciones (10)-(22). La magnitud y ángulo de esta impedancia para el tercer armónico de una de las fases se presenta en la Figura 12. Los valores de impedancia armónica del consumidor se mantienen menores a 5Ω , con una mayor reducción en el horario diurno del día laborable y en la mañana del sábado. Los valores de impedancia tienen incrementos cuando la potencia activa suministra potencia desde la carga, lo que provoca una inversión en el flujo de potencia en el PCC. Este efecto también se ve reflejado en el ángulo de la impedancia. Cuando la carga suministra potencia activa a la red se produce una disminución de corriente, esta potencia suministrada es pequeña en comparación de la potencia entregada por la red; de esta forma la impedancia de la red aumenta.

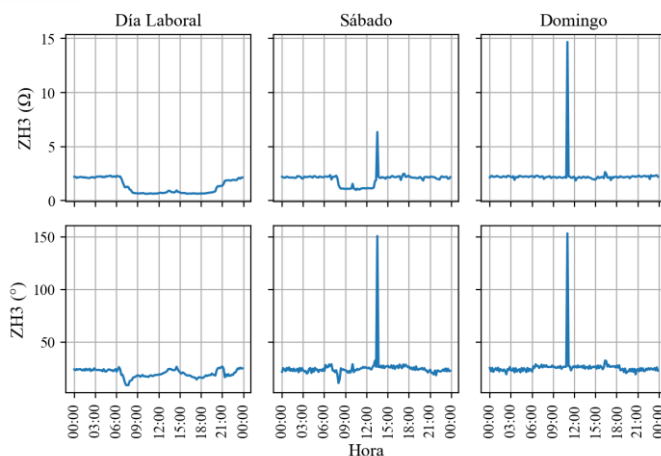


Figura 12. Impedancia armónica del consumidor para el tercer armónico.

La fuente armónica del consumidor obtenida a partir de la ecuación (7) se presenta en la Figura 13. Se observa que ésta tiene un comportamiento y valor similar a la corriente armónica en el PCC.

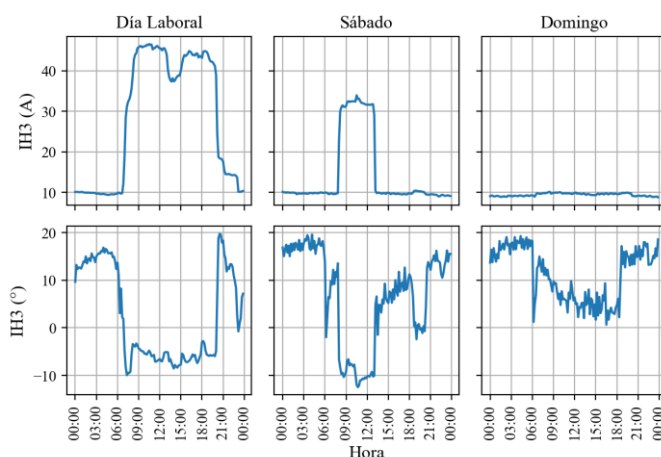


Figura 13. Fuente de corriente armónica del consumidor para el tercer armónico.

Los resultados de la contribución armónica de voltaje y corriente para el tercer armónico se observan en la Figura 14. La contribución armónica de voltaje por parte de la red y el consumidor es significativa para todos los armónicos. Sin embargo, la contribución de corriente de la red es mínima, ya que la corriente armónica en el PCC proviene principalmente de la carga del consumidor. En la mayoría de armónicos la contribución de corriente de la red tiende a ser cero. Por lo tanto, la contribución de voltaje armónica tiene más peso en el análisis de distorsión armónico cuando se conecta el SFV.

Los resultados promedio de la contribución armónica de voltaje y corriente se muestra en la Figura 15 para los armónicos de la primera fase; todas las fases tienen niveles armónicos similares. La contribución de la red y consumidor es diferente, en algunos armónicos como el

tercero, donde la contribución de la red y consumidor conforman el voltaje en el PCC; en cambio, armónicos como el quinto y séptimo, tienen una contribución del consumidor que es anulada en cierta medida por la contribución de la red y viceversa, para así obtener un valor de voltaje en el PCC menor al valor de las contribuciones en ambos lados. En todos los resultados, el voltaje armónico producido por las contribuciones armónicas en ambos lados, no sobrepasa los límites establecidos por el estándar IEEE 519.

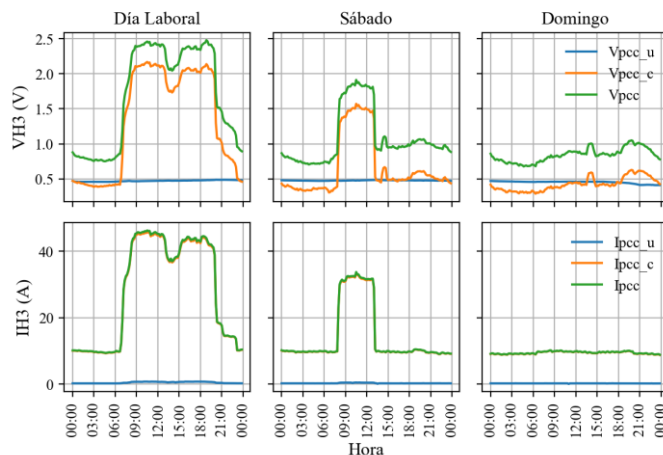


Figura 14. Contribución armónica de voltaje y corriente para el tercer armónico.

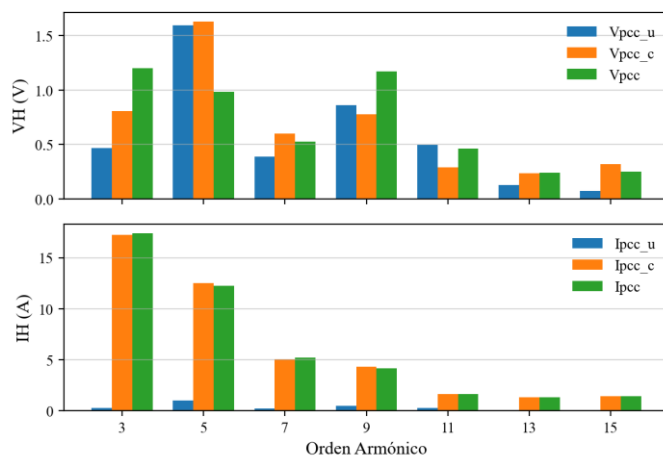


Figura 15. Promedio de contribución armónica de voltaje y corriente.

Impedancia y contribución armónica en el PCC con generación solar fotovoltaica

Luego de la conexión del SFV, se calcula nuevamente los parámetros necesarios para determinar la contribución armónica. La impedancia armónica de la red presenta una pequeña variación en su magnitud y ángulo respecto al sistema sin generación fotovoltaica, como se muestra en la Figura 16 para una fase. Las pequeñas variaciones pueden ser el resultado de los cambios en el comportamiento armónico de la red, al ejecutarse las mediciones en periodos distintos. Por otro lado, la magnitud y ángulo para la impedancia armónica del

consumidor se presenta en la Figura 17. La impedancia del consumidor se mantiene igual antes y después de la conexión del SFV, a excepción de los puntos de medición del fin de semana, cuando el flujo de la potencia activa se invierte debido al SFV.

En la Figura 18, se muestra la contribución armónica de voltaje y corriente promedio después de la conexión del sistema de generación fotovoltaica. Los resultados no muestran un impacto significativo al conectar el SFV. El aporte armónico de la red y el usuario en la contribución armónica de corriente no cambia al conectar el SFV para todos sus armónicos, el aporte del usuario es predominante en ambos casos.

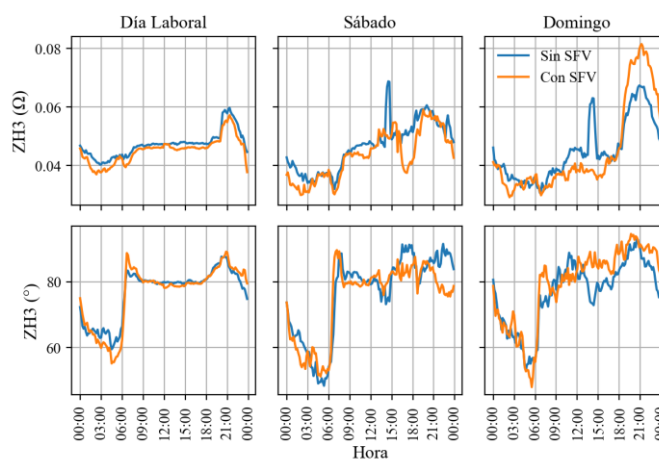


Figura 16. Magnitud y ángulo de impedancia armónica de la red para el tercer armónico después de la conexión del SFV.

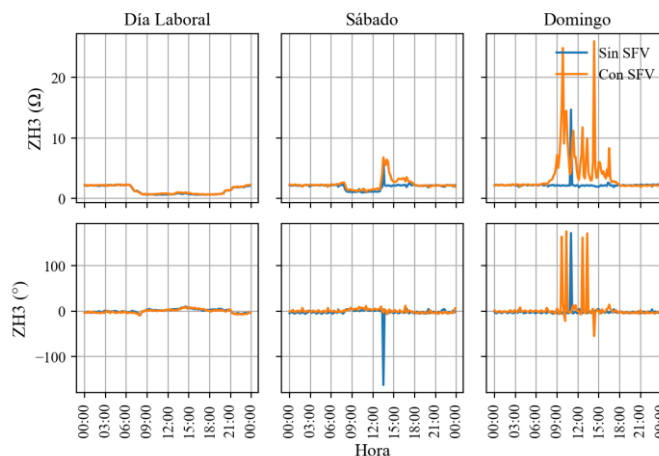


Figura 17. Magnitud y ángulo de impedancia armónica del consumidor para el tercer armónico después de la conexión del SFV.

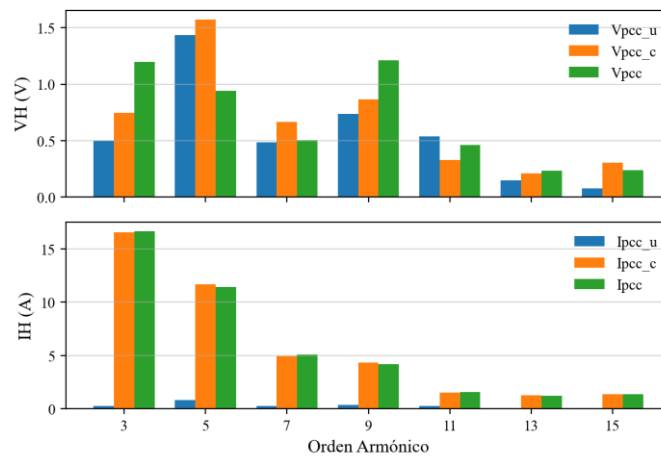


Figura 18. Promedio de contribución armónica de voltaje y corriente después de la conexión del SFV.

Simulación Para Evaluar el Impacto de la Generación Fotovoltaica

Caso de Estudio

Para continuar con el análisis de distorsión armónica, se simula el equivalente trifásico del sistema de distribución mostrado en la Figura 7, que modela la conexión de un usuario de medio voltaje en el alimentador 0821. El sistema de alimentación trifásico es de 22 kV, con una corriente de cortocircuito monofásica y trifásica de 2900 A y 1778.02 A, respectivamente, la relación X_1/R_1 de secuencia positiva es de 2.72 y la relación X_0/R_0 de secuencia cero es de 2.3. A esta fuente trifásica se agrega un espectro armónico (fuente de voltaje armónica) que contiene la distorsión de fondo de la red. El transformador de distribución trifásico tiene una conexión delta-estrella, pertenece al grupo vectorial dy11 con una potencia nominal de 100 kVA, la relación de transformación es de 22/0.22 kV, el porcentaje de pérdida a carga nominal es del 1.393% y la reactancia de cortocircuito es de 3.21%. La carga del consumidor es una carga trifásica constituida de tres cargas monofásicas repartidas en cada fase del sistema; cada carga monofásica es considerada una carga no lineal. Los parámetros que se modificarán para cada simulación dependiendo de los valores de las mediciones son: la potencia activa y reactiva para cada carga monofásica, los espectros que representan las fuentes armónicas de las cargas, los espectros que representan la distorsión armónica de la red, la potencia activa y aparente del modelo solar fotovoltaico y los espectros que representan la distorsión armónica del sistema fotovoltaico. Las simulaciones serán realizadas en OpenDSS mediante scripts de Python.

La potencia activa y reactiva para cada carga monofásica se obtienen de las mediciones del armónico fundamental ($h = 1$). Las fuentes armónicas de corriente de las cargas I_C^h corresponden a las mediciones en el PCC. La potencia activa y aparente para el modelo del sistema fotovoltaico se obtienen a partir de las curvas medidas en un SFV implementado en la ciudad de Cuenca. Las fuentes armónicas de voltaje de la red corresponderán a los resultados que se obtengan de la calibración armónica del sistema, la cual se presenta en el siguiente punto de esta sección.

Calibración del Modelo del Sistema

Los parámetros a ajustar son el voltaje y corriente armónica en el PCC; sin embargo, solo se trabajará con el voltaje armónico, ya que la corriente armónica ya se encuentra ajustada por el modelo de carga no lineal como se muestra en la Figura 19. Por simplicidad, se presenta las gráficas con los resultados correspondientes al tercer armónico de voltaje; sin embargo, la calibración se realiza para los armónicos de orden 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15, las cuales se incluyen en los Anexos del F al L.

La calibración del sistema se realiza con los datos de los días en donde el sistema fotovoltaico no está instalado, esto con el objetivo de determinar las fuentes armónicas de la red. Para comprobar el modelo equivalente calibrado, los resultados simulados de este sistema se deben comparar con datos reales medidos. Una vez calibrado el modelo, se incluirá el sistema fotovoltaico para analizar los armónicos de voltaje y corriente en el PCC y en medio voltaje.

Implementación de Estimación de Estado Armónico

Usando las ecuaciones (37) y (39) se obtienen una aproximación inicial de las fuentes de voltaje armónica de la red. Con estas fuentes iniciales, se procede a realizar la simulación, para contrastar los resultados del modelo con las mediciones en el PCC. En la Figura 20, se muestran los valores para el tercer armónico de una fase, notándose que existe una diferencia destacable. Los resultados en el PCC presentan un error relevante en el voltaje, como se muestra en la Tabla 1, especialmente desde el quinto armónico. Por lo tanto, se requiere completar la calibración mediante técnicas de optimización.

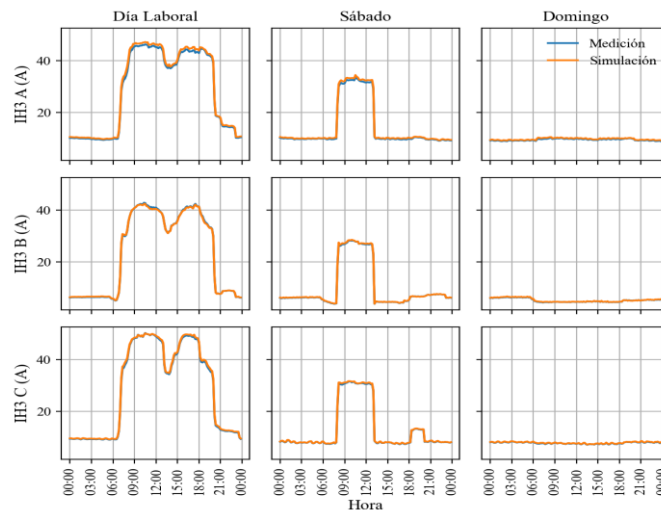


Figura 19. Tercer armónico de corriente en el PCC.

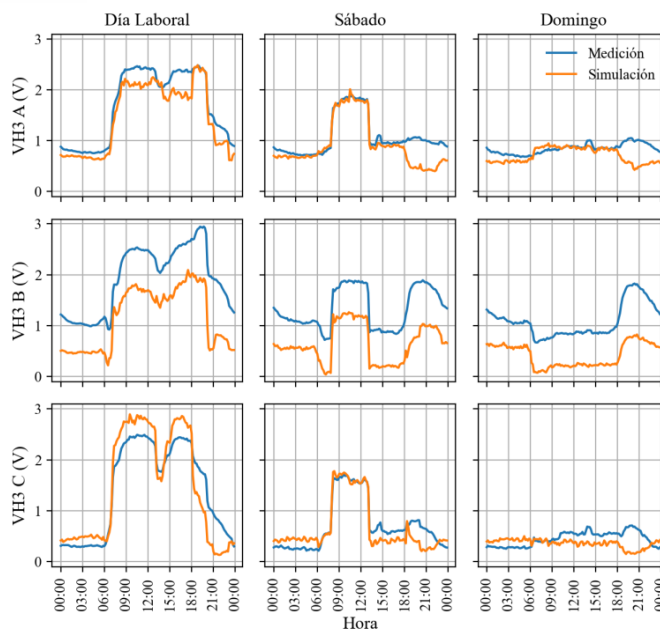


Figura 20. Tercer armónico de voltaje ajustado mediante HSE.

Tabla 1. Error promedio del voltaje armónico en el PCC – modelo calibrado mediante HSE.

Error Promedio (%)			
Armónico	A	B	C
3	16.28	54.33	36.44
5	318.01	199.67	237.89
7	278.9	337.69	288.17
9	14.24	58.01	57.95
11	108.72	84.07	108.71
13	265.05	196.38	656.76
15	245.87	364.02	66.55

Implementación de SPSA

Una vez obtenido los valores iniciales de las fuentes de voltaje armónico de la red, se aplica una técnica de optimización para mejorar los resultados de calibración del voltaje armónico en el PCC. Se implementa el algoritmo 1 en Python, de tal forma que todos los armónicos se ajusten de forma simultánea para optimizar los tiempos de ejecución. La calibración con SPSA tiene la principal ventaja de reducir el costo computacional con un tiempo de ejecución de 2.75 horas. Los parámetros de entrada de SPSA son el número de iteraciones $niter = 400$; las constantes $a = 1$, $c = 1$, $A = 4$, $\gamma = 0.101$ y $\alpha = 0.602$. La magnitud ajustada mejora

mucho con SPSA, como se muestra en la Figura 21 para el tercer armónico, donde se tiene una disminución considerable de error para la fase 1 y 3.

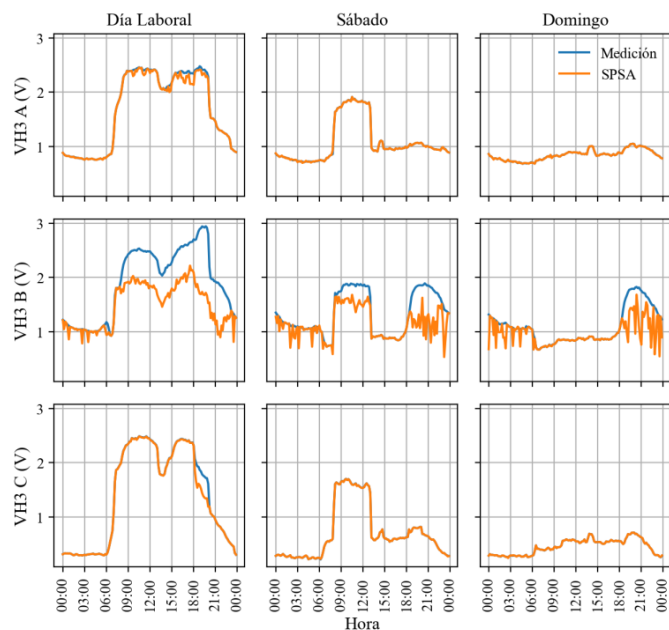


Figura 21. Ajuste del tercer armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.

Los armónicos que presentan mayor error respecto a las mediciones de voltaje con HSE, son los armónicos de orden 5, 7, 11, 13 y 15, los cuales con SPSA tienen un mejor resultado, como se indica en la Tabla 2. Para el séptimo, noveno y décimo primer armónico, los resultados muestran que las mediciones son similares a las simulaciones en las tres fases, con un error menor al 5%.

Tabla 2. Error promedio del voltaje armónico en el PCC – modelo calibrado mediante SPSA.

Error Promedio (%)			
Armónico	A	B	C
3	0.61	13.19	0.86
5	34.27	24.37	36.24
7	1.77	2.16	2.37
9	1.16	0.13	1.87
11	4.05	3.29	2.78
13	23.94	111.59	120.74
15	27.46	29.68	28.95

Implementación de Algoritmos Genéticos

El ajuste de las fuentes de voltaje mediante algoritmos genéticos se implementa en Python con la librería Pygad (*Pygad Module — PyGAD 2.18.1 Documentation*, n.d.). Para lo cual se asigna un número máximo de iteraciones de 400, y una población de 15 individuos. Además, se caracteriza los parámetros de entrada de la librería para que siempre se mantenga una mejor solución para la siguiente iteración. Los límites de las variables de decisión son de 0 a 3% para las magnitudes, y de 0 a 360 grados para los ángulos de las fuentes armónicas. El método de selección de los padres es el de torneo, el cual consiste en dividir la población en subgrupos de los cuales se escogerán los mejores calificados, se repite este procedimiento hasta obtener un número preestablecido de padres, el cual es 3. Por último, los criterios de parada son: número máximo de iteraciones de 400 y un valor de saturación de 100, esto quiere decir que, si en la iteración 100 no se encuentran mejores soluciones, el algoritmo dará por terminado el proceso.

Un parámetro importante para el funcionamiento de los algoritmos genéticos es el tipo de mutación que sufrirá la nueva población con el objetivo de mejorar las soluciones. De acuerdo con (*Pygad Module — PyGAD 2.18.1 Documentation*, n.d.) se pueden implementar varios tipos de mutación: aleatoria, de intercambio, de inversión, codificada y adaptativa. La probabilidad de mutación, se emplean para decidir la cantidad de valores que variarán o mutarán dentro de una solución o individuo. De las pruebas realizadas la mutación adaptativa entrega mejores resultados con valores de probabilidad de mutación de 0.6 para los peores individuos y 0.2 para los mejores individuos, es decir, la mutación que sufrirán los individuos con buenos resultados de la función objetivo es pequeña de 0.2 y la mutación para los peores calificados será grande de 0.6. Con esto se asegura que las mejores soluciones tengan pequeñas variaciones, mientras que las peores soluciones tengan grandes cambios para la generación de la siguiente población.

La función objetivo se define como el inverso del error cuadrático medio normalizado (NRMSE) menos una tolerancia, es decir: $1/(NRMSE - tol)$ ya que con valores cercanos de NRMSE a la tolerancia se obtendrán valores muy altos de la función objetivo. En la Figura 22, se presenta los resultados para el armónico 3 del ajuste de las fuentes armónicas de voltaje de la red para el día laborable, sábado y el día domingo. Se observa que los resultados simulados tienen un comportamiento similar a los medidos.

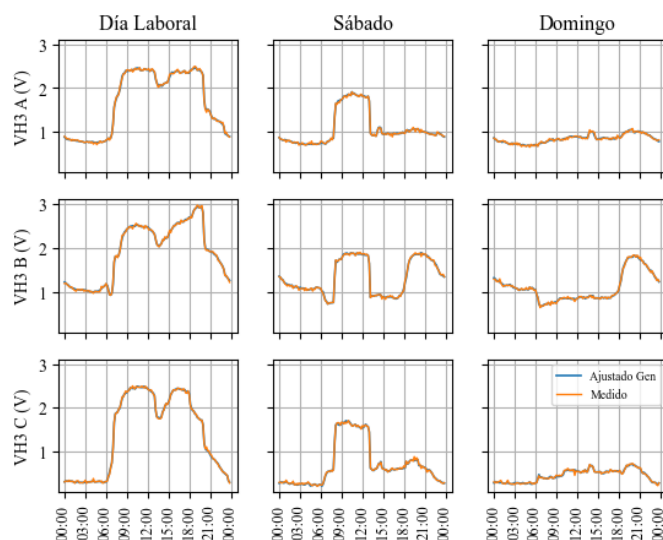


Figura 22. Ajuste del tercer armónico de voltaje mediante algoritmos genéticos.

De la implementación del algoritmo genético para el ajuste de las fuentes armónicas de tensión se calculan los errores promedios con respecto a los valores medidos en el PCC para los armónicos impares del 3 a 15, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 3. Los errores son menores al 10 %, teniendo valores del error promedio mínimo de 1.07% y un error máximo del 8.31%.

Tabla 3. Error promedio del voltaje en el PCC – modelo calibrado mediante algoritmos genéticos.

Error Promedio (%)			
Armónico	A	B	C
3	1.28	1.07	2.47
5	2.13	2.43	1.77
7	1.95	2.76	2.53
9	1.26	1.99	1.46
11	2.68	2.36	1.85
13	2.90	8.13	7.79
15	5.16	8.31	6.90

Modelo del Sistema Fotovoltaico

Para verificar la influencia del sistema fotovoltaico se debe implementar el modelo equivalente del sistema en Open DSS. Para esto, se toman datos de un sistema fotovoltaico trifásico instalado en la ciudad de Cuenca, con potencia pico de 227.7 kWp. Los principales parámetros que modelan al sistema fotovoltaico son: potencia activa, potencia reactiva y las

fuentes de corriente armónica. Con las potencias totales se calcula los valores en por unidad, tomando en cuenta la potencia máxima del sistema; posteriormente se determina el promedio para cada día. Las curvas de potencia activa y reactiva obtenidas se muestra en la Figura 23.

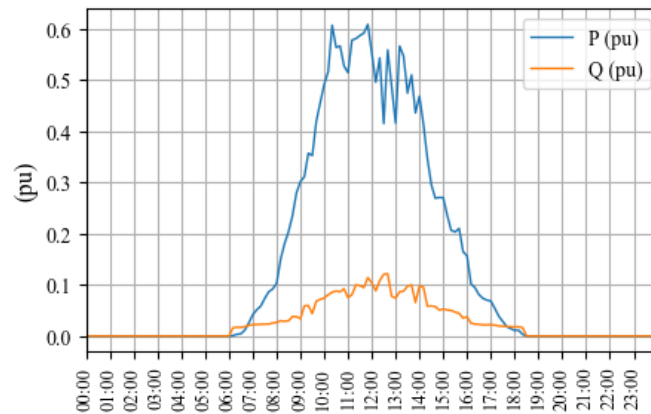


Figura 23. Potencia activa y reactiva promedio del sistema fotovoltaico.

Las corrientes armónicas se determinan de la misma manera, considerando los valores como porcentajes de la componente fundamental. Cabe indicar que se toma el valor promedio entre fases ya que los sistemas fotovoltaicos son generalmente sistemas balanceados como se indica en la Figura 24.

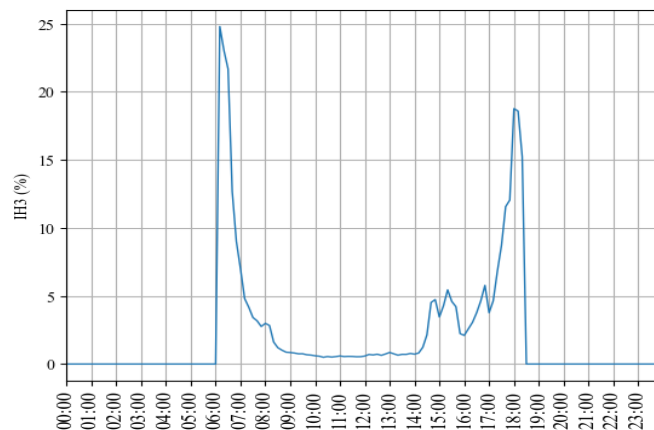


Figura 24. Tercer armónico de corriente generado por el SFV.

Resultados Obtenidos

Una vez calibrado el voltaje y corriente armónico en el PCC, se procede a incluir el modelo del sistema de generación fotovoltaica en las simulaciones. Como se obtuvo un mejor ajuste con las técnicas de optimización (SPSA y genéticos), entonces se van a considerar esos casos para evaluar el impacto del SFV.

Ingresando el sistema SFV a los valores calibrados con SPSA, se observa que las componentes armónicas múltiplos de 3 no presentan mayor variación; en la Figura 25 y Figura 26 se muestran las curvas para el tercer armónico de voltaje y corriente, respectivamente. Los valores promedio tanto para el voltaje como la corriente armónica, se presentan en la Tabla 4 y Tabla 5. Se puede observar que las variaciones en los valores promedios de los armónicos de voltaje y corriente antes y después de la conexión del SFV no son relevantes.

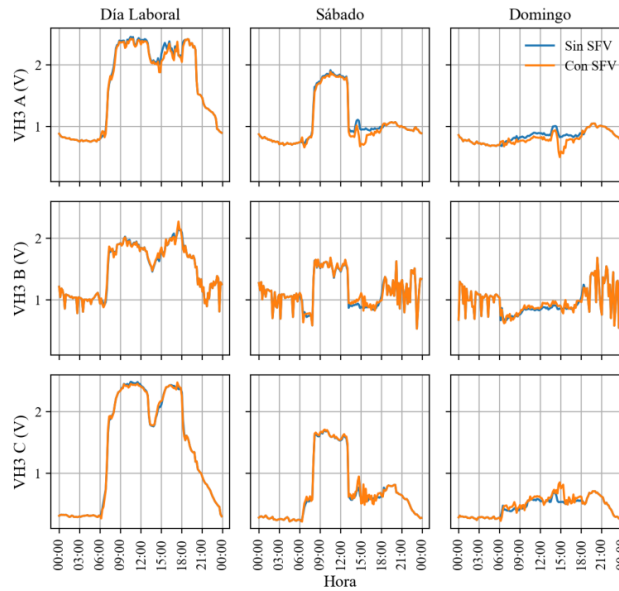


Figura 25. Tercer armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo SPSA.

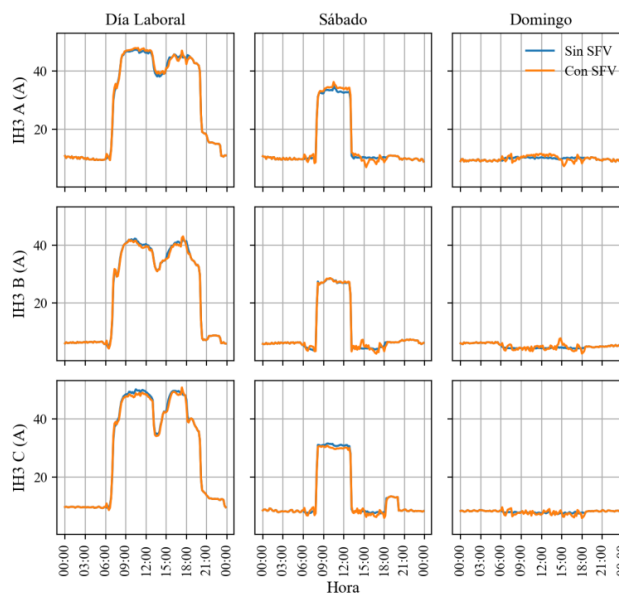


Figura 26. Tercer armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo SPSA.

Tabla 4. Valores promedio de la simulación sin la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo SPSA.

Armónico	Voltaje (V)			Corriente (A)		
	A	B	C	A	B	C
3	1.19	1.20	0.85	18.00	13.03	16.82
5	1.18	0.99	1.29	12.66	8.55	11.59
7	0.53	0.36	0.46	5.44	3.88	5.16
9	1.16	0.82	0.94	4.32	2.34	2.99
11	0.46	0.41	0.50	1.69	1.34	1.67
13	0.26	0.22	0.23	1.38	1.14	1.27
15	0.29	0.15	0.19	1.41	0.60	0.90

Tabla 5. Valores promedio de la simulación con la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo SPSA.

Armónico	Voltaje (V)			Corriente (A)		
	A	B	C	A	B	C
3	1.16	1.20	0.86	18.09	13.01	16.60
5	1.13	1.00	1.24	11.96	8.46	11.43
7	0.60	0.42	0.49	6.06	4.38	5.60
9	1.13	0.80	0.93	4.23	2.37	2.93
11	0.48	0.46	0.53	2.63	2.45	2.70
13	0.31	0.26	0.27	1.61	1.31	1.45
15	0.28	0.15	0.19	1.36	0.63	0.90

El tercer armónico de voltaje y corriente presentado en la Figura 27 y Figura 28, muestra que no hay variación de los valores simulados con y sin SFV para el tercer armónico, utilizando el modelo ajustado con algoritmos genéticos. Los valores promedio de los armónicos antes y después de la conexión del SFV se presentan en la

Tabla 6 y Tabla 7, respectivamente. Los valores calibrados por algoritmos genéticos ante la conexión del SFV, presentan valores promedio de armónicos, similares al caso de SPSA, lo que nos da a entender que el algoritmo de SPSA es válido para el análisis de impacto de distorsión armónica ante la conexión de generación distribuida, lo cual representa una posible ventaja debido a que con SPSA los tiempos de ejecución se reducen considerablemente comparado con algoritmos genéticos.

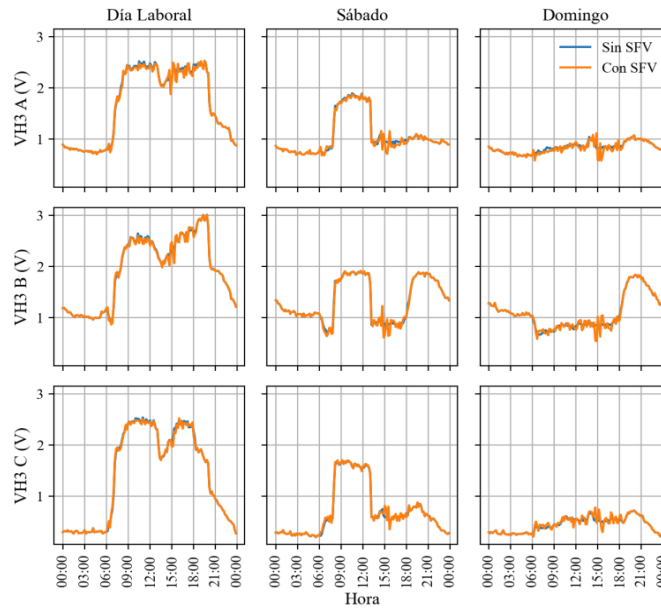


Figura 27. Tercer armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

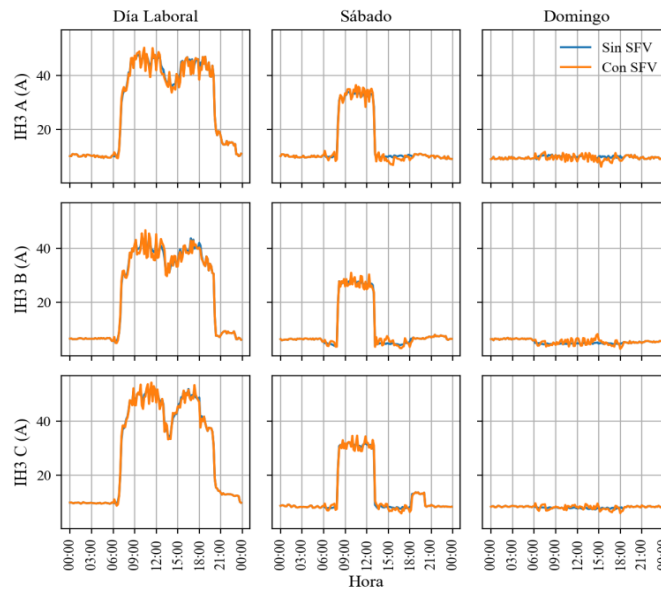


Figura 28. Tercer armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

Tabla 6. Valores promedio de la simulación sin la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

Armónico	Voltaje (V)			Corriente (A)		
	A	B	C	A	B	C
3	1.20	1.45	0.86	17.70	13.05	17.01
5	0.99	0.75	0.94	12.54	8.74	11.41
7	0.53	0.36	0.46	5.34	3.87	5.12
9	1.17	0.82	0.96	4.29	2.34	2.93
11	0.46	0.41	0.50	1.63	1.29	1.62
13	0.25	0.19	0.19	1.35	1.12	1.24
15	0.27	0.14	0.18	1.41	0.60	0.89

Tabla 7. Valores promedio de la simulación con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

Armónico	Voltaje (V)			Corriente (A)		
	A	B	C	A	B	C
3	1.19	1.44	0.86	17.51	13.10	16.98
5	0.99	0.79	0.96	11.76	8.60	11.07
7	0.60	0.41	0.52	5.96	4.37	5.58
9	1.15	0.80	0.95	4.18	2.30	2.92
11	0.49	0.46	0.52	2.39	2.30	2.52
13	0.31	0.24	0.25	1.57	1.28	1.42
15	0.26	0.15	0.18	1.35	0.62	0.88

Luego de haber analizado las mediciones y simulaciones del circuito equivalente de distribución ante la conexión del SFV en el PCC, se procede a evaluar el efecto en el lado de medio voltaje. Para esto, se considera los datos calibrados con algoritmos genéticos, ya que presentaban el menor error de voltaje y corriente armónica. Los valores de voltaje y corriente del tercer armónico en el lado de medio voltaje, con y sin el SFV, se muestran en la Figura 29 y Figura 30, respectivamente; se observa que el efecto del SFV no es significativo ya que las curvas con y sin SFV se solapan entre ellas. Sin embargo, en los periodos donde el sistema fotovoltaico está generando energía, los armónicos de corriente tienen un comportamiento más variable, pero las fluctuaciones son mínimas ante sus valores promedios. En la Tabla 8, se observa los valores promedio de los armónicos de voltaje y corriente en media tensión.

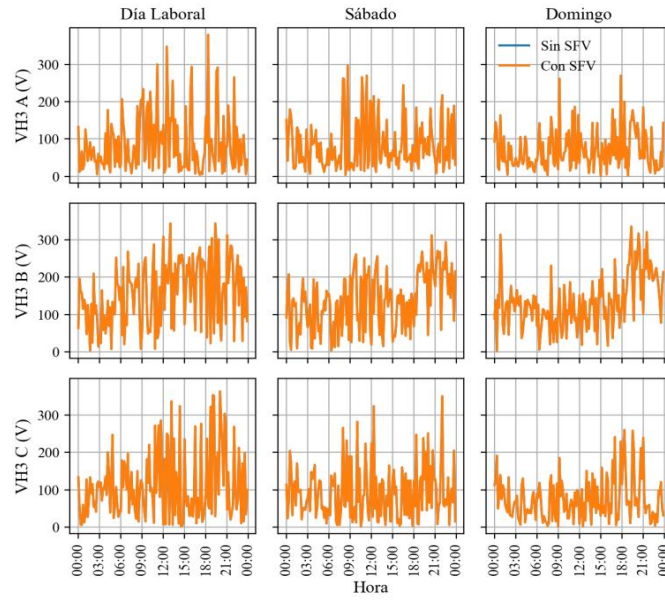


Figura 29. Tercer armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.

Tabla 8. Valores promedio de la simulación con la conexión del SFV en medio voltaje.

Armónico	Voltaje (V)			Corriente (A)		
	A	B	C	A	B	C
3	80.20	142.00	92.71	0.02	0.03	0.02
5	129.61	99.91	94.87	0.12	0.10	0.10
7	53.32	59.41	60.33	0.05	0.05	0.04
9	99.88	101.74	111.02	0.01	0.01	0.01
11	50.26	39.13	48.94	0.02	0.01	0.02
13	23.46	22.26	24.72	0.01	0.01	0.01
15	13.79	15.30	13.27	0.00	0.01	0.00

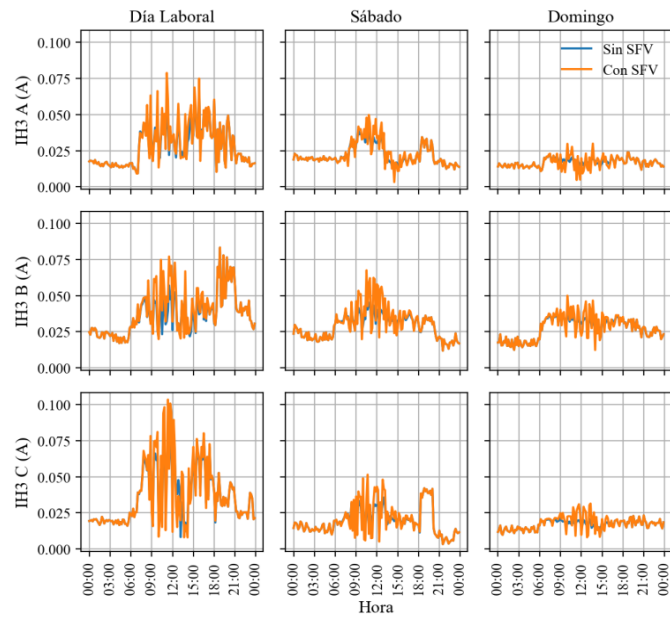


Figura 30. Tercer armónico de corriente en el lado de medio voltaje.

Conclusiones

En este artículo se realizó varios estudios para ampliar el análisis de distorsión armónica al conectar un sistema de generación fotovoltaica a la red de distribución en el PCC. Los puntos más importantes de este análisis fue la determinación de la contribución armónica, la calibración armónica del circuito equivalente de la red de distribución y el impacto de la distorsión armónica en medio voltaje al conectar un SFV. En la contribución armónica se determinó el aporte de armónicos de la red y del consumidor en el PCC antes y después de conectar el SFV, obteniendo como resultado que la contribución armónica de corriente en ambos escenarios, tiene una contribución similar, en la cual principalmente la carga del consumidor era la responsable. Por otro lado, las contribuciones armónicas de voltaje de la red y el usuario varían con el tiempo de tal forma que en ciertos periodos la contribución de la red es mayor a la contribución del consumidor y viceversa. En la mayoría de armónicos revisados, el aporte armónico de voltaje de la red aumenta cuando la demanda disminuye; mientras que cuando la demanda aumenta, el aporte armónico del consumidor aumenta; sin embargo, esto no se cumple para todos los armónicos y fases debido a que el sistema es desbalanceado y por cambios de la impedancia de la red aguas arriba.

Los parámetros que describen el comportamiento del sistema fueron las impedancias armónicas, de las cuales la impedancia armónica de la red fue de mayor relevancia ya que describe el comportamiento en la frecuencia de la red de distribución. Los valores de impedancia armónica mediante el método de la norma mínima de la diferencia de impedancia fueron válidos, ya que no presentaron valores lejanos a la impedancia de referencia. Para la impedancia armónica del consumidor se adoptó un modelo equivalente al sistema real para mejorar los resultados de contribución; sin embargo, es necesario investigar más a profundidad para obtener un modelo que represente la impedancia armónica del consumidor con un agregado del SFV.

Los resultados obtenidos en la calibración armónica muestran que la estimación de las fuentes armónicas de voltaje de la red mediante el método HSE es válida para ciertos armónicos y fases; sin embargo, no es suficiente, ya que el error entre los valores simulados y medidos es demasiado alto. Por lo tanto, fue necesaria la implementación de algoritmos como SPSA y genéticos para ajustar y mejorar los resultados de la fuente de voltaje armónica.

El SPSA mejoró los resultados de voltaje armónica en el PCC con un tiempo de ejecución de 2.75 horas; sin embargo, se mantenía un error alto entre las mediciones y simulaciones. Los resultados por SPSA pueden considerarse válidos en su mayoría; sin embargo, sus resultados se vieron superados por la calibración mediante algoritmos genéticos. La calibración mediante algoritmos genéticos es válida para todos los armónicos y fases, ya que

los resultados de las simulaciones son muy próximos a los valores medidos, presentado el menor error porcentual de los demás métodos de calibración. Cabe recalcar que este método tiene un coste computacional alto debido a la naturaleza del método, tomando tiempos de ejecución que rondan de los 3 a 5 minutos aproximadamente para el ajuste de un solo armónico en un instante de tiempo para las 3 fases del sistema; mientras que para la calibración de todos los armónicos para un día tiene tiempos de ejecución de 5 a 7 horas. Además, la caracterización de los parámetros del algoritmo toma varios ensayos para lograr su convergencia.

El impacto de la distorsión armónica en medio voltaje por la conexión de un SFV es mínimo. Como se observó en los resultados, el voltaje armónico en media tensión no se ve afectado por la conexión del SFV. En cuanto a la corriente armónica en medio voltaje, la conexión SFV provoca pequeñas variaciones. La afectación es mínima debido al transformador de distribución con conexión delta-estrella. El transformador funciona como filtro, impidiendo que se propaguen los armónicos de orden triple del SFV.

Recomendaciones

Se han identificado varios temas para futuros trabajos y mejoras del análisis presentado en este documento. La primera aplicación futura que puede aumentar la precisión de la simulación, es la mejora de la función objetivo usada para la calibración, incluyendo mayor peso en los ángulos a calibrar en el PCC, con el fin de obtener un modelo armónico más realista del sistema de distribución. Para expandir el análisis, se podría calibrar en futuros trabajos toda la red de distribución para poder evaluar el impacto de instalar una gran cantidad de sistemas fotovoltaicos.

Referencias

- Arrillaga, J., C. Smith, B., R. Watson, N., & R. Wood, A. (n.d.). *Power System Harmonic Analysis - Jos Arrillaga, Bruce C. Smith, Neville R. Watson, Alan R. Wood* - Google Libros. Retrieved December 6, 2022, from https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=oFrQAmLj9VsC&oi=fnd&pg=PR11&dq=power+system+harmonic+analysis&ots=NR-biZfD_U&sig=pVIBSvD0ehhedxBNEy6kLXwDkgM#v=onepage&q=power%20system%20harmonic%20analysis&f=false
- Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2001). Transmission Systems. In *Computer Modelling of Electrical Power Systems* (pp. 5–52). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118878286.ch2>
- Augusto, V., Núñez, B., Andrés, J., Angarita, C., & Plata, G. O. (2004). Predicción de corrientes armónicas en ventanas de carga residenciales, mediante modelos neuronales artificiales. *Revista UIS Ingenierías*, 3(1), 73–82. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/2277>
- Balcázar Castell Directores, A., & Montero Mercadé Jaume Barceló Bugeda, L. (2016). *Exploración de procedimientos de simulación-optimización para la calibración de modelos de simulación de tráfico*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/87423>
- Bhujel, D., Watson, N. R., & Jalal, T. S. (2017). Application of harmonic state estimation to a distribution system. *2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017*. <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981074>
- Bosovic, A., Renner, H., Abart, A., Traxler, E., Meyer, J., Domagk, M., & Music, M. (2016). Validation of aggregated harmonic current source models based on different customer type configurations. *10th International Conference - 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability, PQ 2016, Proceedings*, 77–84. <https://doi.org/10.1109/PQ.2016.7724093>
- Cao, F., Ba, S., Brenneman, W. A., & Joseph, V. R. (2018). Model Calibration With Censored Data. <https://doi.org/10.1080/00401706.2017.1345704>, 60(2), 255–262. <https://doi.org/10.1080/00401706.2017.1345704>
- Dugan, R. C., Arrit, R. F., Henry, R., McDermott, T. E., & Sunderm, W. (2015, January 8). *OpenDSS EPRI Distribution System Simulator - Harmonic Load Modeling Documentatio*. <http://sourceforge.net/projects/electricdss/files/>

- Elvira-Ortiz, D. A., Jaen-Cuellar, A. Y., Morinigo-Sotelo, D., Morales-Velazquez, L., Osornio-Rios, R. A., De, R., Romero-Troncoso, J., del Rio, J., Moctezuma, R., Cayetano, S., Juan, D., Rio, C. P., & 76807, D. A. E. (n.d.). *Genetic Algorithm Methodology for the Estimation of Generated Power and Harmonic Content in Photovoltaic Generation*. <https://doi.org/10.3390/app10020542>
- Farhoodnea, M., Mohamed, A., & Shareef, H. (2010). Novel method for determining the contribution of utility and customer harmonic distortion in distribution systems. *PEOCO 2010 - 4th International Power Engineering and Optimization Conference, Program and Abstracts*, 386–390. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2010.5559190>
- Gül, Ö., & Gündoğdu, T. (2015). Harmonic Contributions of Utility and Customer Based on Load Model Using Field Measurements. *Journal of Power and Energy Engineering*, 03(05), 11–28. <https://doi.org/10.4236/JPEE.2015.35002>
- Hendrik Venter, F., & Cronje, P. W. (2001). *HARMONIC IMPEDANCE ESTIMATION OF A POWER SYSTEM IMPLEMENTING FREQUENCY. DOMAIN MEASUREMENT TECHNIQUES* by.
- How to normalize the RMSE*. (n.d.). Retrieved December 21, 2022, from <https://www.marinedatascience.co/blog/2019/01/07/normalizing-the-rmse/#>
- Hui, J., Freitas, W., Vieira, J. C. M., Yang, H., & Liu, Y. (2012). Utility harmonic impedance measurement based on data selection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4), 2193–2202. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2207969>
- Iec. (2008). *Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 3-6: Limits-Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION XA*.
- IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. (2014). *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, 1–29. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>
- Kannan, S., & Meyer, J. (2019). Recent Developments in Harmonic Resonance Detection in Low Voltage Networks using Impedance Measurement Techniques. *2019 8th International Conference on Power Systems: Transition towards Sustainable, Smart and Flexible Grids, ICPS 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICPS48983.2019.9067345>

- L. Álvarez, L. N. J. L. y S. Z. (2017). Impacto de la generación distribuida en la red de distribución. *Maskana*, 8, 259–271.
- Liu, Z., Xu, Y., Jiang, H., & Tao, S. (2020). Study on Harmonic Impedance Estimation and Harmonic Contribution Evaluation Index. *IEEE Access*, 8, 59114–59125. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982950>
- Maldonado, C. E. (2016). Metaheurísticas y resolución de problemas complejos. *Revista Colombiana de Filosofía de La Ciencia*, 16(33). <https://doi.org/10.18270/RCFC.V16I33.1938>
- Mohd Nor, N., Abdullah, M. F., & Arumugam, U. (2011). *A Brief Review on Advances of Harmonic State Estimation Techniques in Power Systems*.
- Pfajfar, T., Blazic, B., & Papić, I. (2008). Harmonic Contributions Evaluation With the Harmonic Current Vector Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(1), 425–433. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.911165>
- Pfajfar, T., Blažič, B., & Papič, I. (2008). Harmonic contributions evaluation with the harmonic current vector method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(1), 425–433. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.911165>
- pygad Module — PyGAD 2.18.1 documentation*. (n.d.). Retrieved December 14, 2022, from https://pygad.readthedocs.io/en/latest/README_pygad_ReadTheDocs.html#init
- Ramos, G., Montenegro, D., & Dugan, R. (2015, December). *Harmonics analysis using sequential-time simulation for addressing smart grid challenges*.
- Shi, H., Guo, Y., Zhang, W., & Pan, J. (n.d.). *The study of the harmonic impedance measurement*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/490/7/072064>
- Spall, J. C. (1998). Implementation of the simultaneous perturbation algorithm for stochastic optimization. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 34(3), 817–823. <https://doi.org/10.1109/7.705889>
- Spelko, A., Blazic, B., Papić, I., Pourarab, M., Meyer, J., Xu, X., & Djokic, S. Z. (2017). CIGRE/CIREC JWG C4.42: Overview of common methods for assessment of harmonic contribution from customer installation. *2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017*. <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981195>

- Vieira, F. L., Ribeiro, P., Bonatto, B., & Castelo, T. (2018, December). *Harmonic Studies in OpenDSS Considering Renewable DG and Aggregate Linear Load Models*. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627343>
- Wakileh, G. J. (2001). Transformer Modelling. In *Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design* (pp. 169–219). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04343-1_8
- Xu, F., Wang, C., Shu, Q., Ma, Z., Zheng, H., & Peng, A. (2020). Study on the Estimation of Utility Harmonic Impedance Based on Minimum Norm of Impedance Difference. *IEEE Access*, 8, 207389–207396. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033388>

Anexos

Anexo A: Comparación entre impedancia armónica de la red e impedancia de cortocircuito antes de la conexión del sistema de generación fotovoltaica.

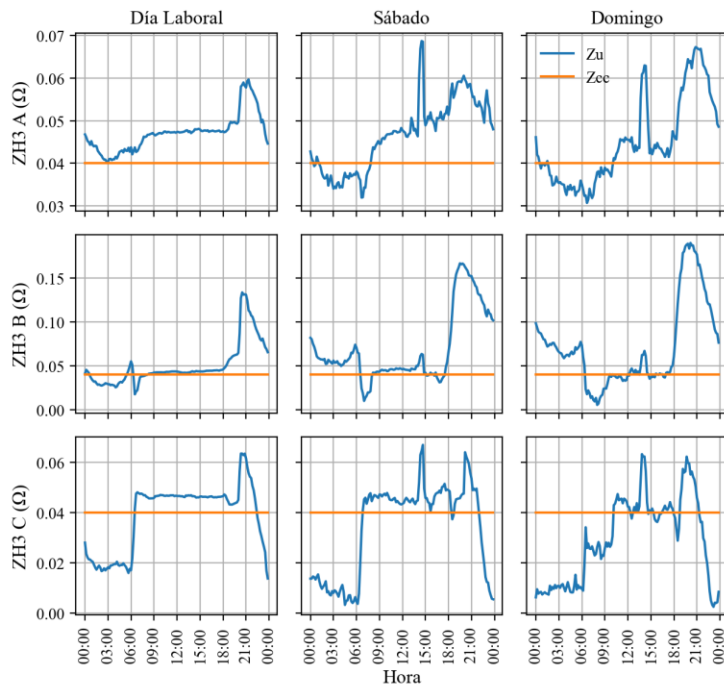


Figura 31. Impedancia armónica de la red para el tercer armónico.

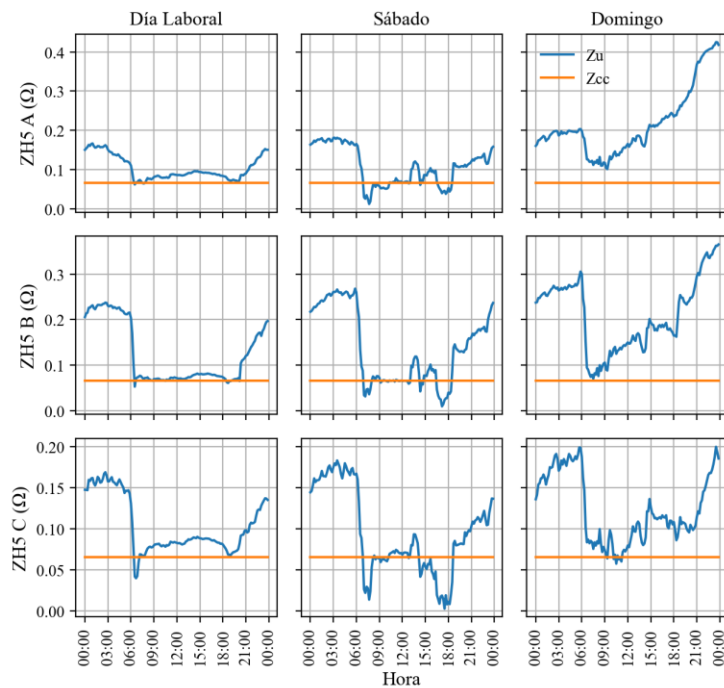


Figura 32. Impedancia armónica de la red para el quinto armónico.

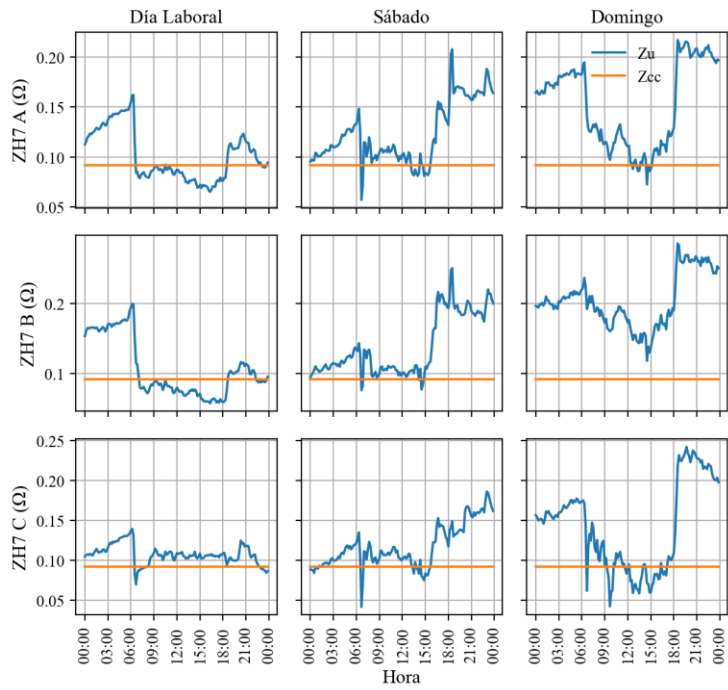


Figura 33. Impedancia armónica de la red para el séptimo armónico.

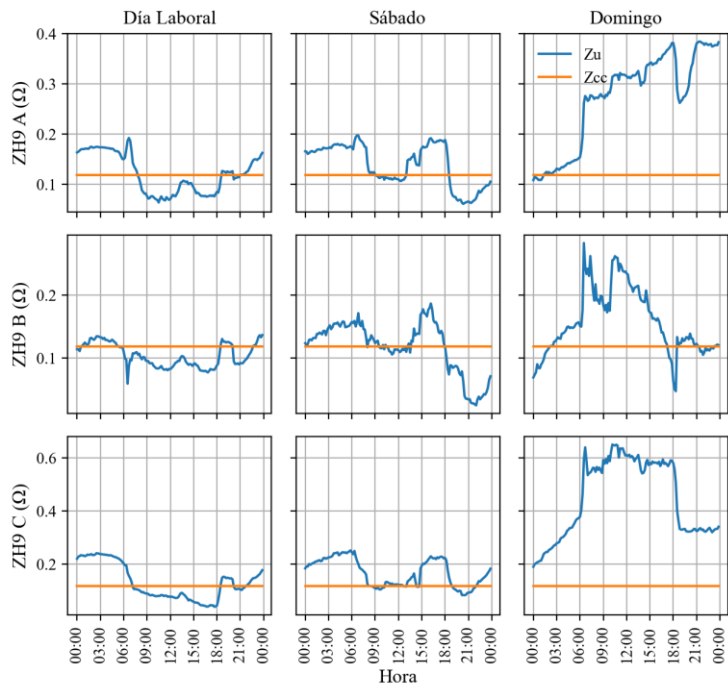


Figura 34. Impedancia armónica de la red para el noveno armónico.

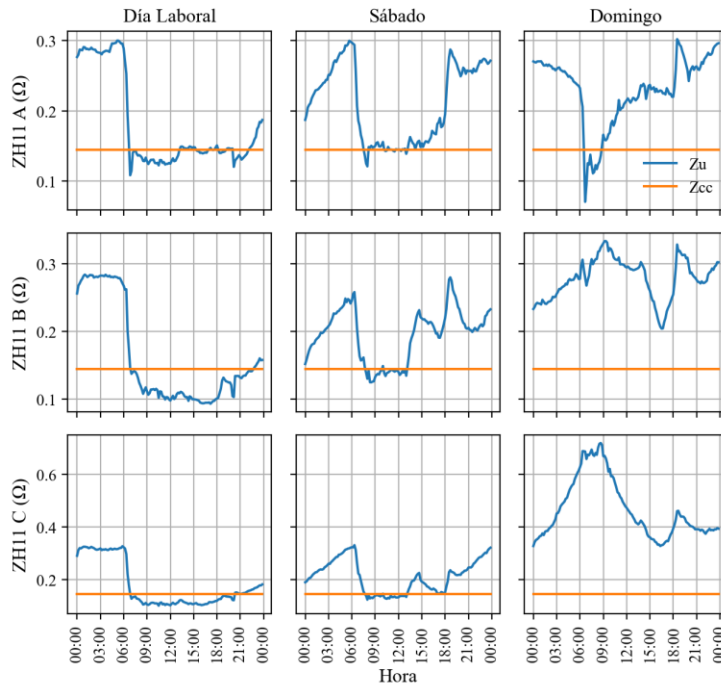


Figura 35. Impedancia armónica de la red para el onceavo armónico.

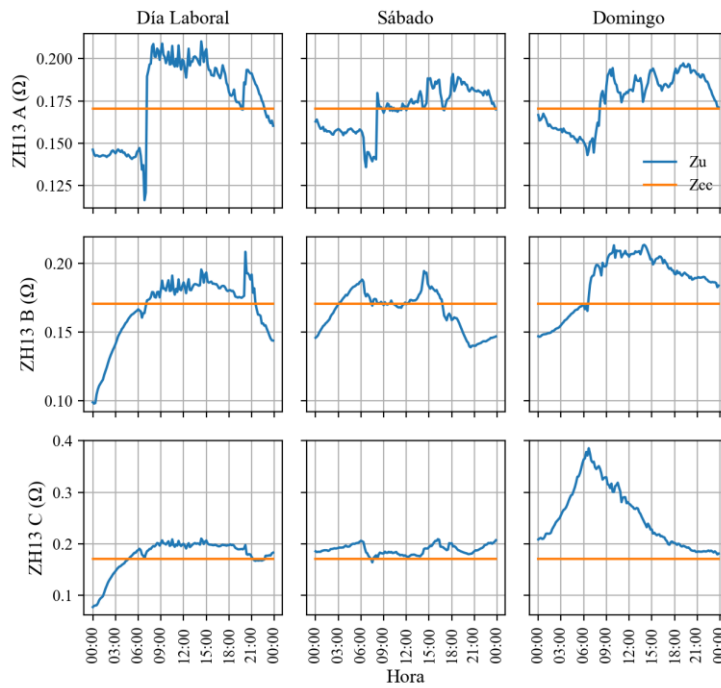


Figura 36. Impedancia armónica de la red para el treceavo armónico.

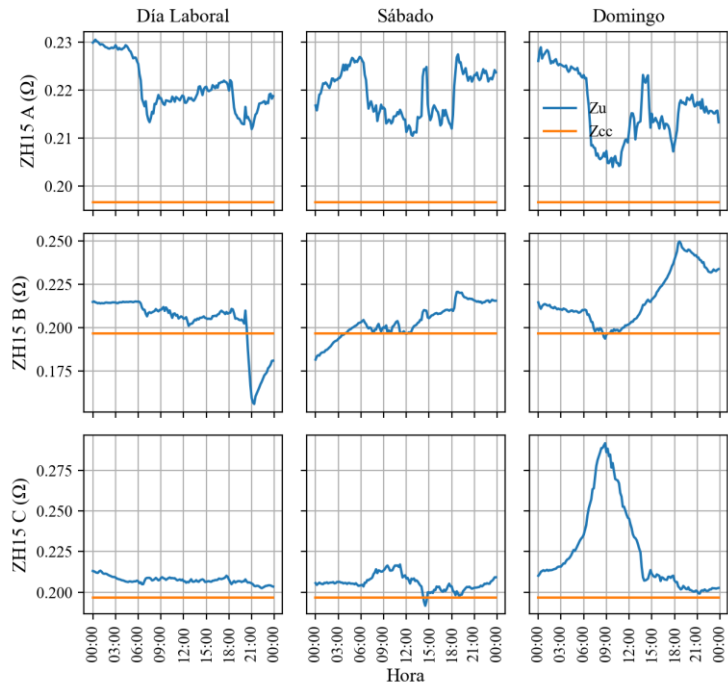


Figura 37. Impedancia armónica de la red para el quinceavo armónico.

Anexo B: Comparación entre impedancia armónica de la red antes y después de la conexión del sistema de generación fotovoltaica.

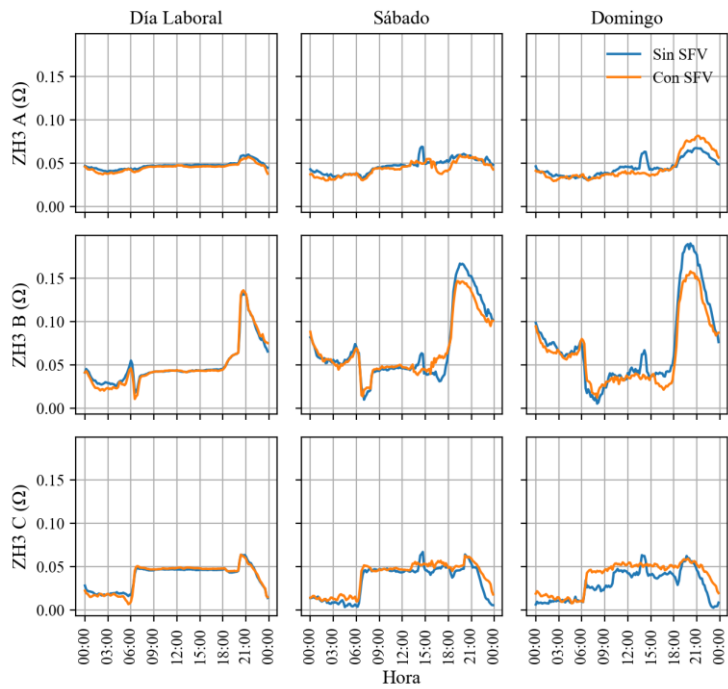


Figura 38. Impedancia armónica de la red para el tercer armónico antes y después de la conexión del SFV.

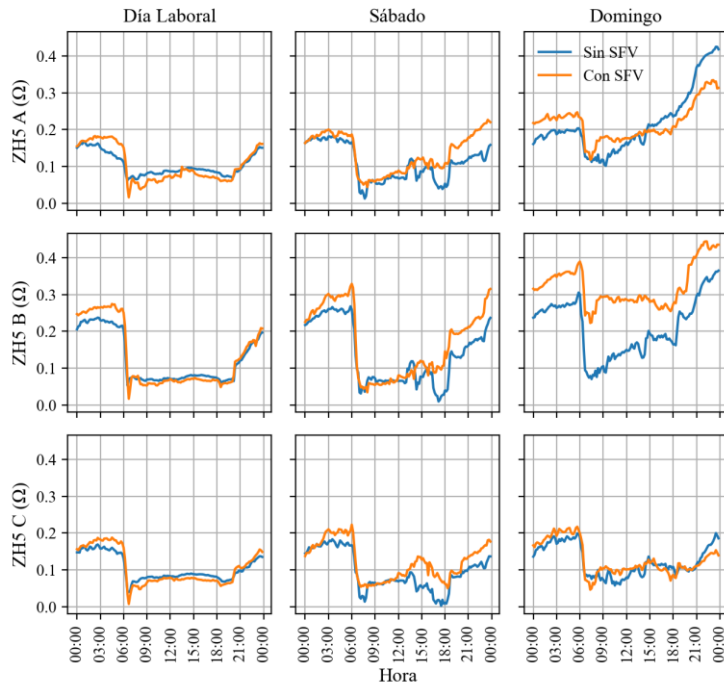


Figura 39. Impedancia armónica de la red para el quinto armónico antes y después de la conexión del SFV.

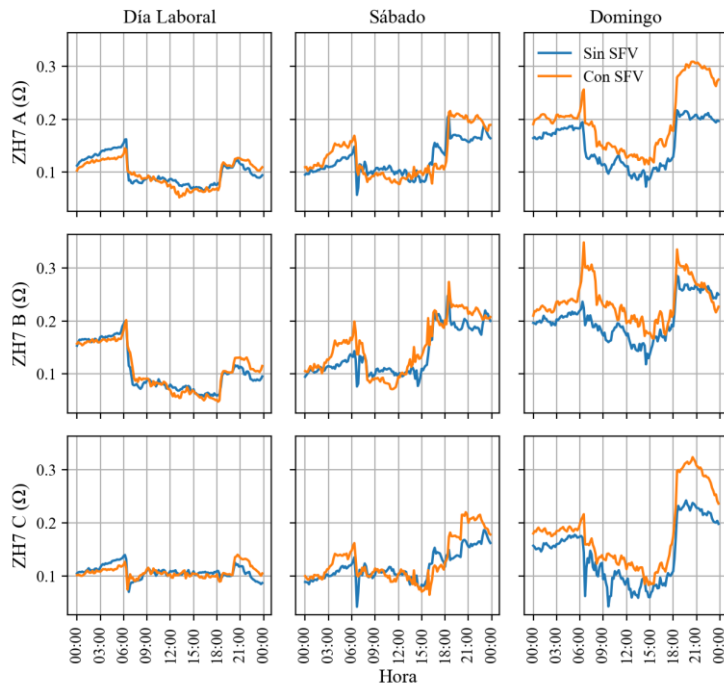


Figura 40. Impedancia armónica de la red para el séptimo armónico antes y después de la conexión del SFV.

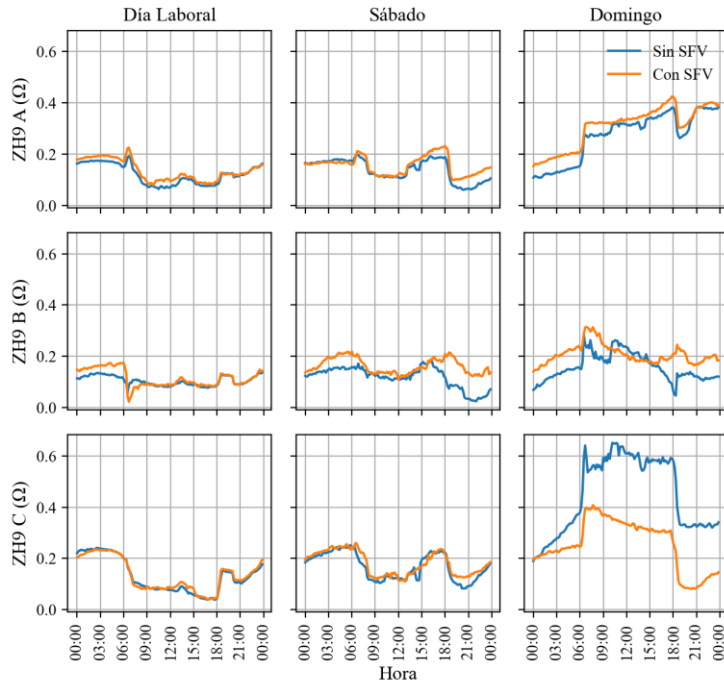


Figura 41. Impedancia armónica de la red para el noveno armónico antes y después de la conexión del SFV.

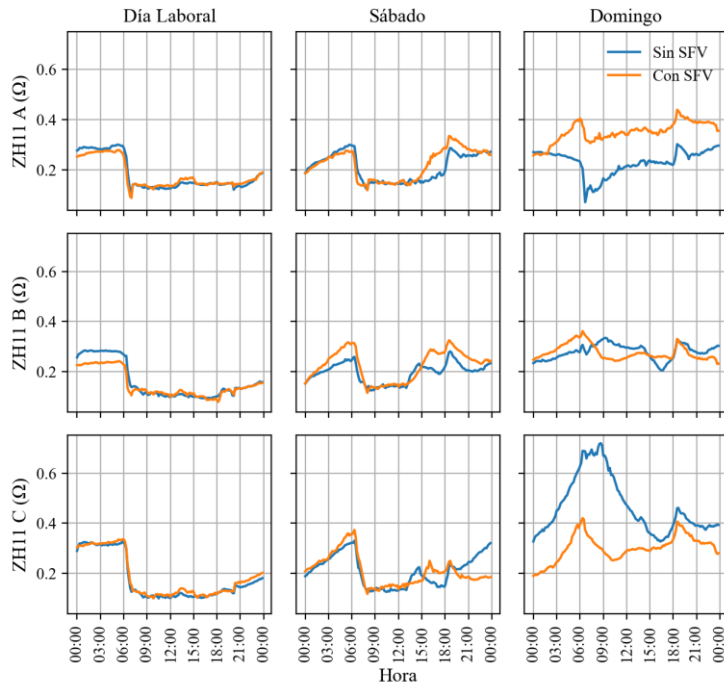


Figura 42. Impedancia armónica de la red para el onceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.

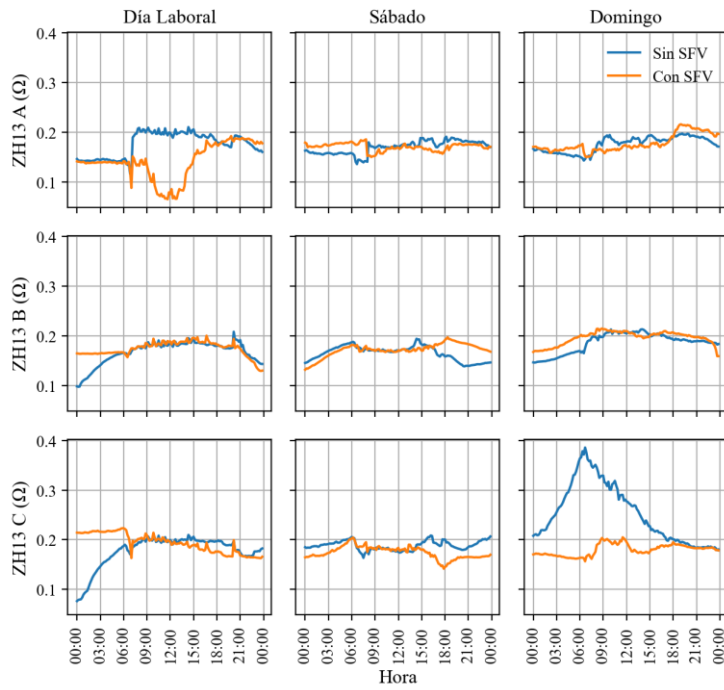


Figura 43. Impedancia armónica de la red para el treceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.

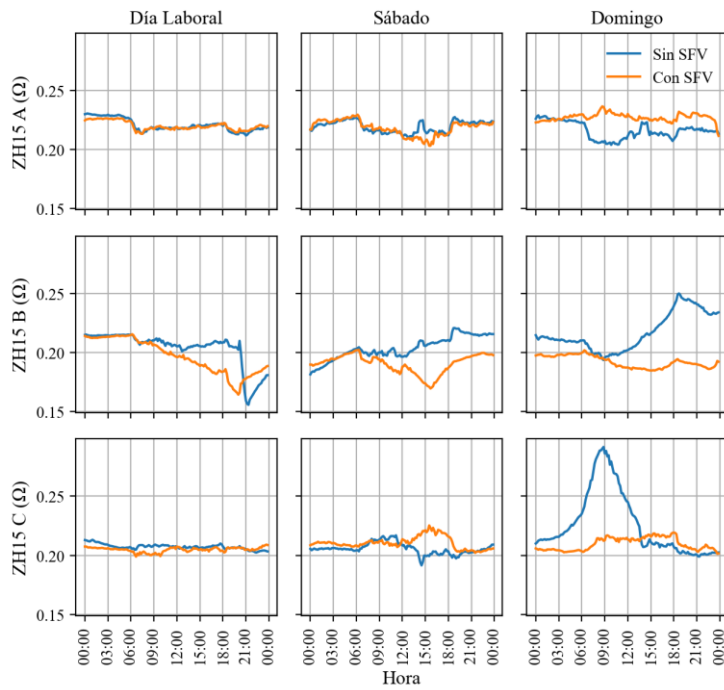


Figura 44. Impedancia armónica de la red para el quinceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.

Anexo C: Comparación de la impedancia armónica del consumidor antes y después de la conexión del sistema de generación fotovoltaica.

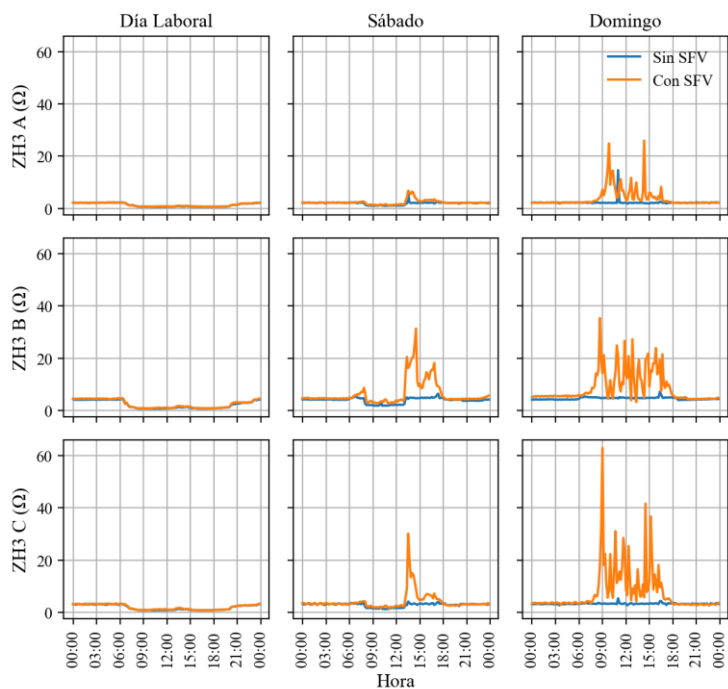


Figura 45. Impedancia armónica del consumidor para el tercer armónico antes y después de la conexión del SFV.

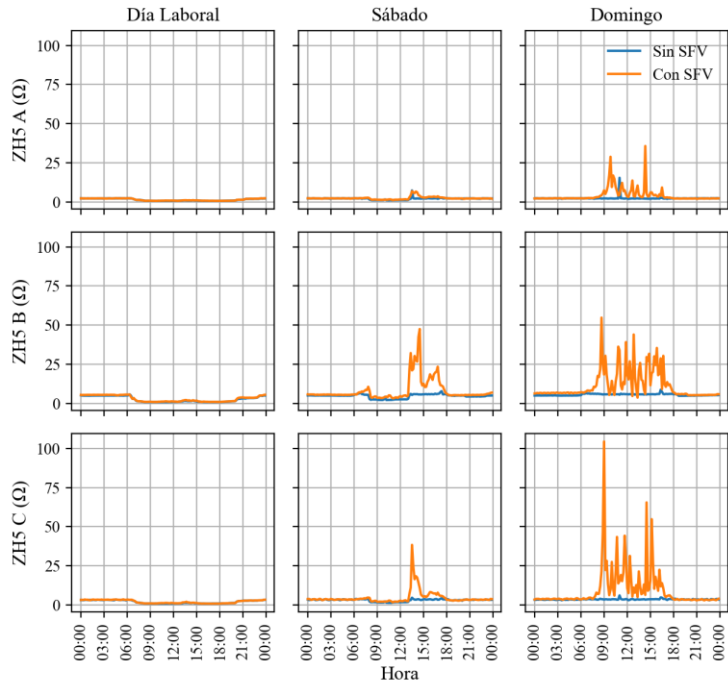


Figura 46. Impedancia armónica del consumidor para el quinto armónico antes y después de la conexión del SFV.

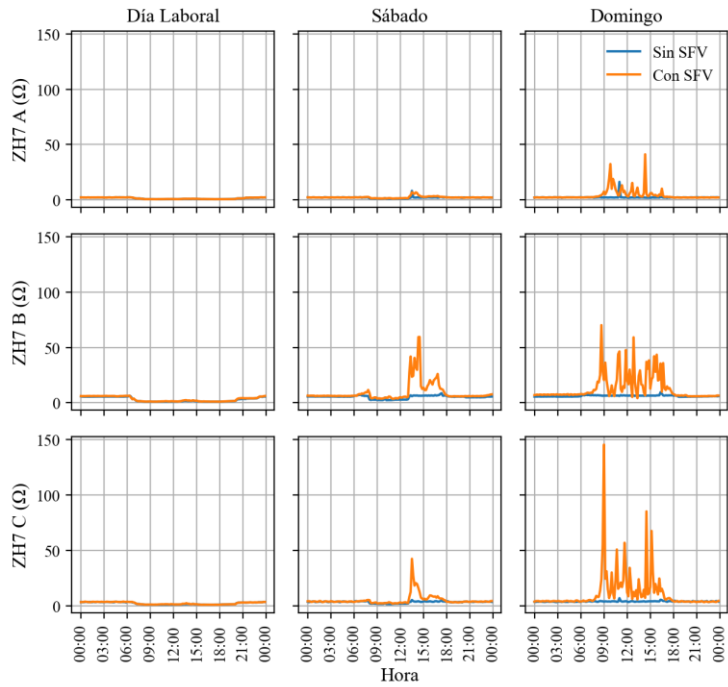


Figura 47. Impedancia armónica del consumidor para el séptimo armónico antes y después de la conexión del SFV.

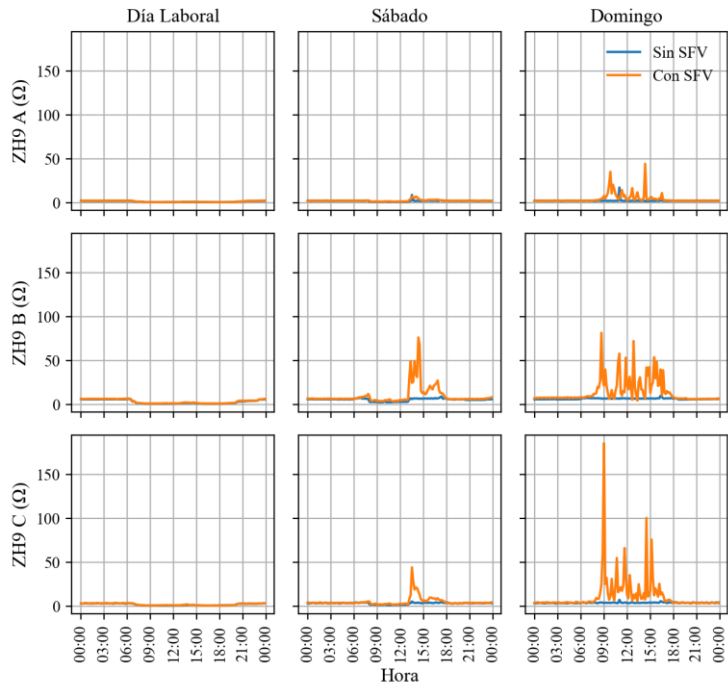


Figura 48. Impedancia armónica del consumidor para el noveno armónico antes y después de la conexión del SFV.

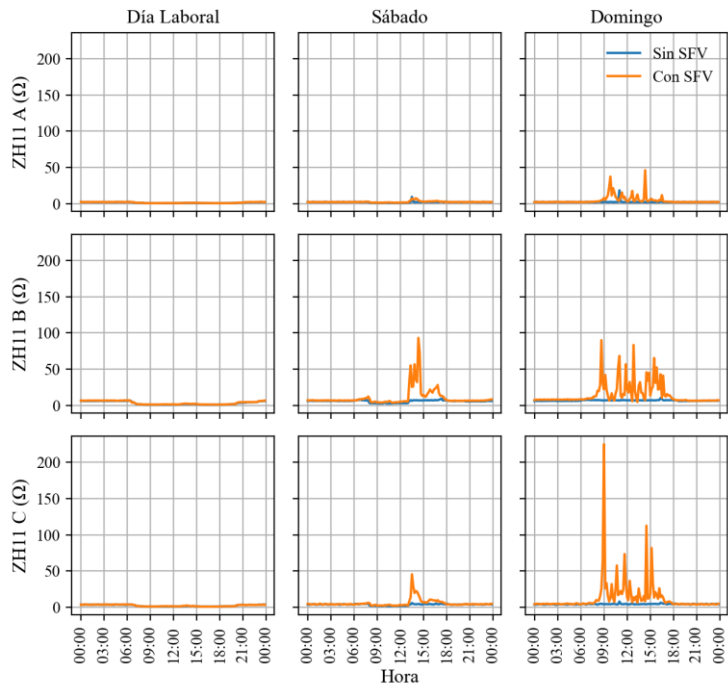


Figura 49. Impedancia armónica del consumidor para el onceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.

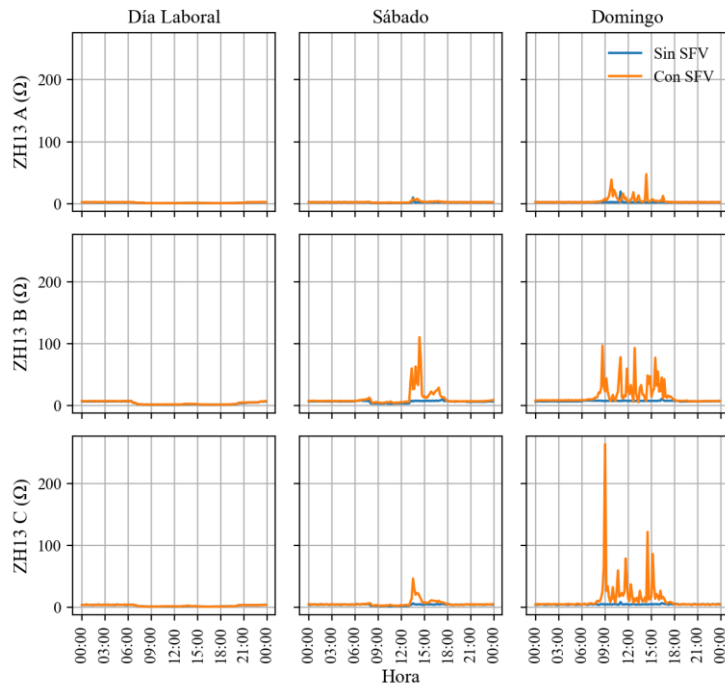


Figura 50. Impedancia armónica del consumidor para el treceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.

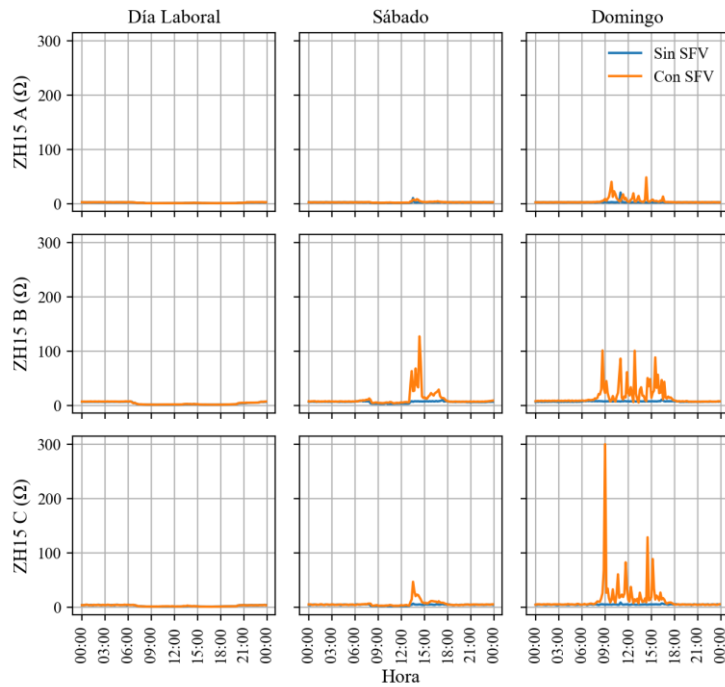


Figura 51. Impedancia armónica del consumidor para el quinceavo armónico antes y después de la conexión del SFV.

Anexo D: Contribución armónica de voltaje y corriente antes de la conexión del sistema de generación fotovoltaica.

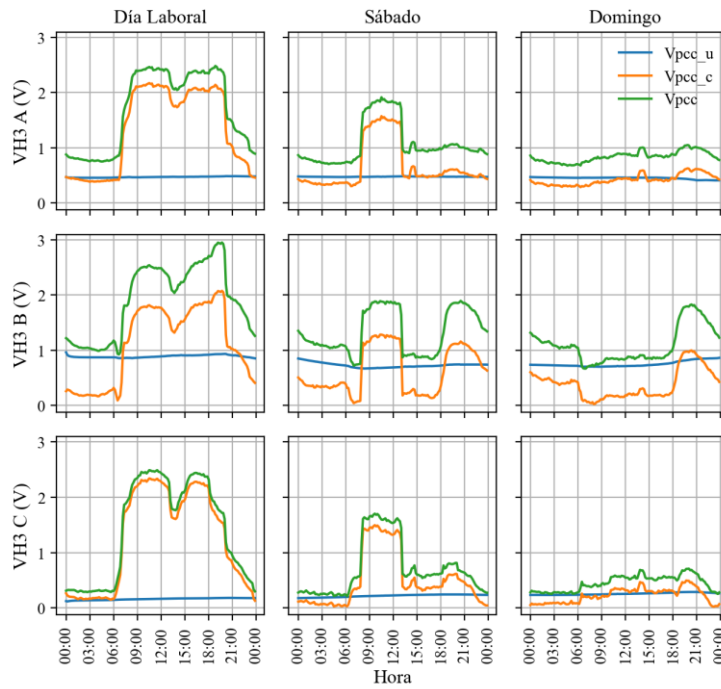


Figura 52. Contribución armónica de voltaje para el tercer armónico.

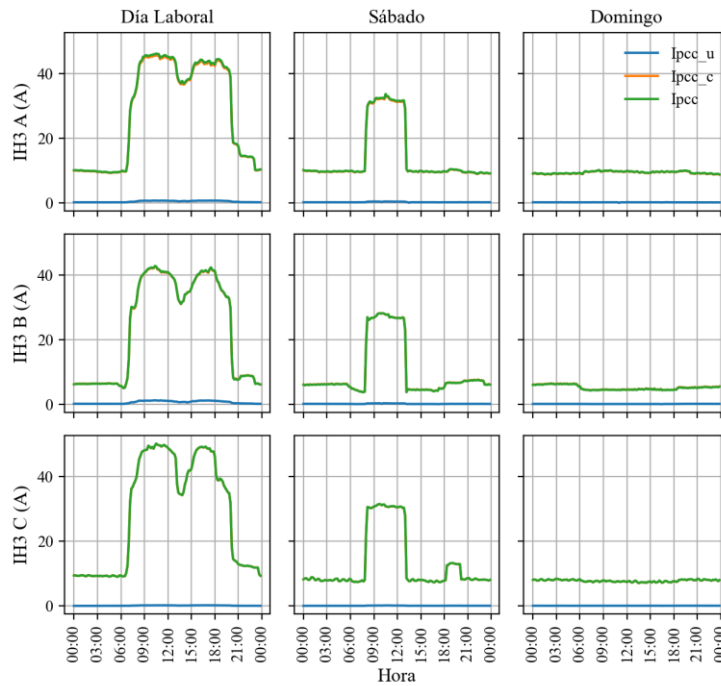


Figura 53. Contribución armónica de corriente para el tercer armónico.

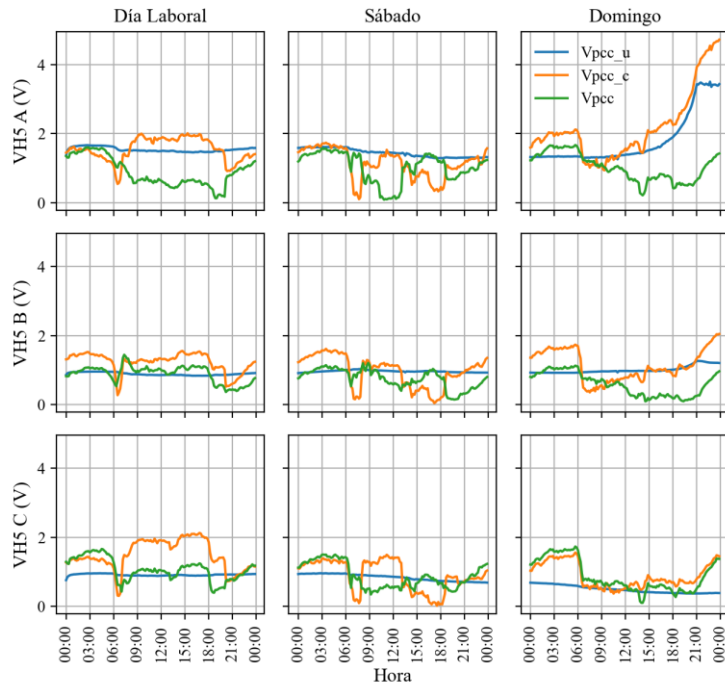


Figura 54. Contribución armónica de voltaje para el quinto armónico.

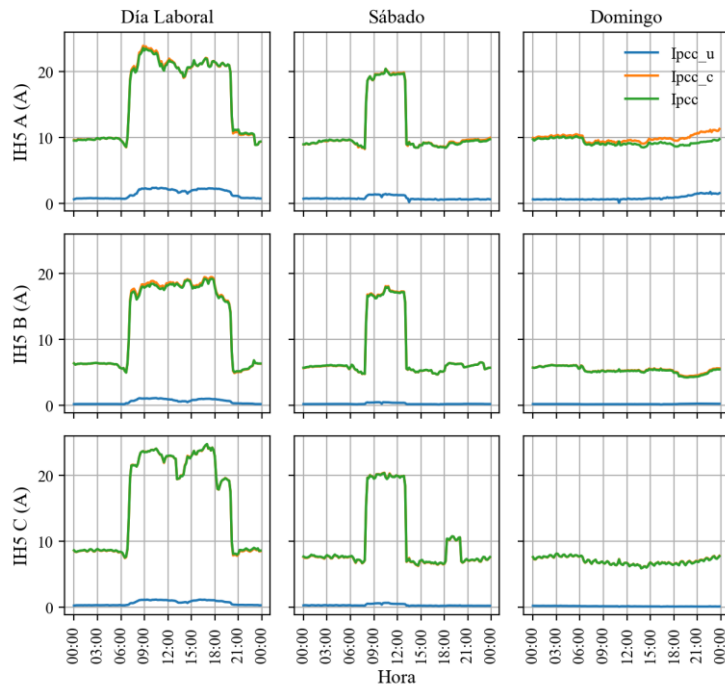


Figura 55. Contribución armónica de corriente para el quinto armónico.

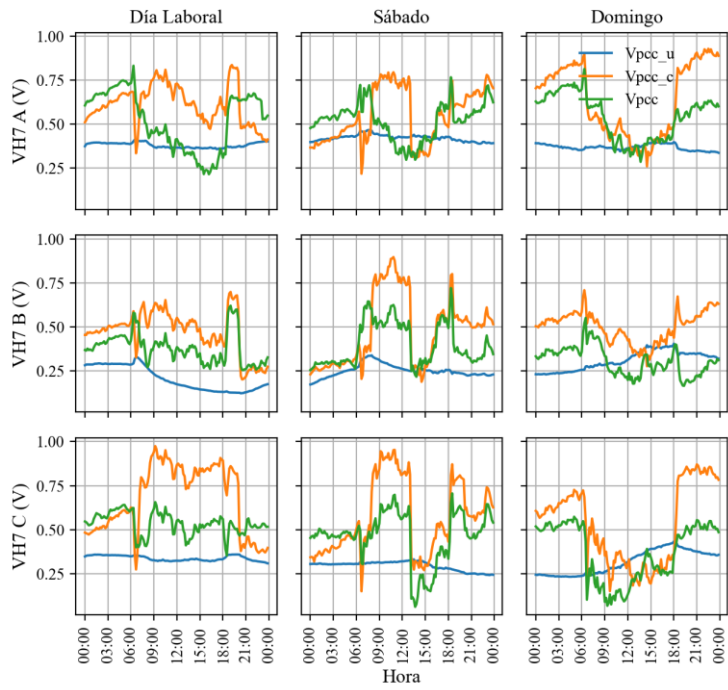


Figura 56. Contribución armónica de voltaje para el séptimo armónico.

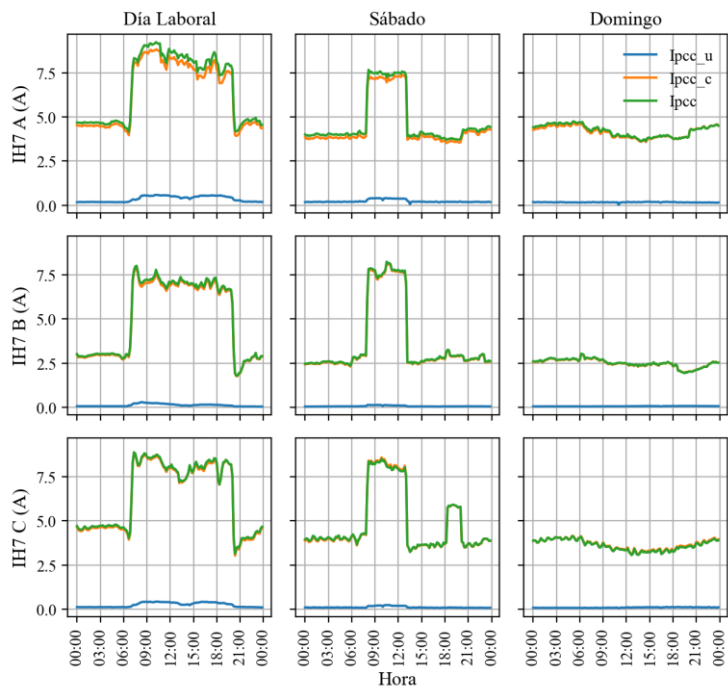


Figura 57. Contribución armónica de corriente para el séptimo armónico.

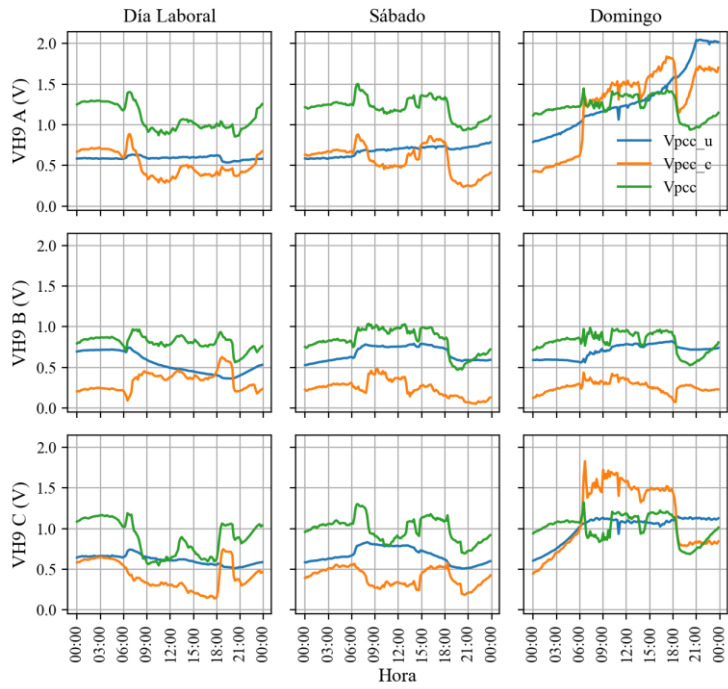


Figura 58. Contribución armónica de voltaje para el noveno armónico.

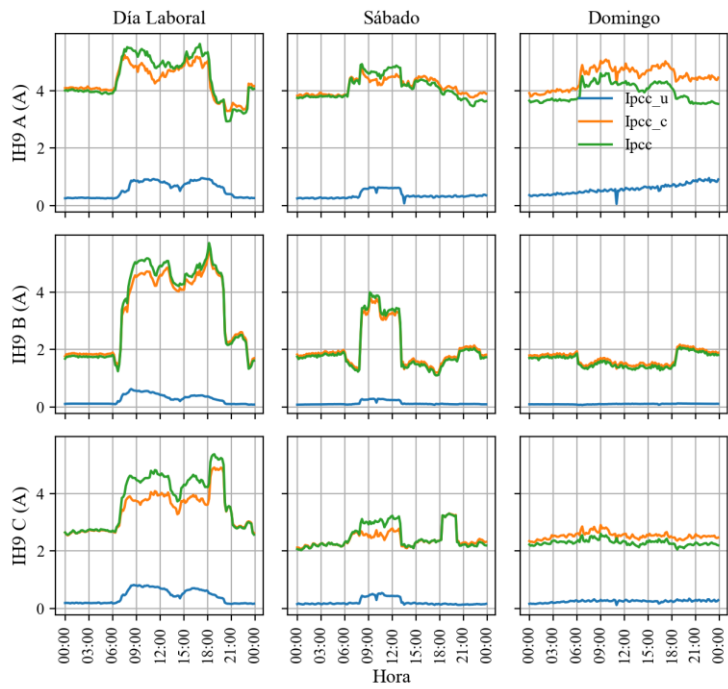


Figura 59. Contribución armónica de corriente para el noveno armónico.

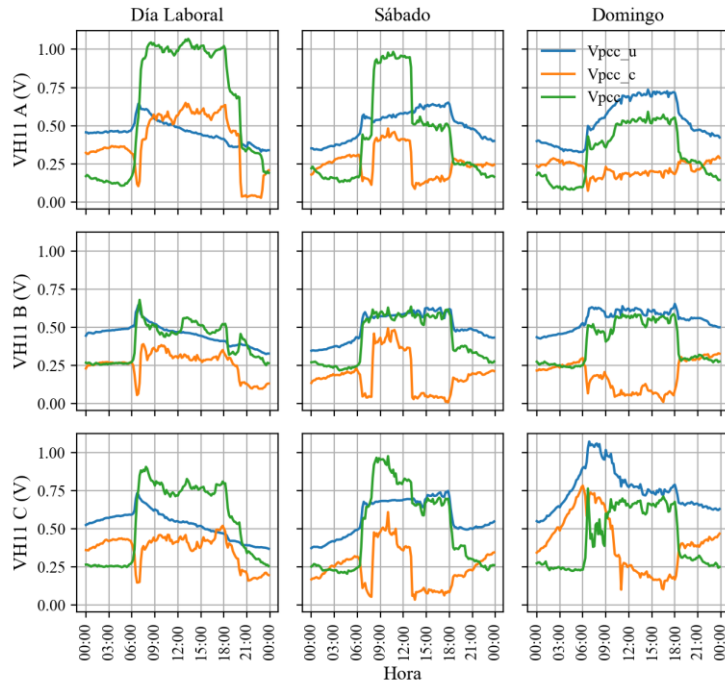


Figura 60. Contribución armónica de voltaje para el onceavo armónico.

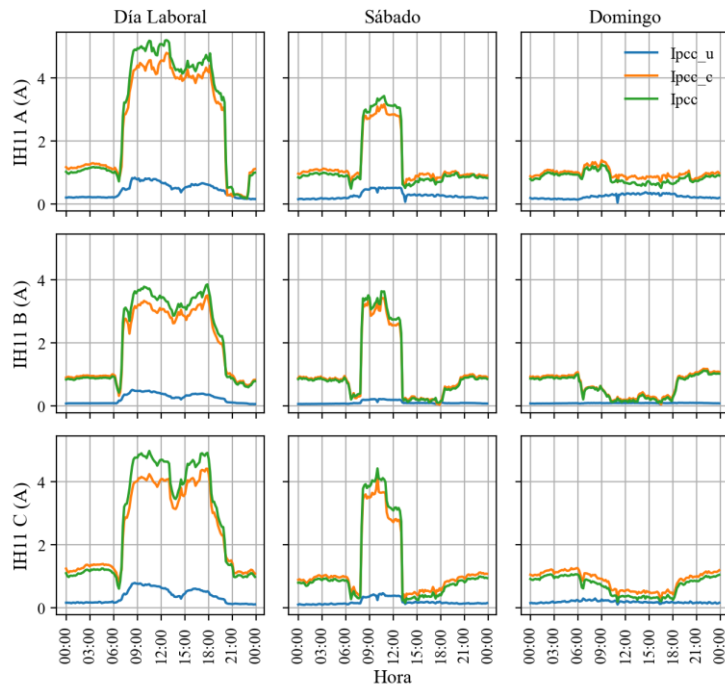


Figura 61. Contribución armónica de corriente para el onceavo armónico.

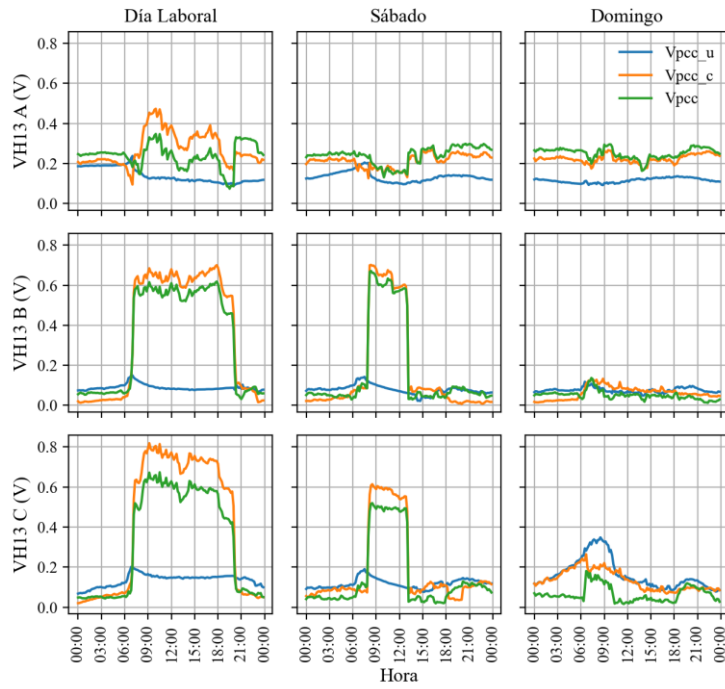


Figura 62. Contribución armónica de voltaje para el treceavo armónico.

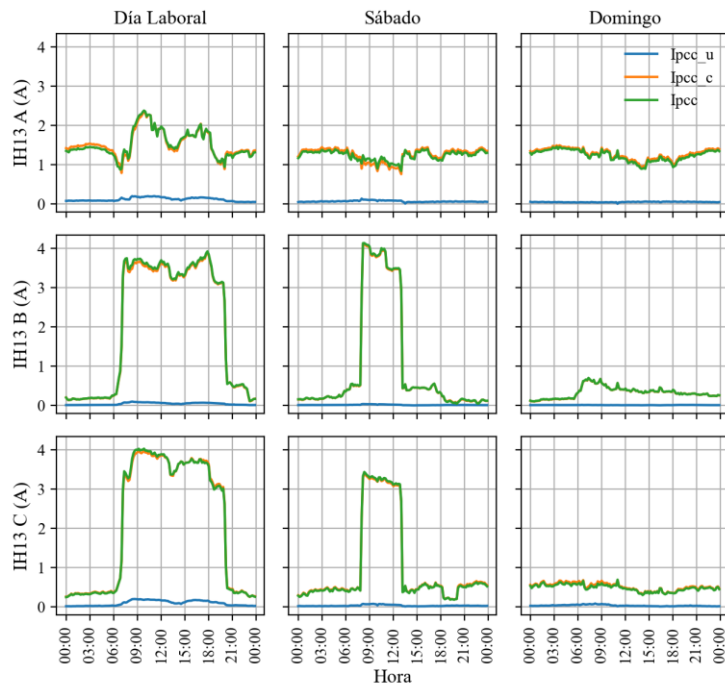


Figura 63. Contribución armónica de corriente para el treceavo armónico.

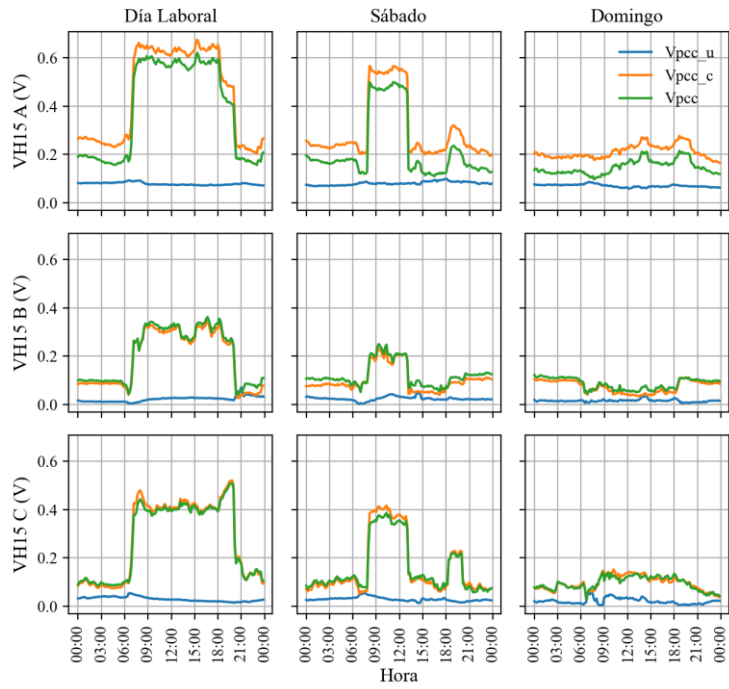


Figura 64. Contribución armónica de voltaje para el quinceavo armónico.

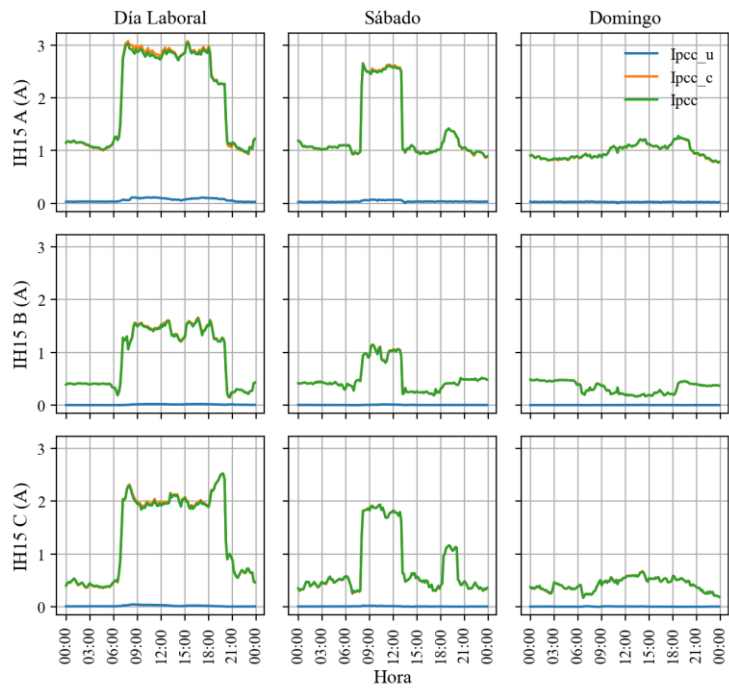


Figura 65. Contribución armónica de corriente para el quinceavo armónico.

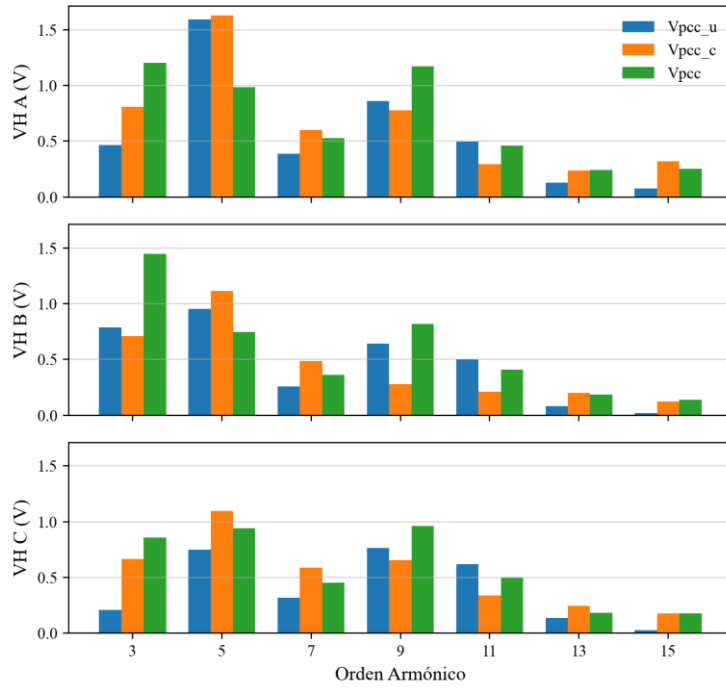


Figura 66. Promedio de contribución armónica de voltaje.

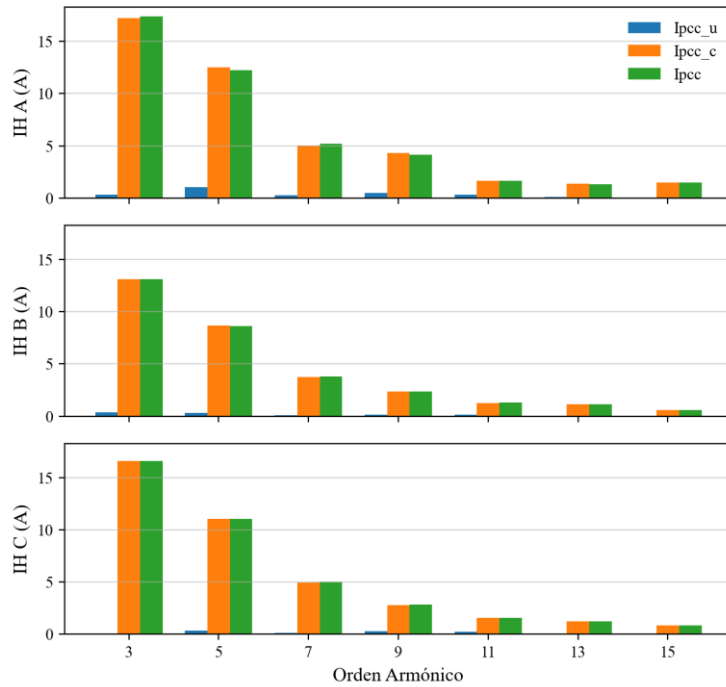


Figura 67. Promedio de contribución armónica de corriente.

Anexo E: Contribución armónica de voltaje y corriente después de la conexión del sistema de generación fotovoltaica.

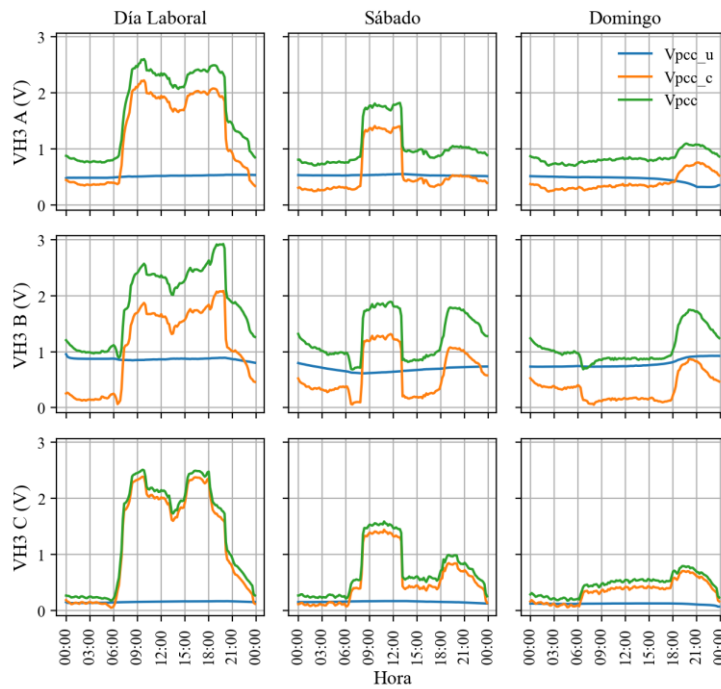


Figura 68. Contribución armónica de voltaje para el tercer armónico después de la conexión del SFV.

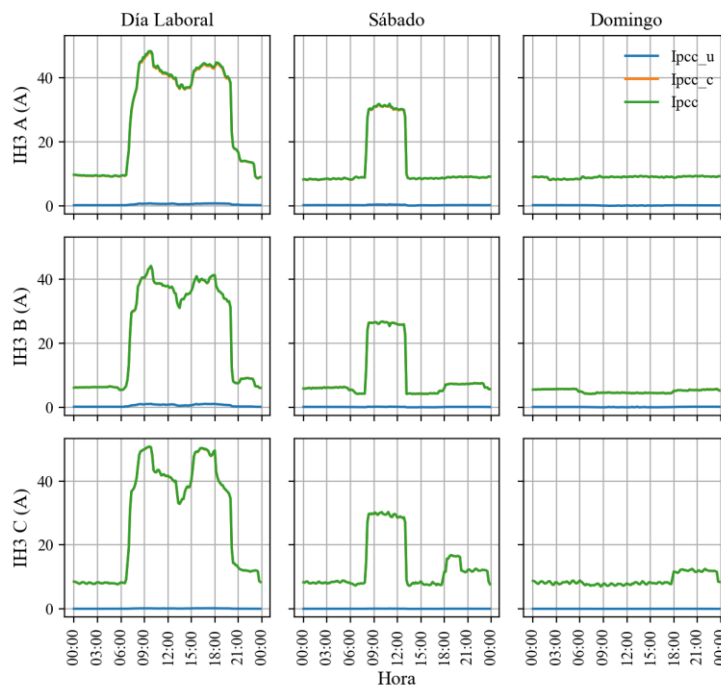


Figura 69. Contribución armónica de corriente para el tercer armónico después de la conexión del SFV.

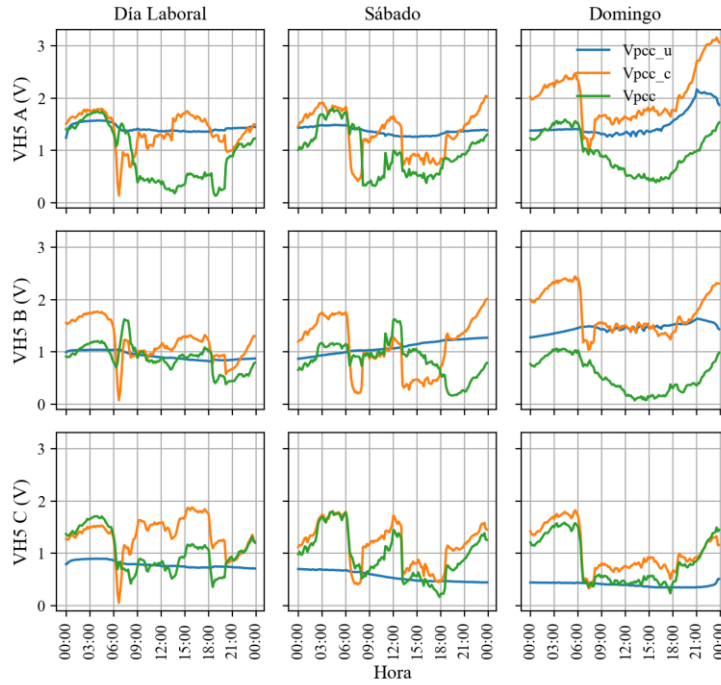


Figura 70. Contribución armónica de voltaje para el quinto armónico después de la conexión del SFV.

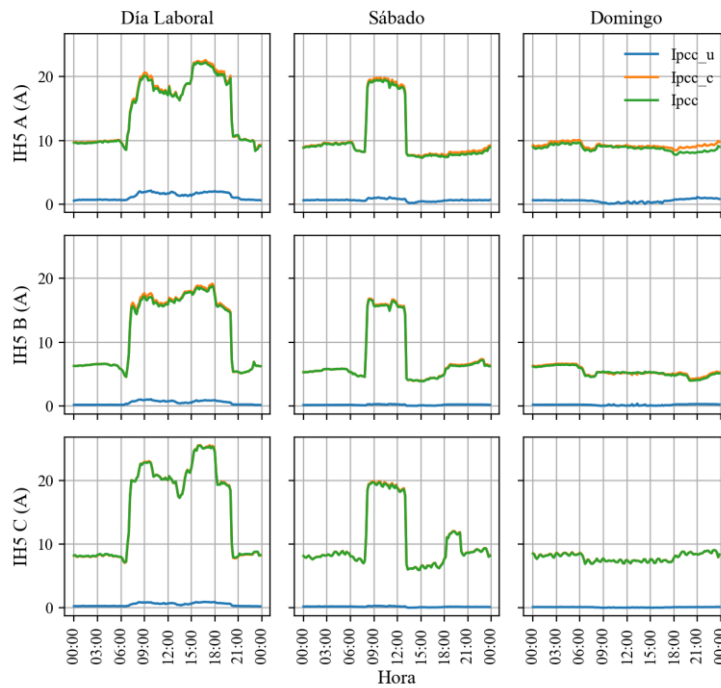


Figura 71. Contribución armónica de corriente para el quinto armónico después de la conexión del SFV.

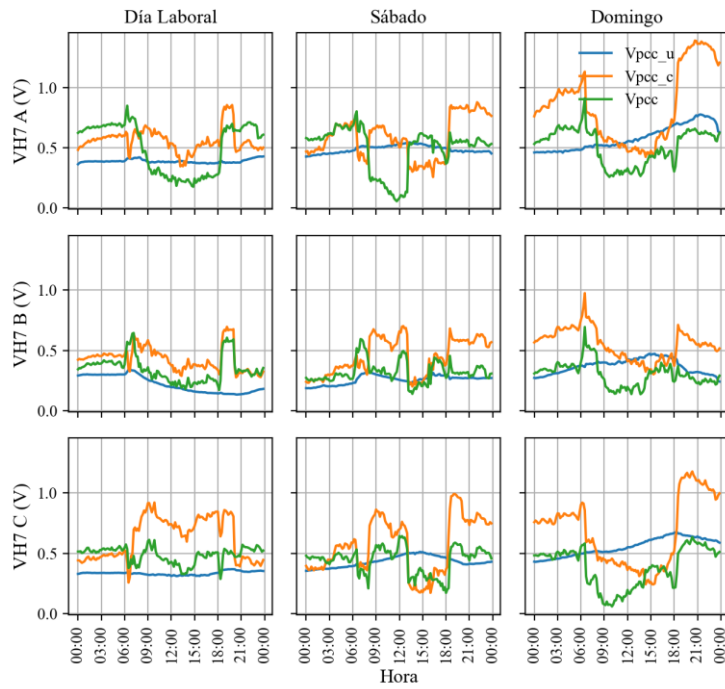


Figura 72. Contribución armónica de voltaje para el séptimo armónico después de la conexión del SFV.

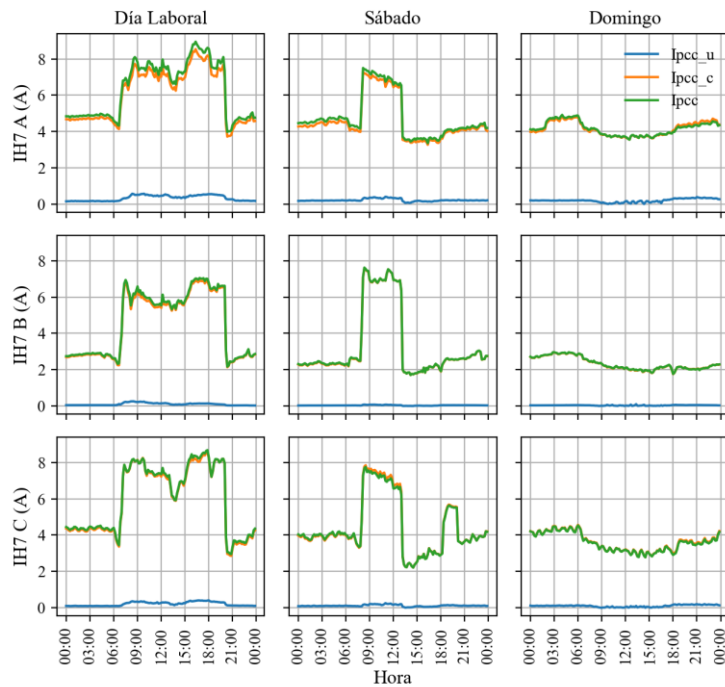


Figura 73. Contribución armónica de corriente para el séptimo armónico después de la conexión del SFV.

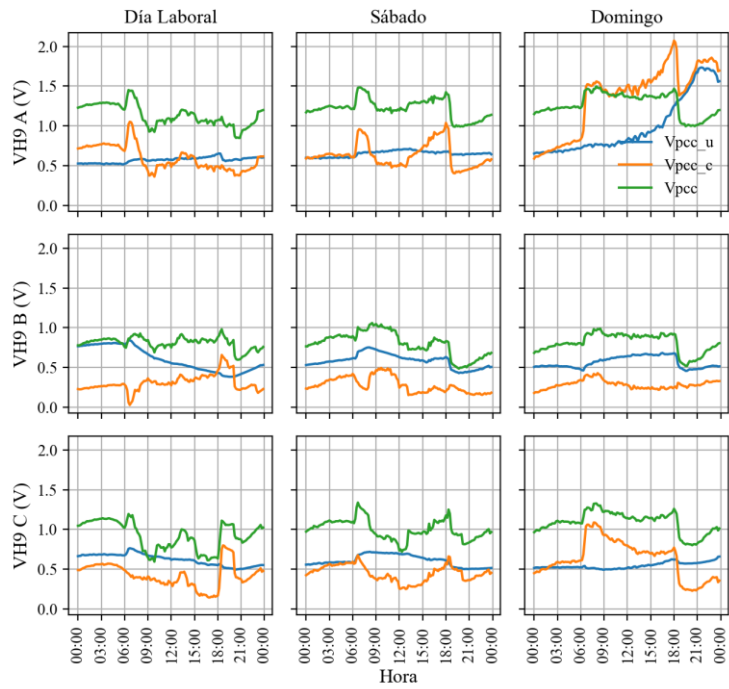


Figura 74. Contribución armónica de voltaje para el noveno armónico después de la conexión del SFV.

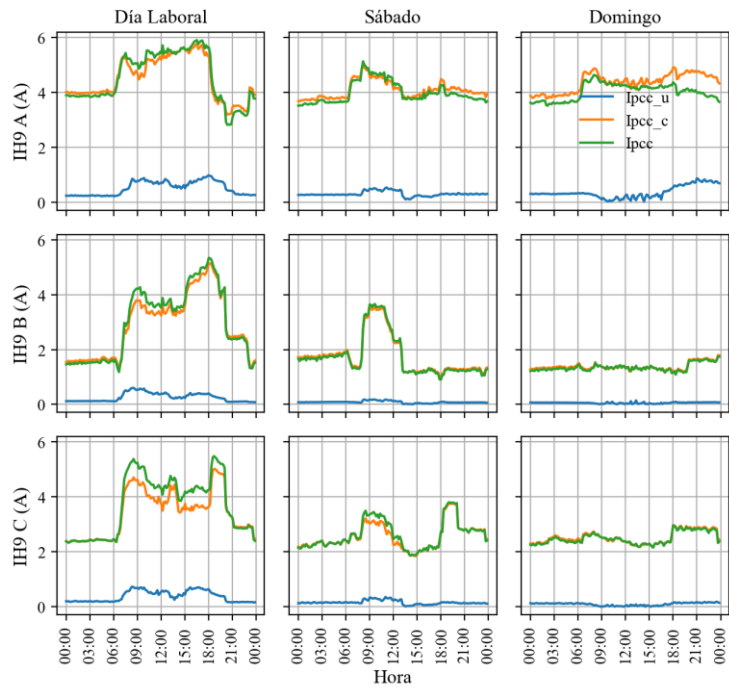


Figura 75. Contribución armónica de corriente para el noveno armónico después de la conexión del SFV.

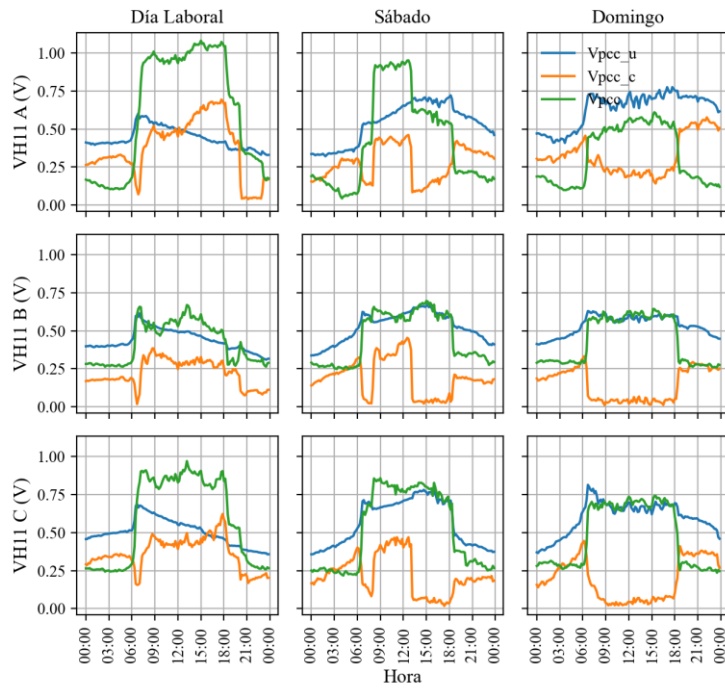


Figura 76. Contribución armónica de voltaje para el onceavo armónico después de la conexión del SFV.

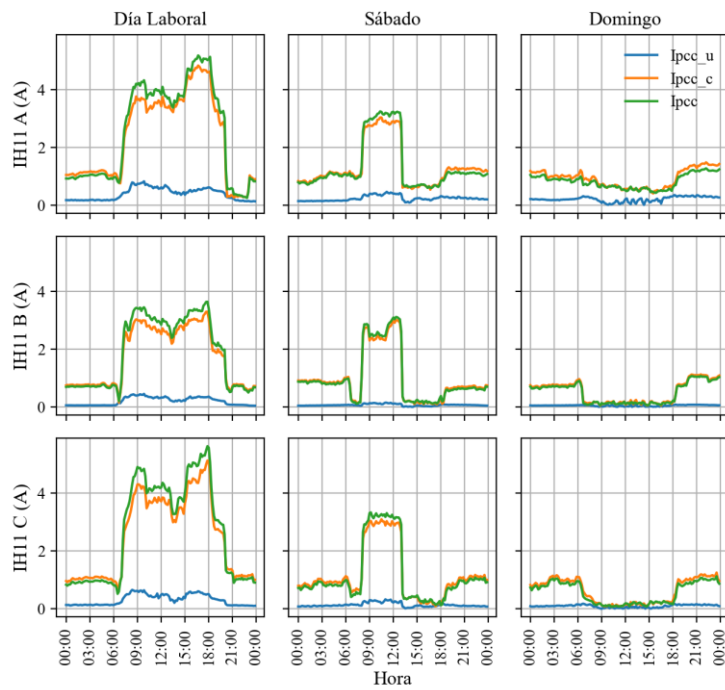


Figura 77. Contribución armónica de corriente para el onceavo armónico después de la conexión del SFV.

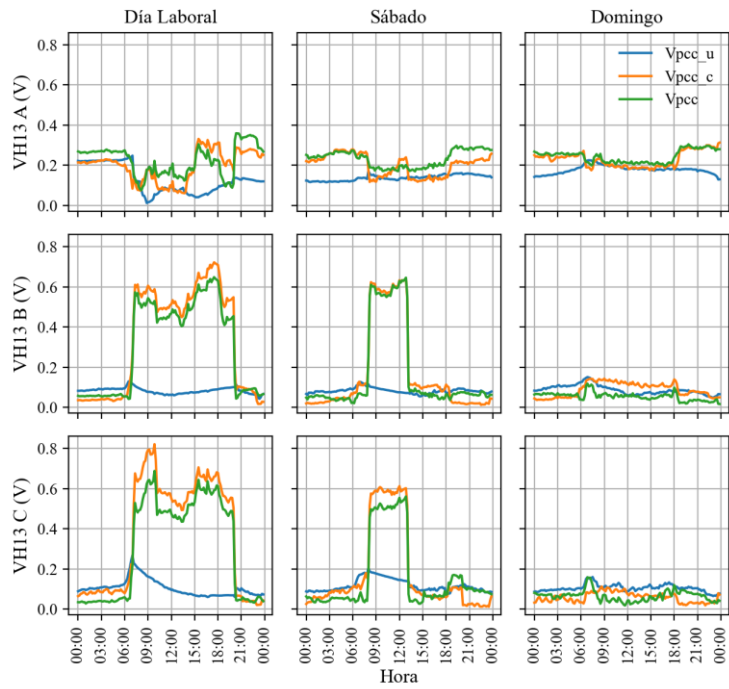


Figura 78. Contribución armónica de voltaje para el treceavo armónico después de la conexión del SFV.

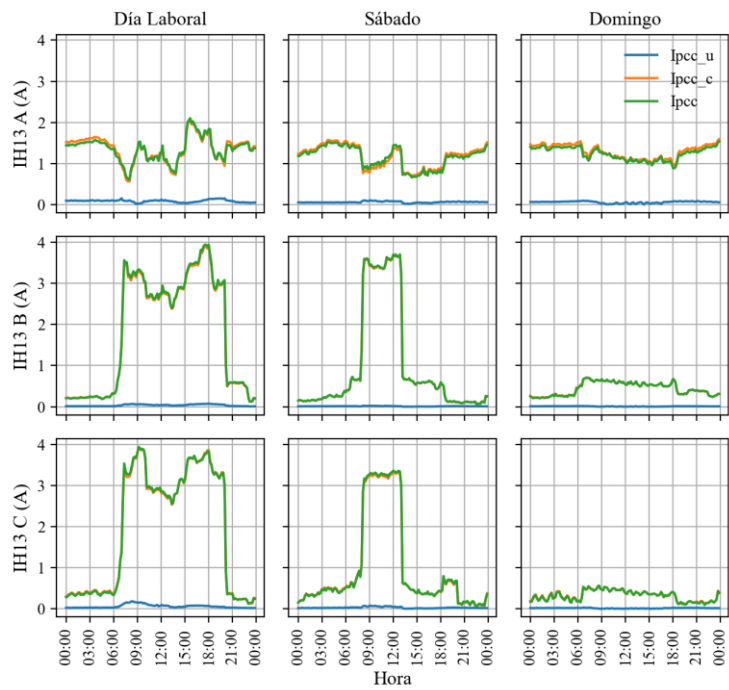


Figura 79. Contribución armónica de corriente para el treceavo armónico después de la conexión del SFV.

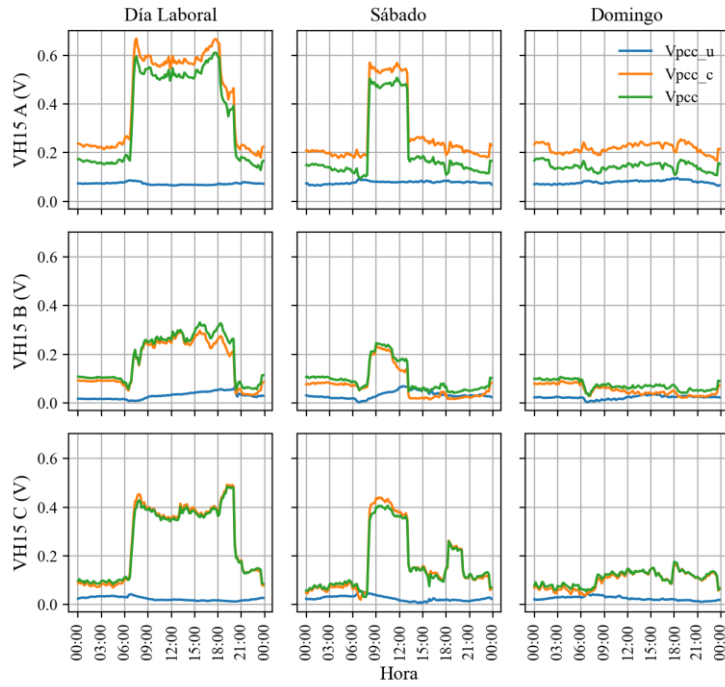


Figura 80. Contribución armónica de voltaje para el quinceavo armónico después de la conexión del SFV.

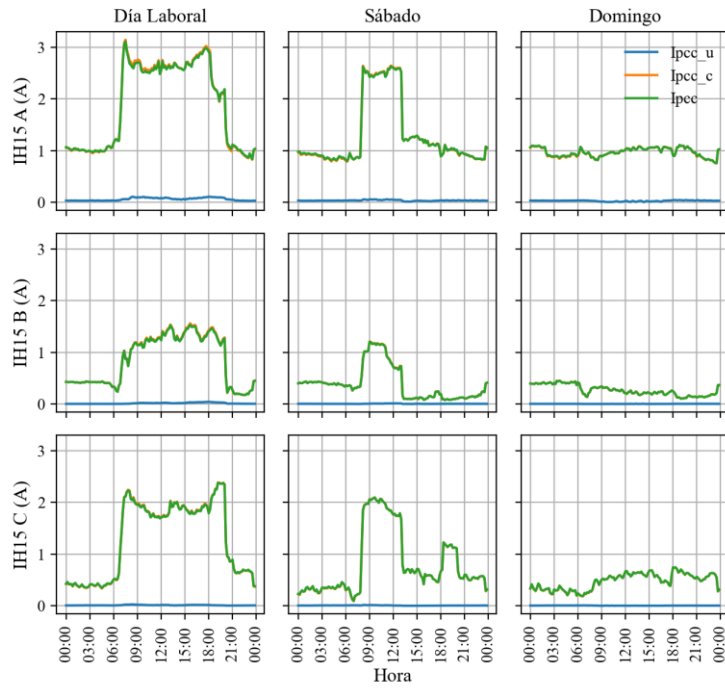


Figura 81. Contribución armónica de corriente para el quinceavo armónico después de la conexión del SFV.

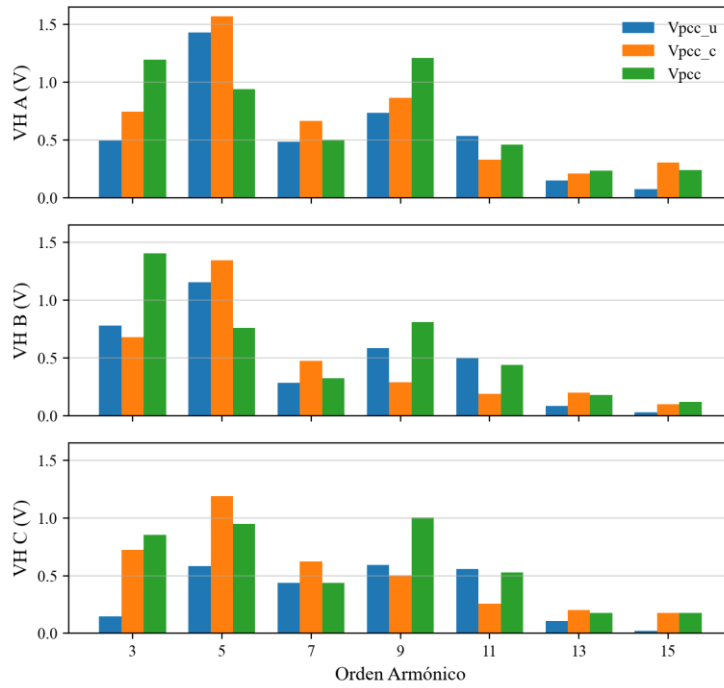


Figura 82. Promedio de contribución armónica de voltaje después de la conexión del SFV.

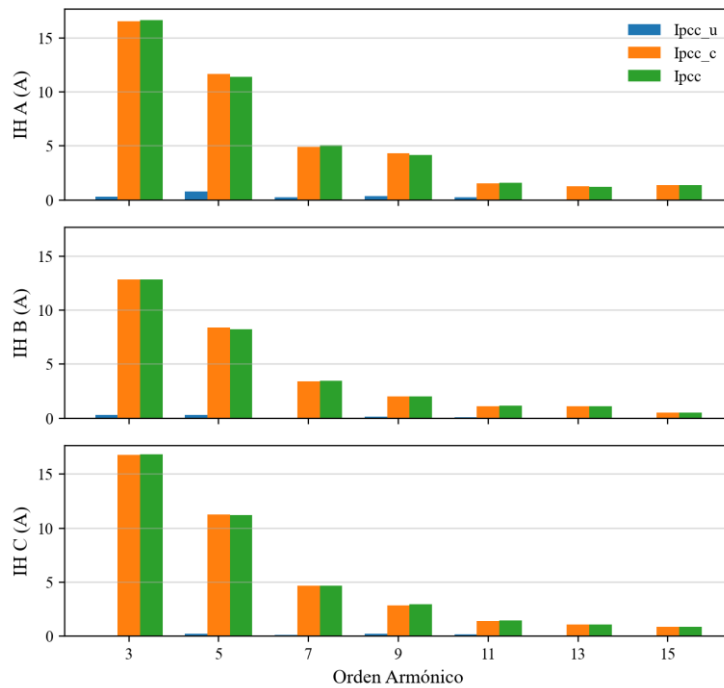


Figura 83. Promedio de contribución armónica de corriente después de la conexión del SFV.

Anexo F: Ajuste de armónicos de voltaje en el PCC mediante HSE.

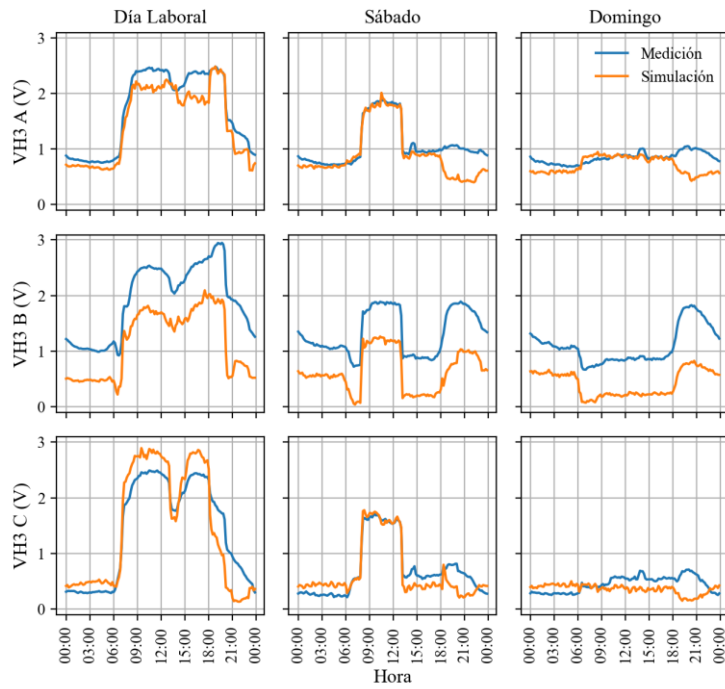


Figura 84. Ajuste de tercer armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.

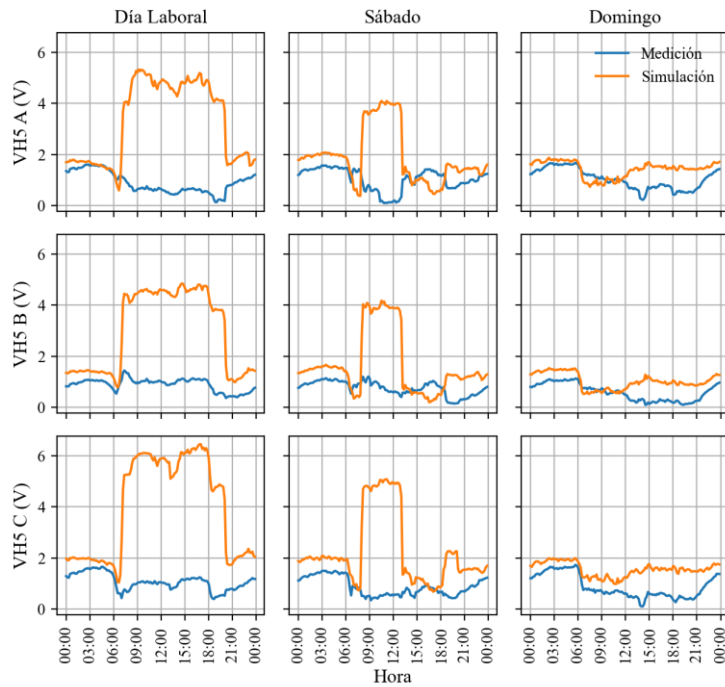


Figura 85. Ajuste de quinto armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.

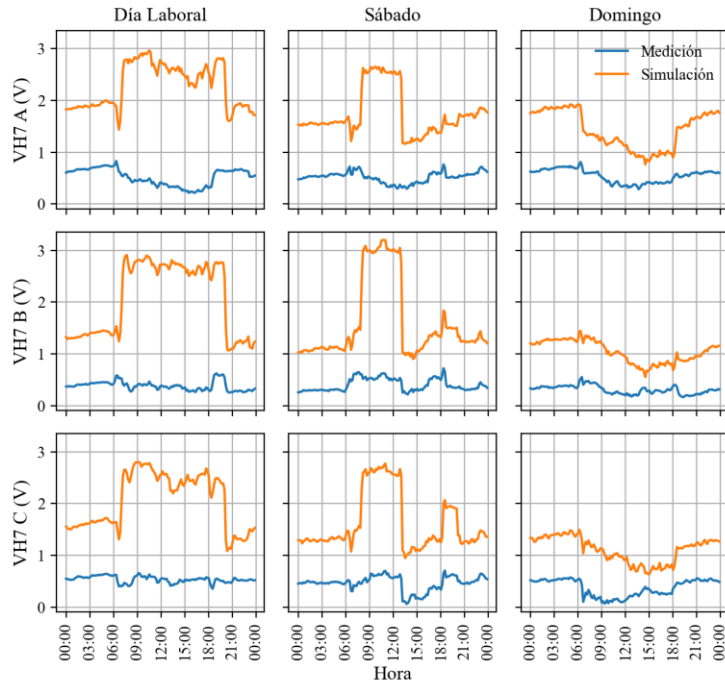


Figura 86. Ajuste de séptimo armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.

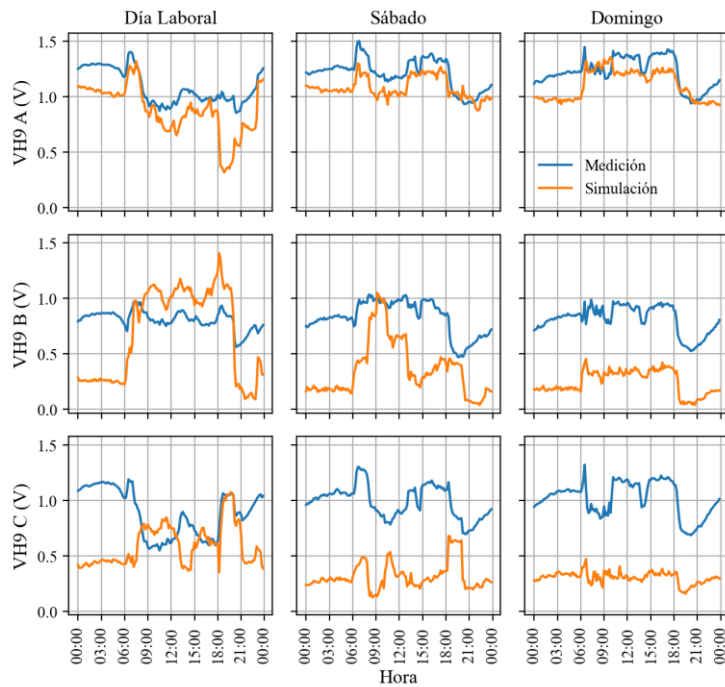


Figura 87. Ajuste de noveno armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.

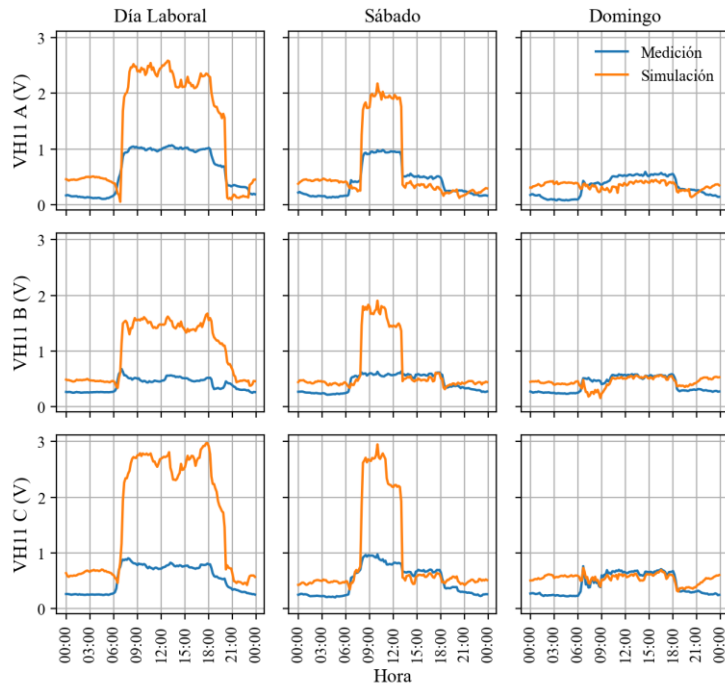


Figura 88. Ajuste de onceavo armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.

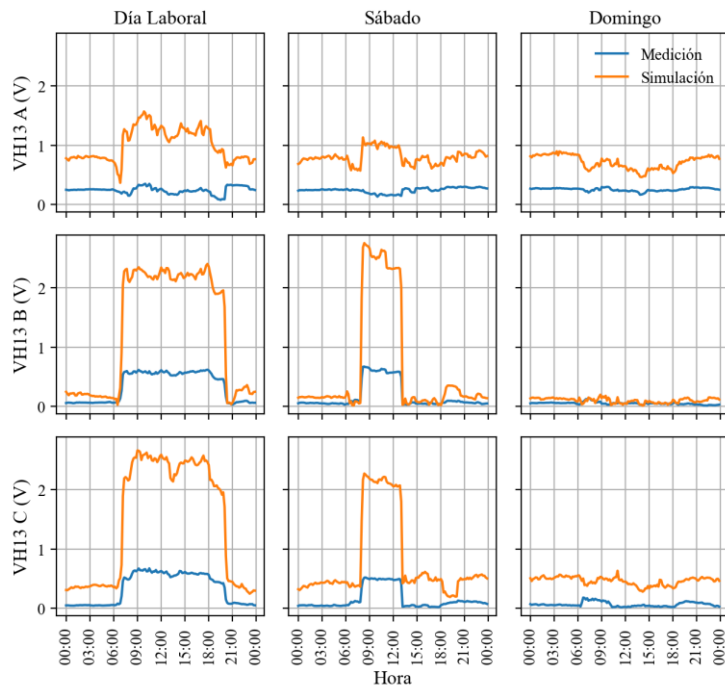


Figura 89. Ajuste de treceavo armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.

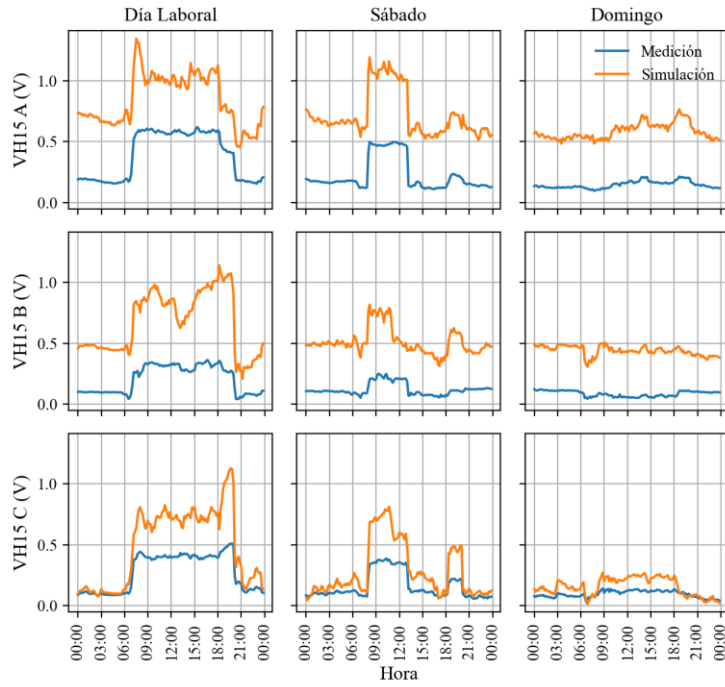


Figura 90. Ajuste de quinceavo armónico de voltaje en el PCC mediante HSE.

Anexo G: Ajuste de armónicos de voltaje en el PCC mediante SPSA.

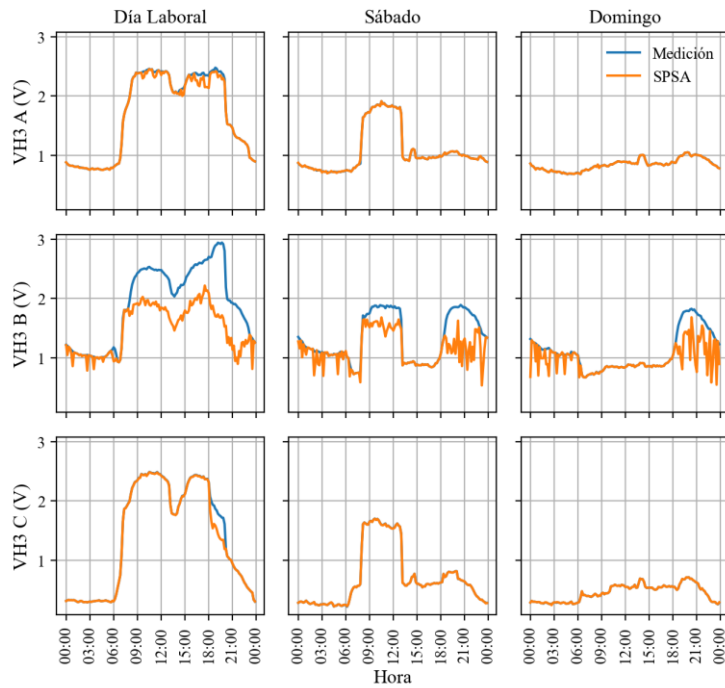


Figura 91. Ajuste del tercer armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.

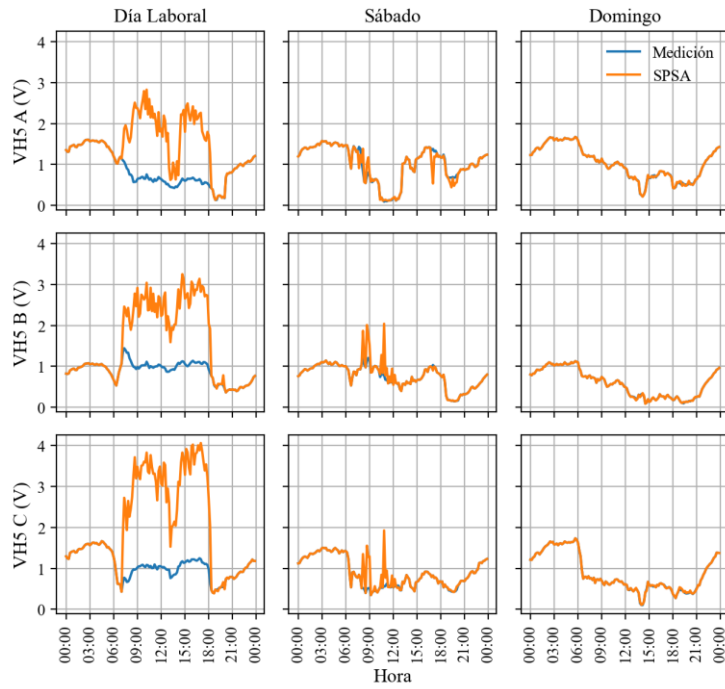


Figura 92. Ajuste del quinto armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.

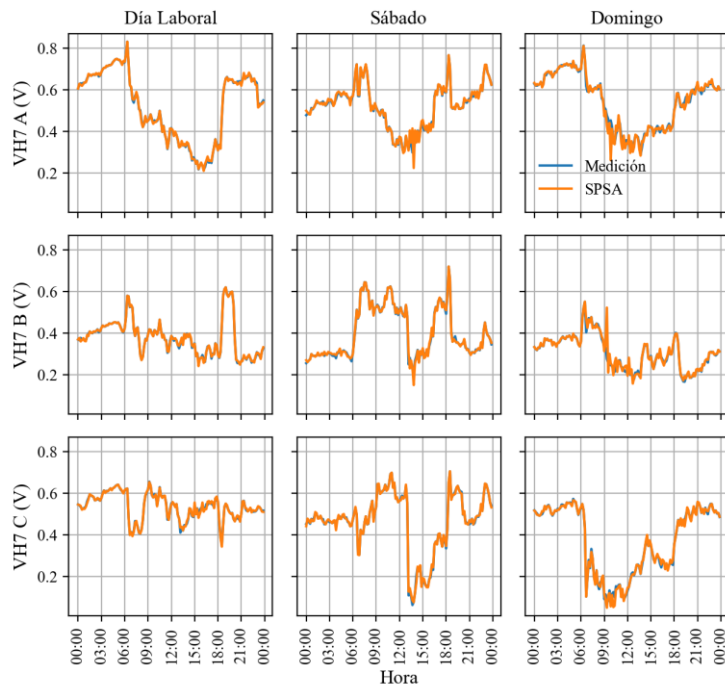


Figura 93. Ajuste del séptimo armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.

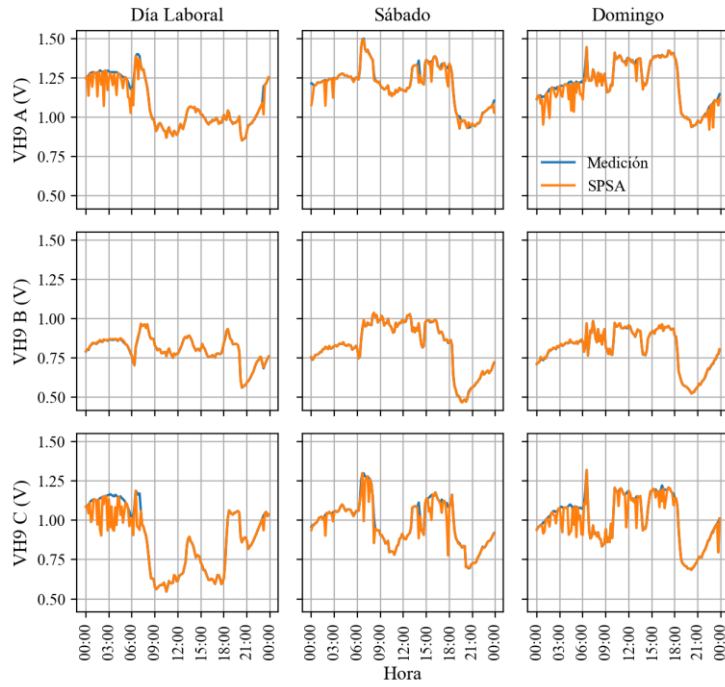


Figura 94. Ajuste del noveno armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.

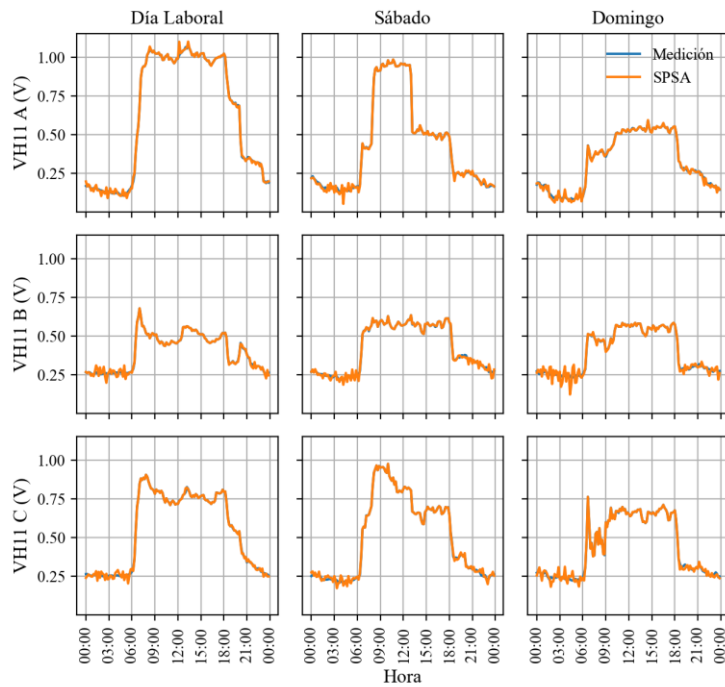


Figura 95. Ajuste del onceavo armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.

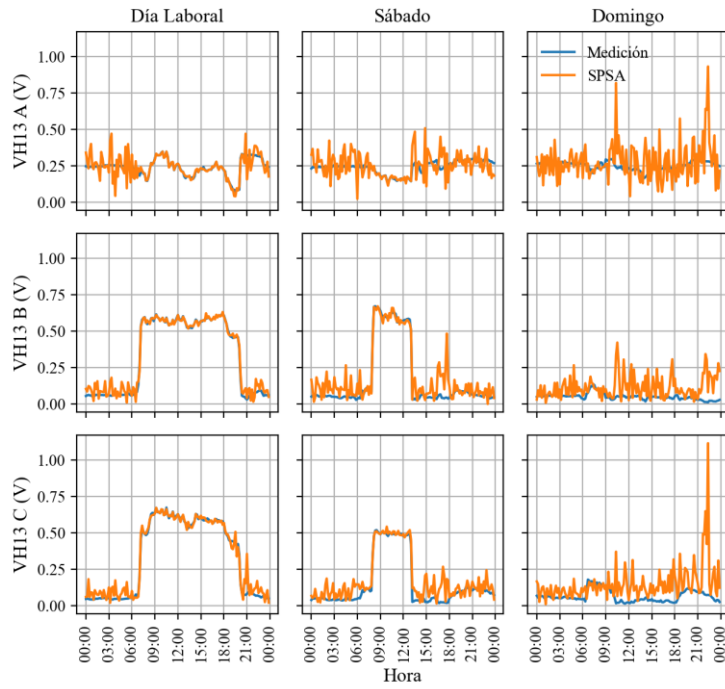


Figura 96. Ajuste del treceavo armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.

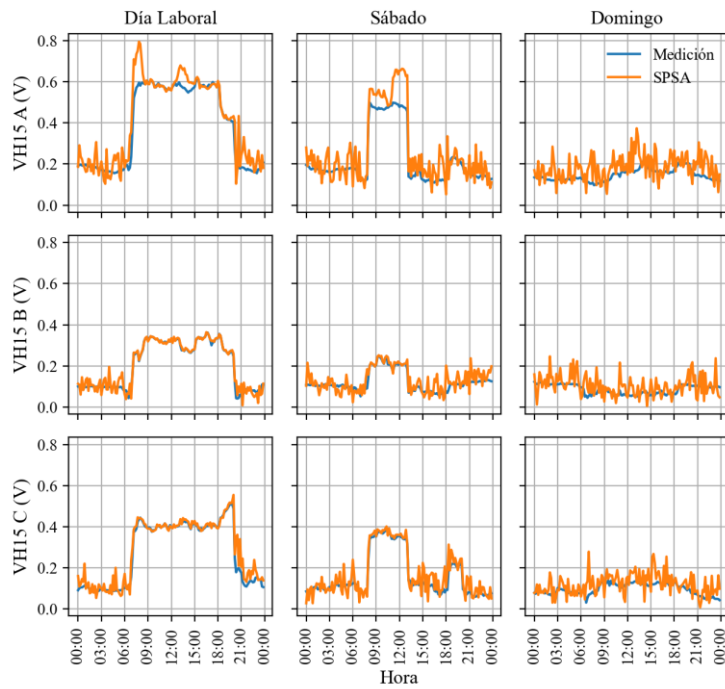


Figura 97. Ajuste del quinceavo armónico de voltaje en el PCC mediante SPSA.

Anexo H: Ajuste de armónicos de voltaje en el PCC mediante algoritmos genéticos.

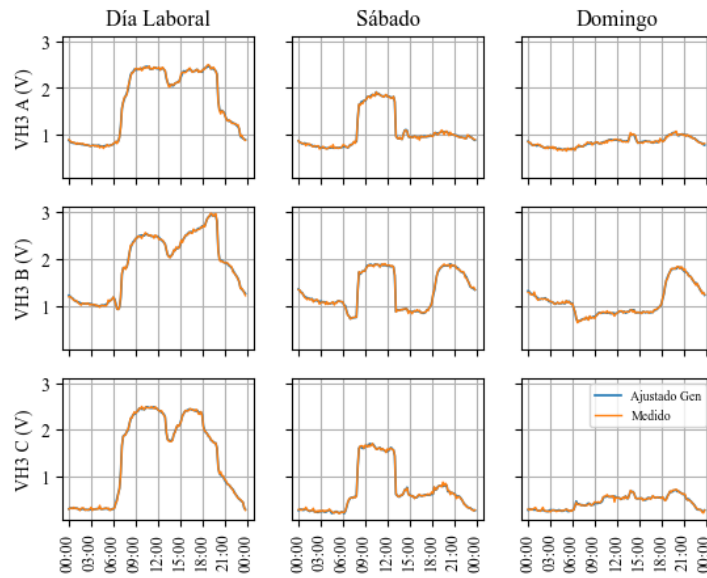


Figura 98. Magnitud de voltaje armónico de orden 3.



Figura 99. Magnitud de voltaje armónico de orden 5.

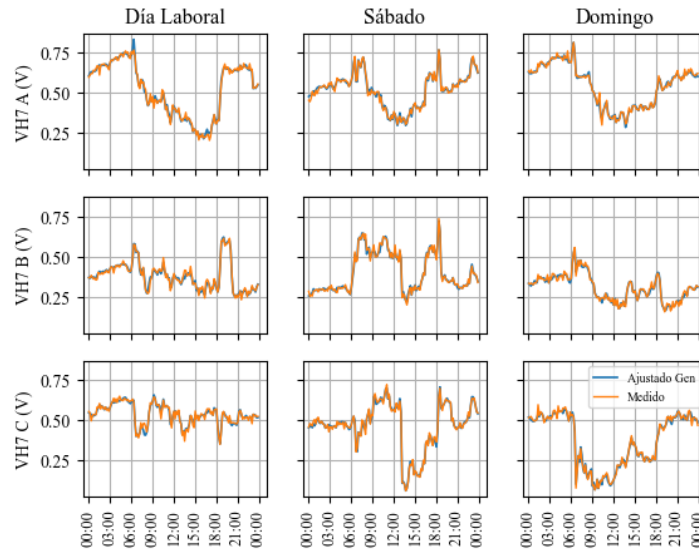


Figura 100. Magnitud de voltaje armónico de orden 7.

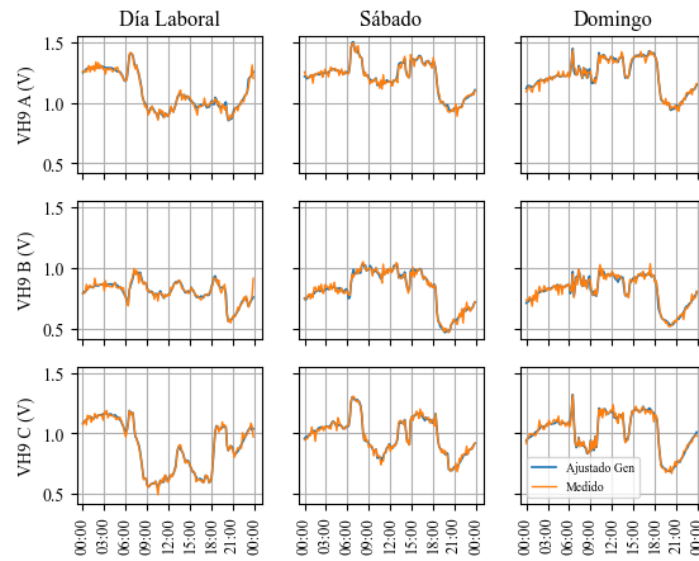


Figura 101. Magnitud de voltaje armónico de orden 9.

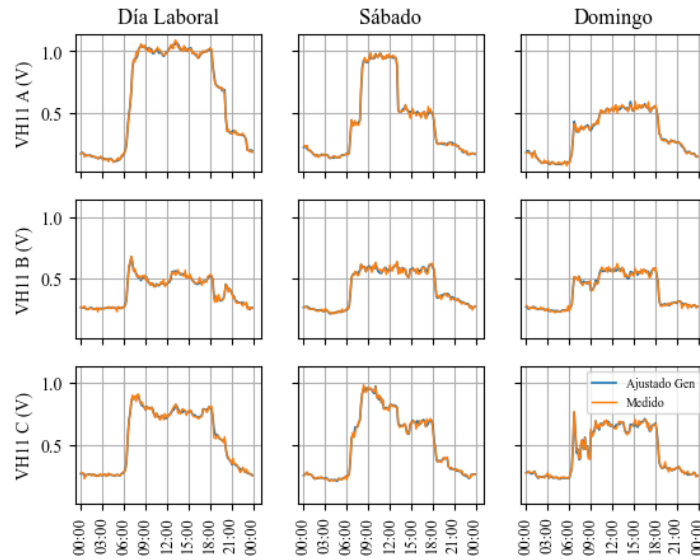


Figura 102. Magnitud de voltaje armónico de orden 11.

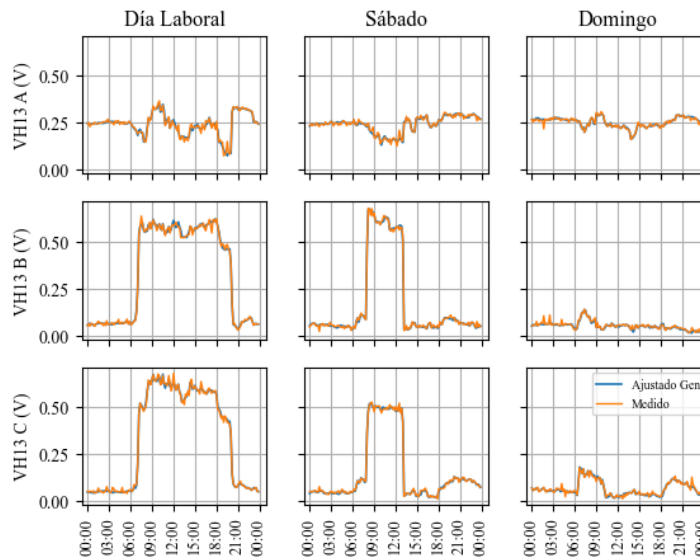


Figura 103. Magnitud de voltaje armónico de orden 13.

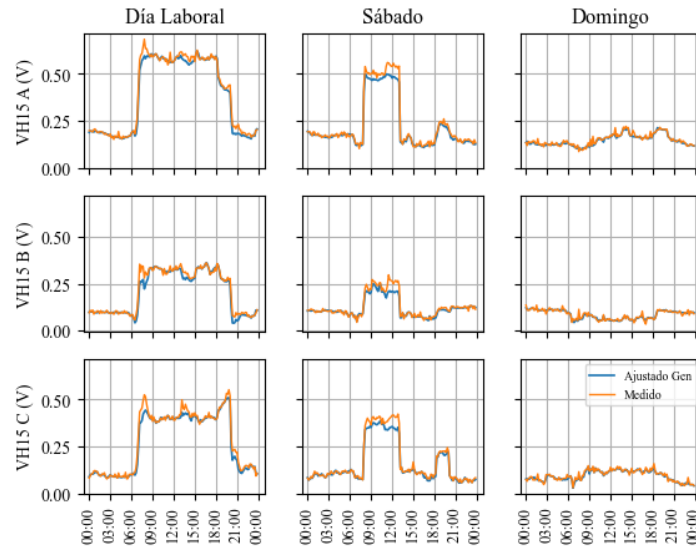


Figura 104. Magnitud de voltaje armónico de orden 15.

Anexo I: Armónicos de corriente generados por el SFV.

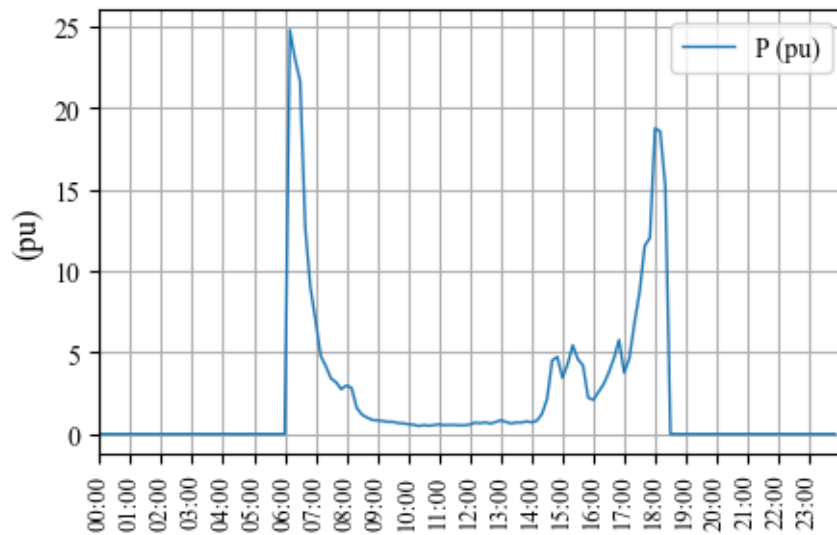


Figura 105. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 3.

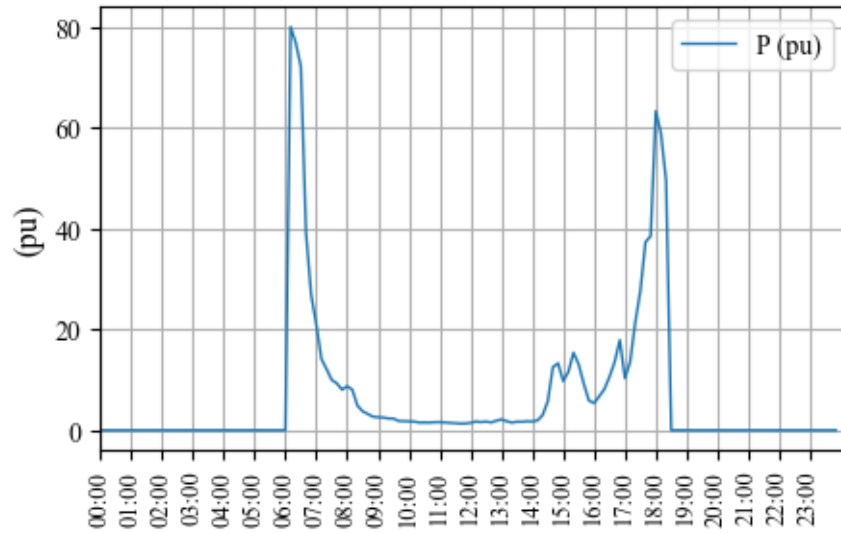


Figura 106. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 5.

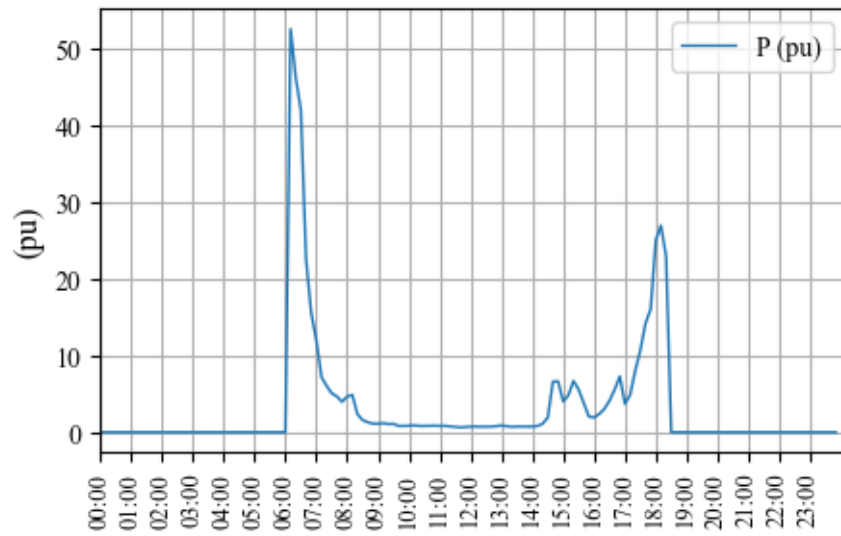


Figura 107 . Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 7.

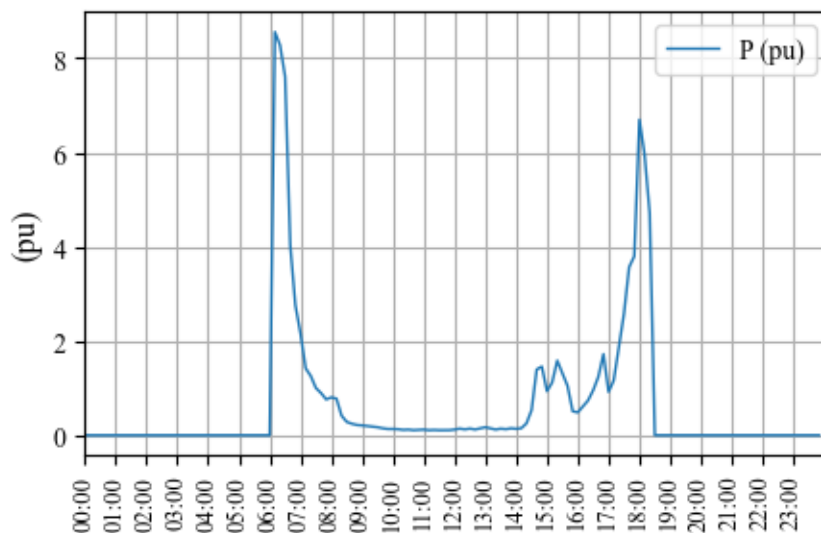


Figura 108. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 9.

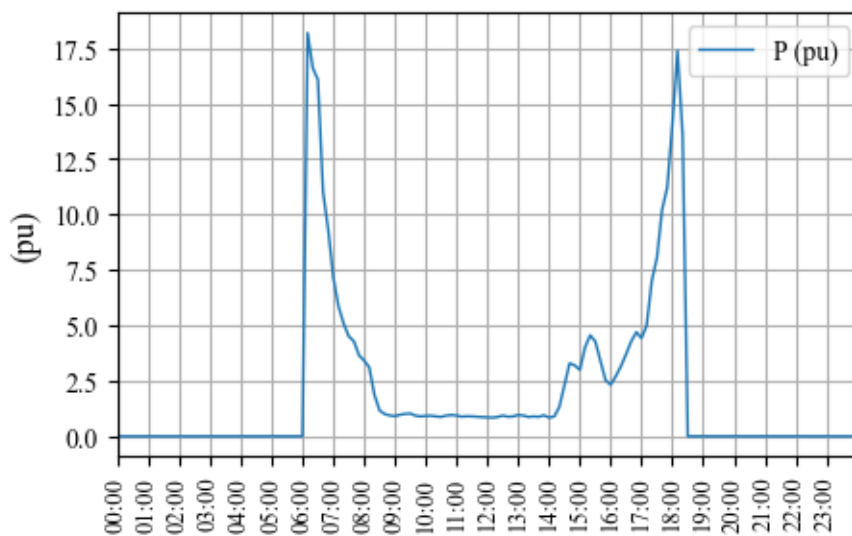


Figura 109. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 11.

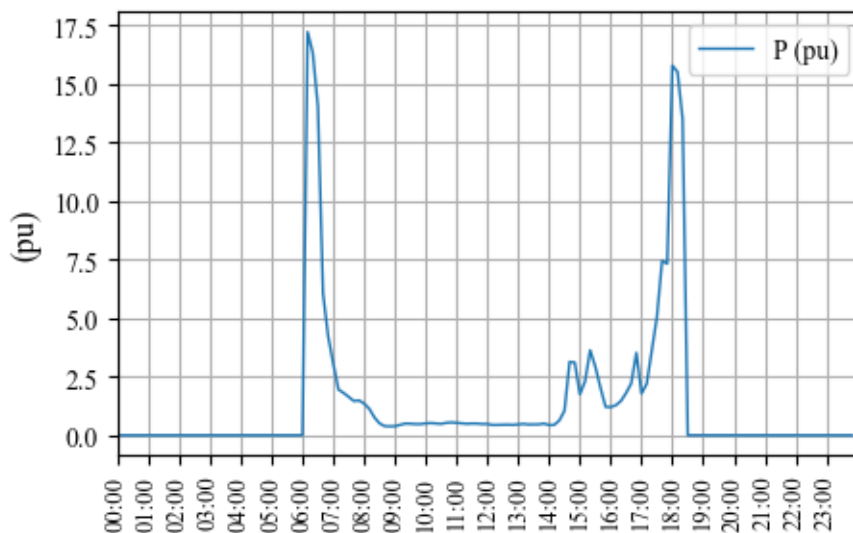


Figura 110. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 13.

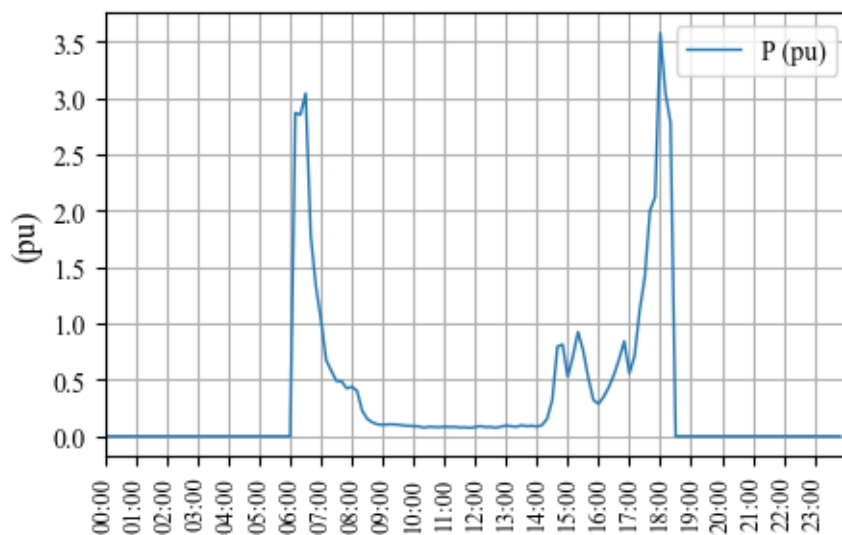


Figura 111. Magnitud de corriente armónica generada por el SFV de orden 15.

Anexo J: Armónicos de voltaje y corriente en el PCC con la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo SPSA.

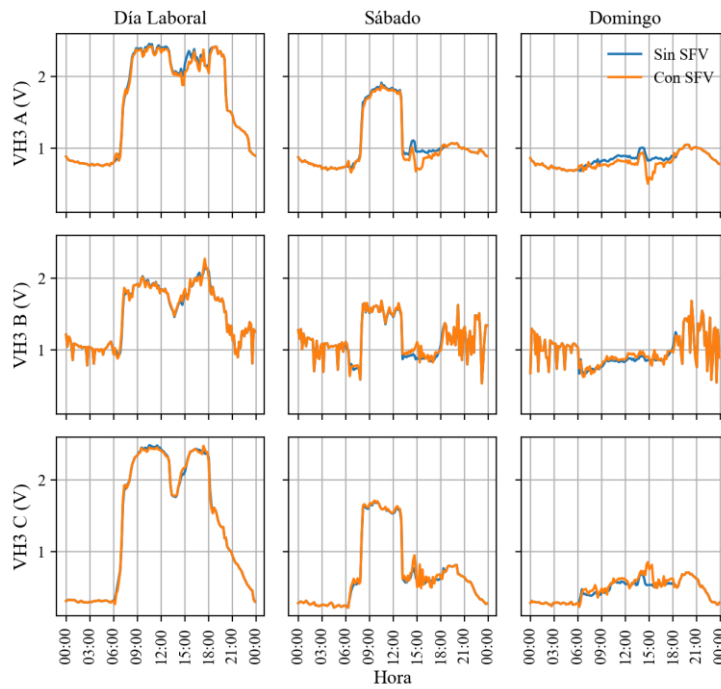


Figura 112. Tercer armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

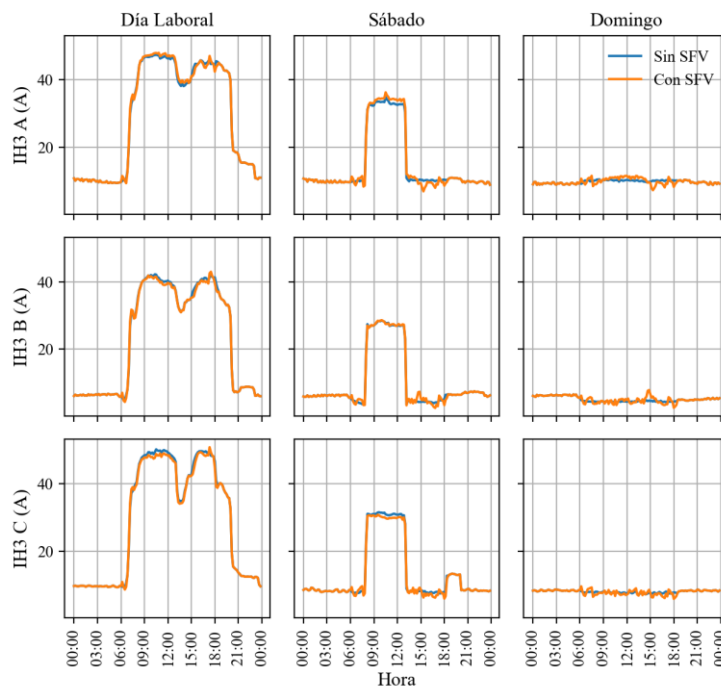


Figura 113. Tercer armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

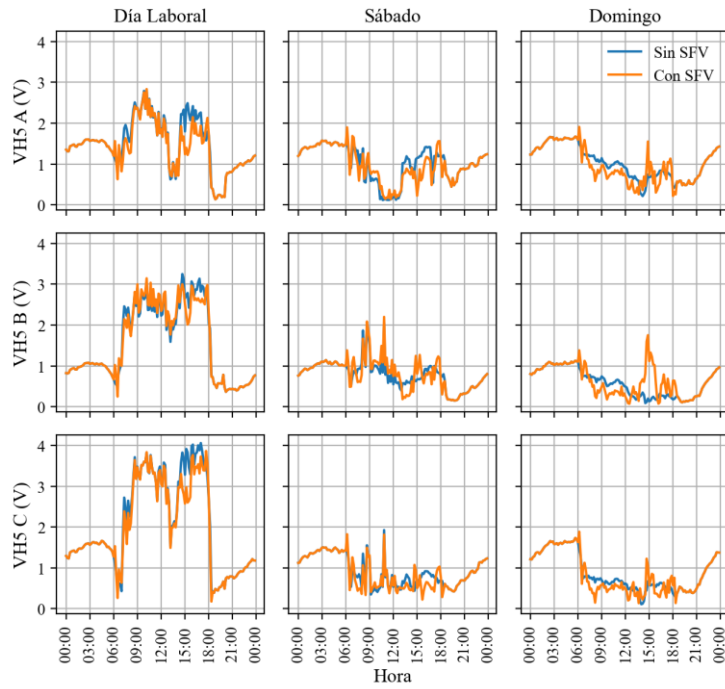


Figura 114. Quinto armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

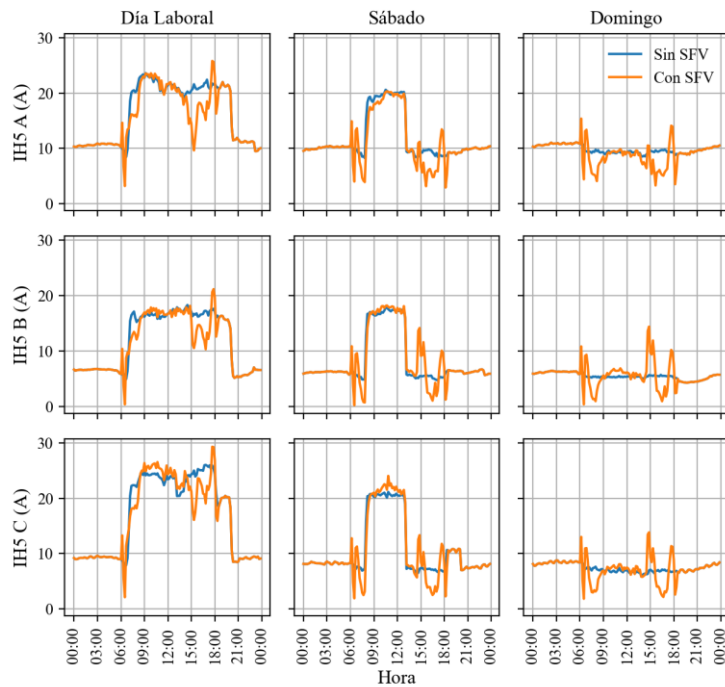


Figura 115. Quinto armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

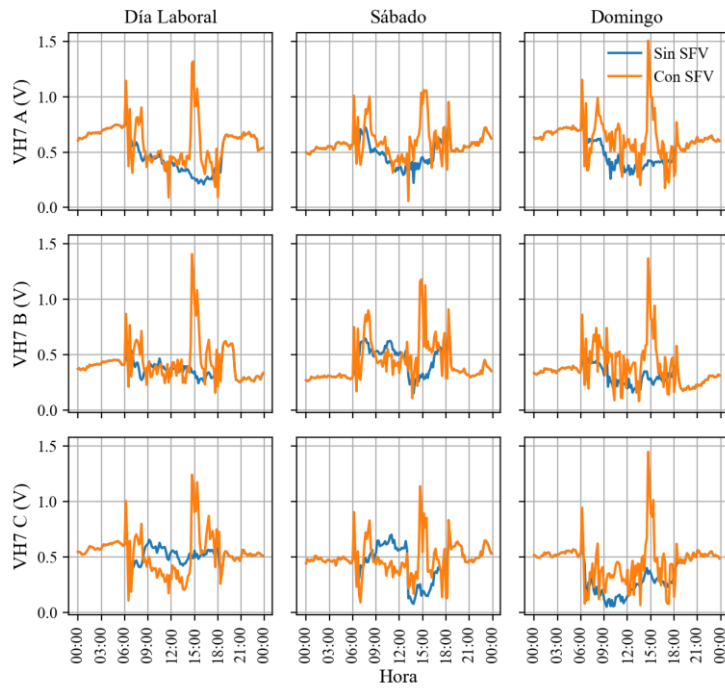


Figura 116. Séptimo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

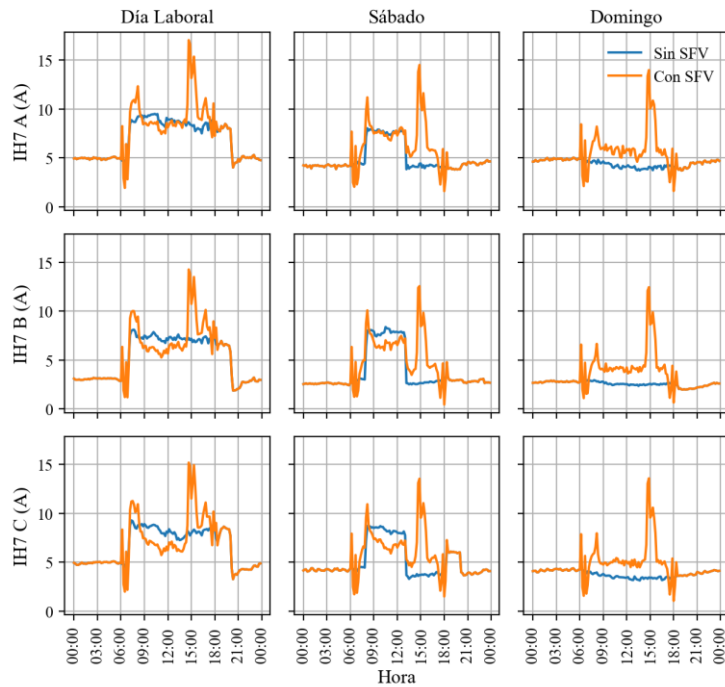


Figura 117. Séptimo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

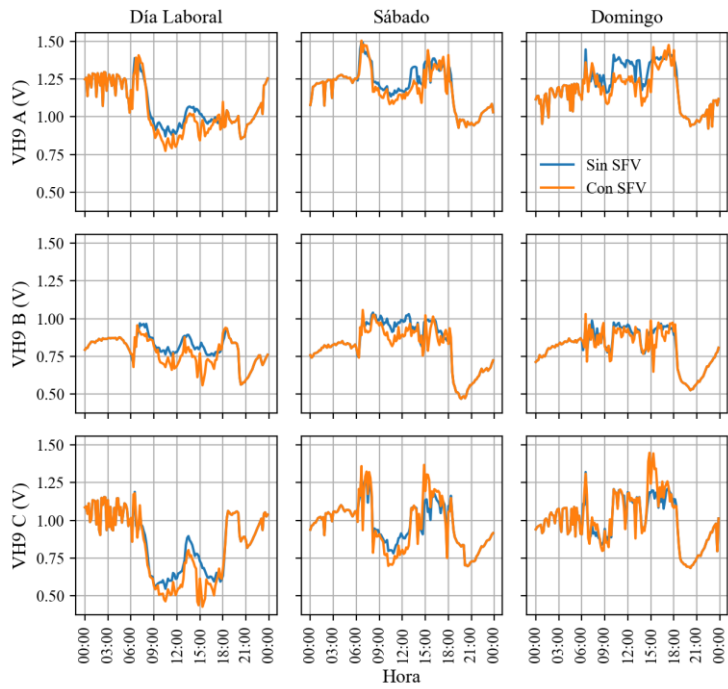


Figura 118. Noveno armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

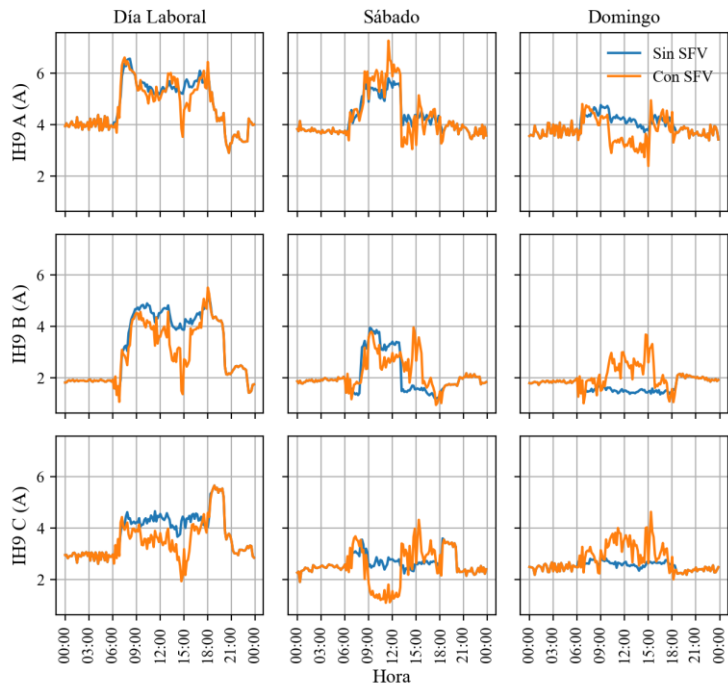


Figura 119. Noveno armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

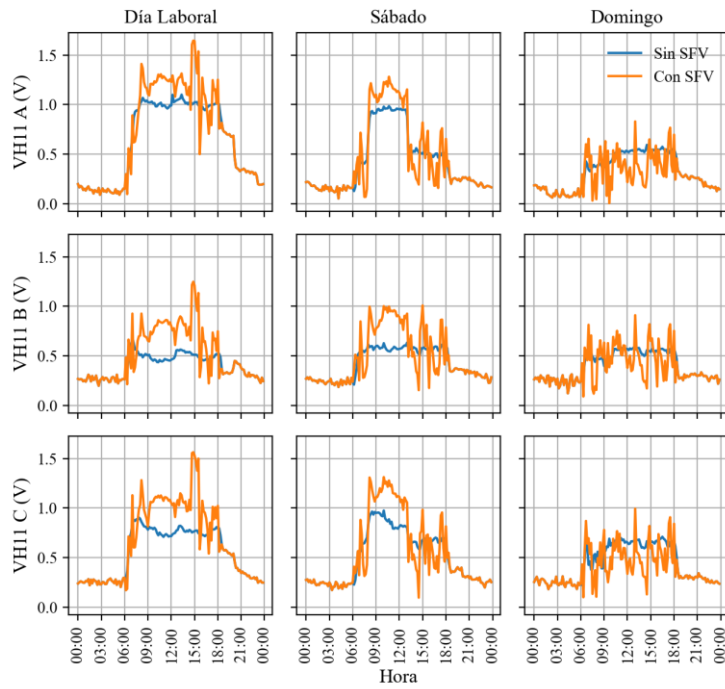


Figura 120. Onceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

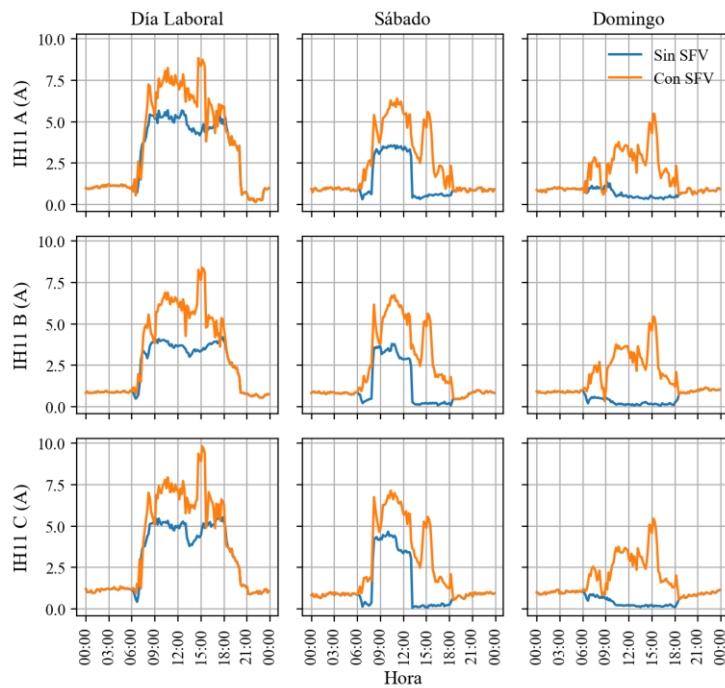


Figura 121. Onceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

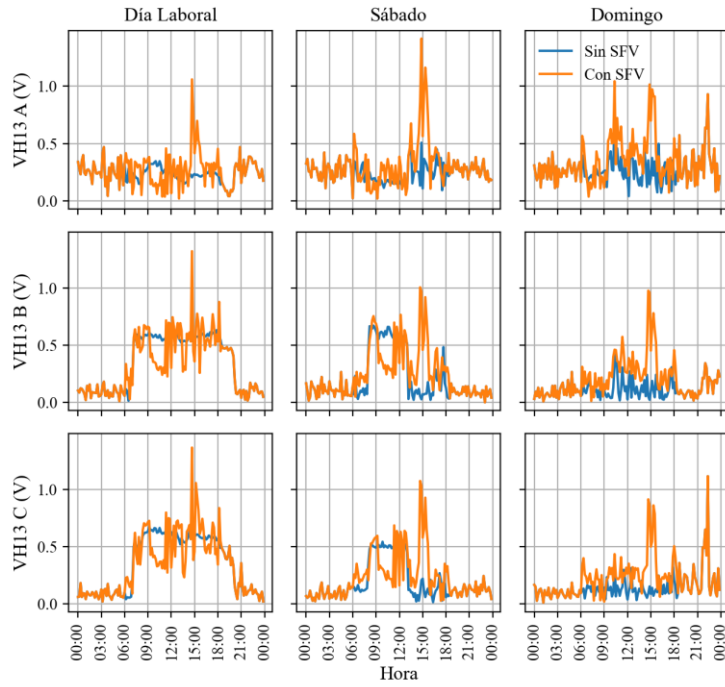


Figura 122. Treceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

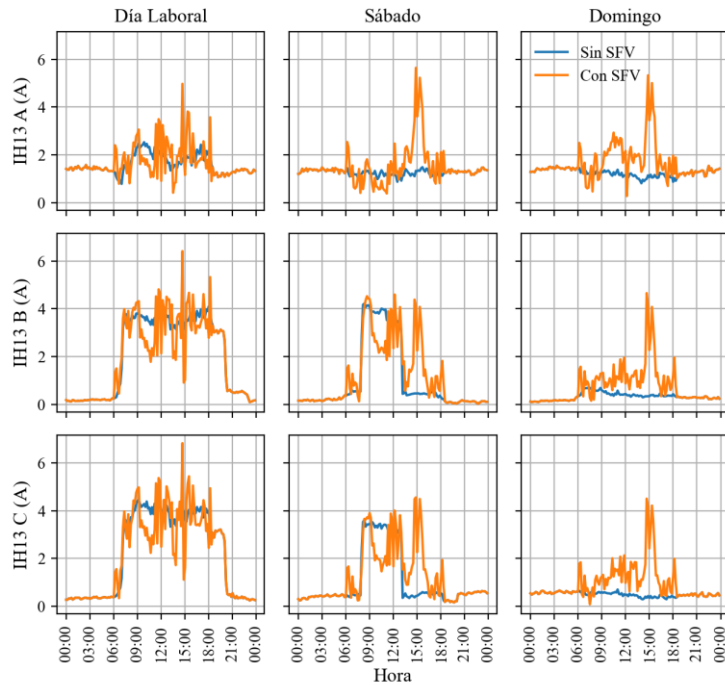


Figura 123. Treceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

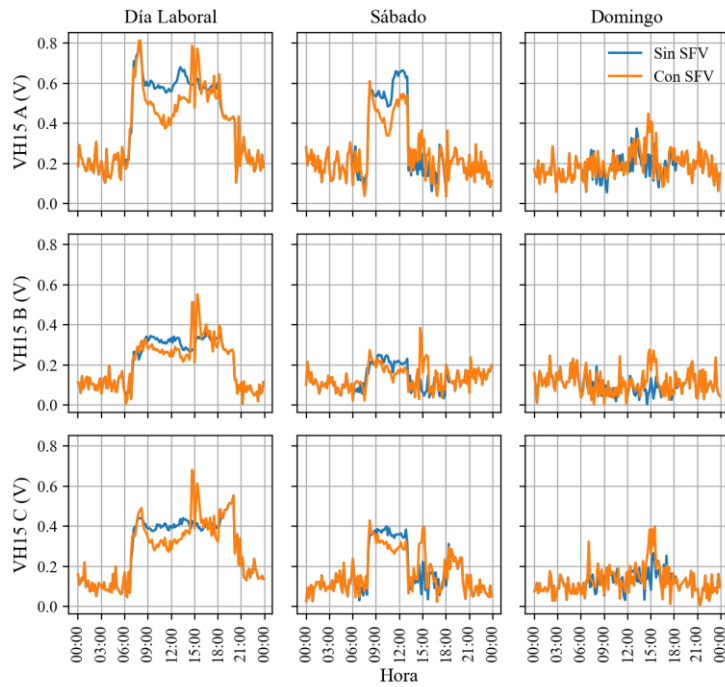


Figura 124. Quinceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

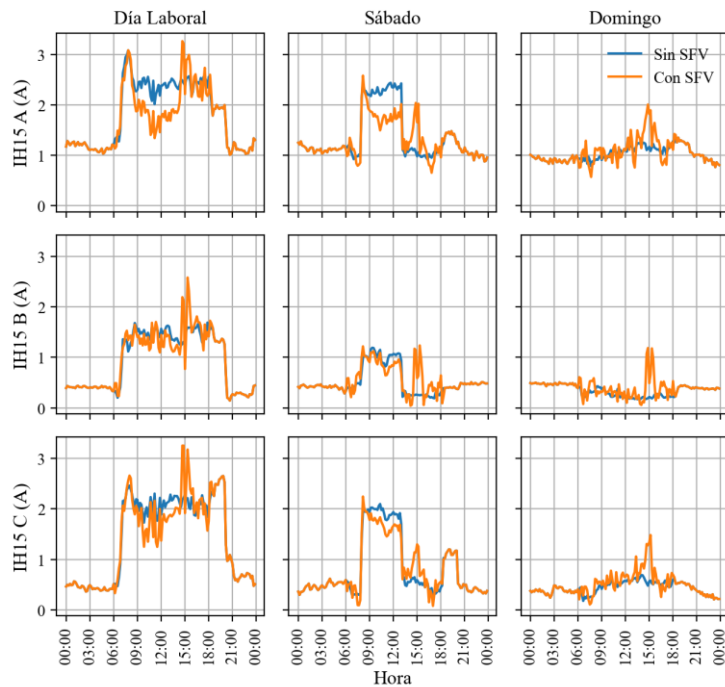


Figura 125. Quinceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo SPSA.

Anexo K: Armónicos de voltaje y corriente en el PCC con la conexión del SFV – modelo calibrado con algoritmo genético.

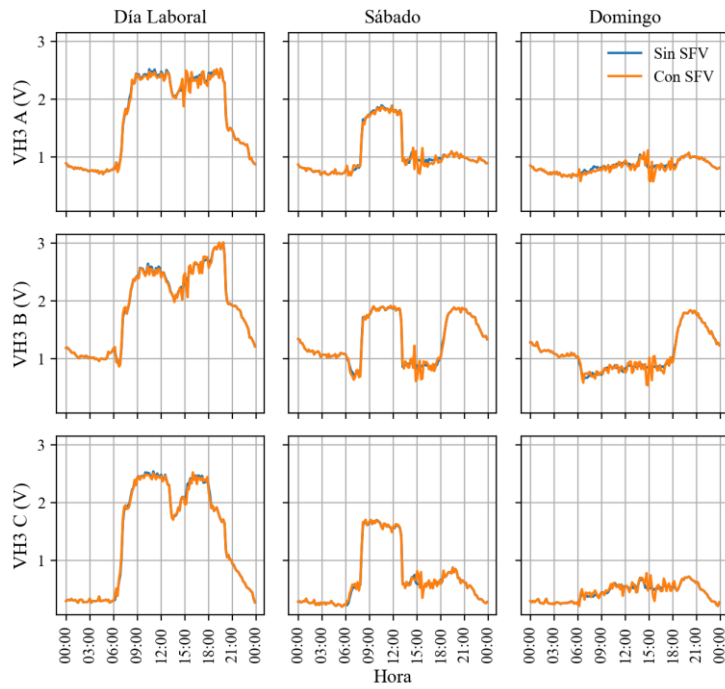


Figura 126. Tercer armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

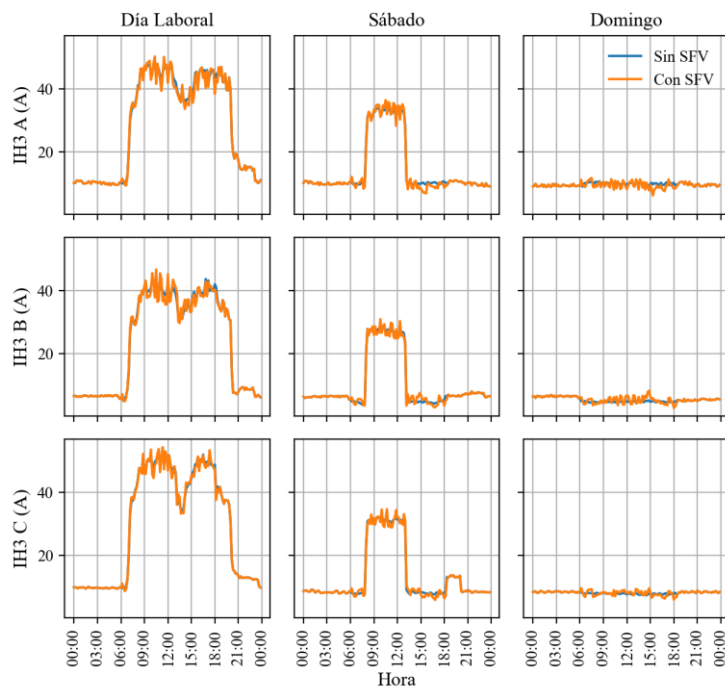


Figura 127. Tercer armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

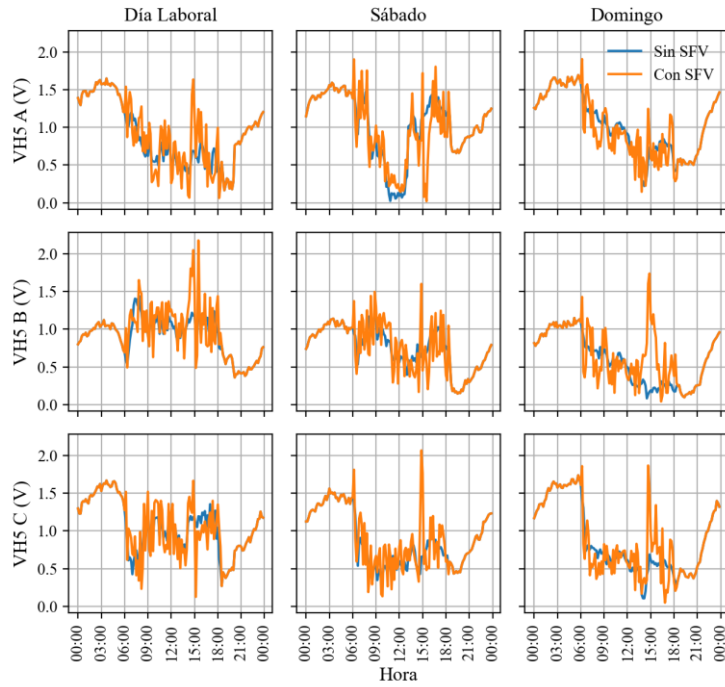


Figura 128. Quinto armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

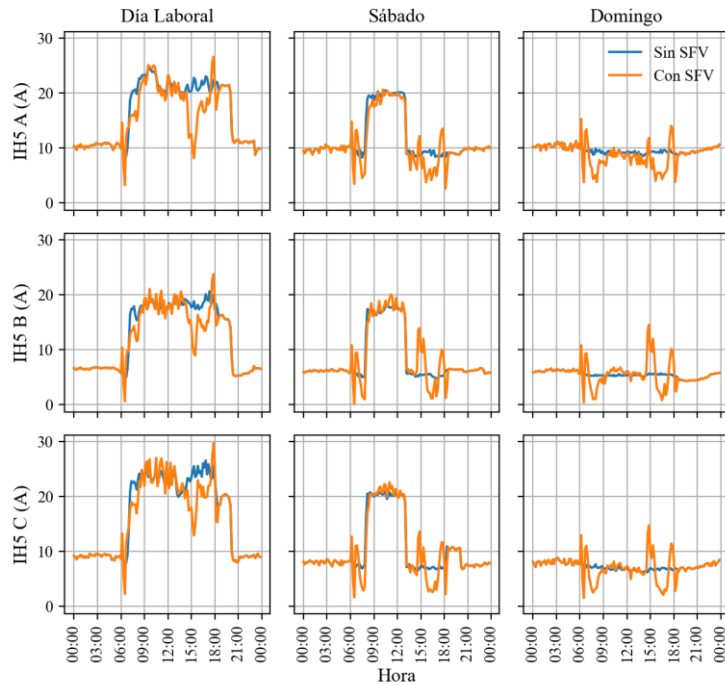


Figura 129. Quinto armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

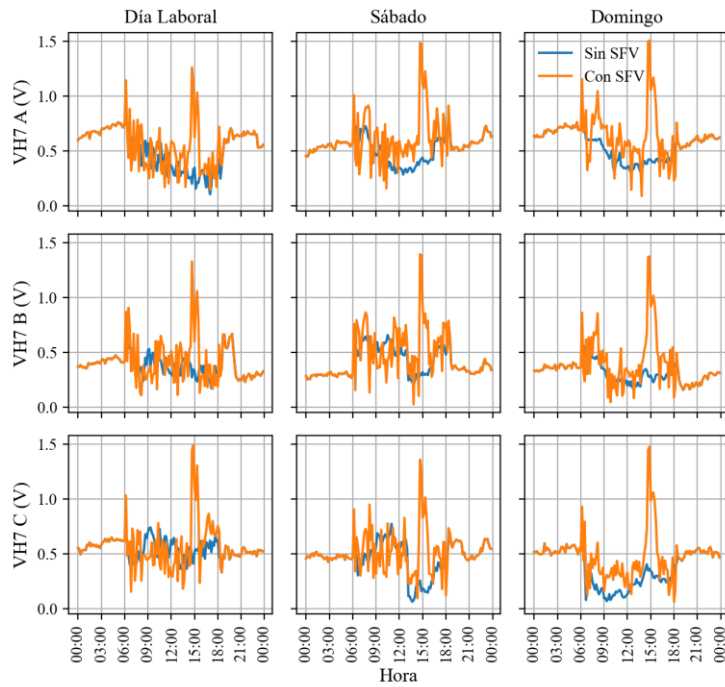


Figura 130. Séptimo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

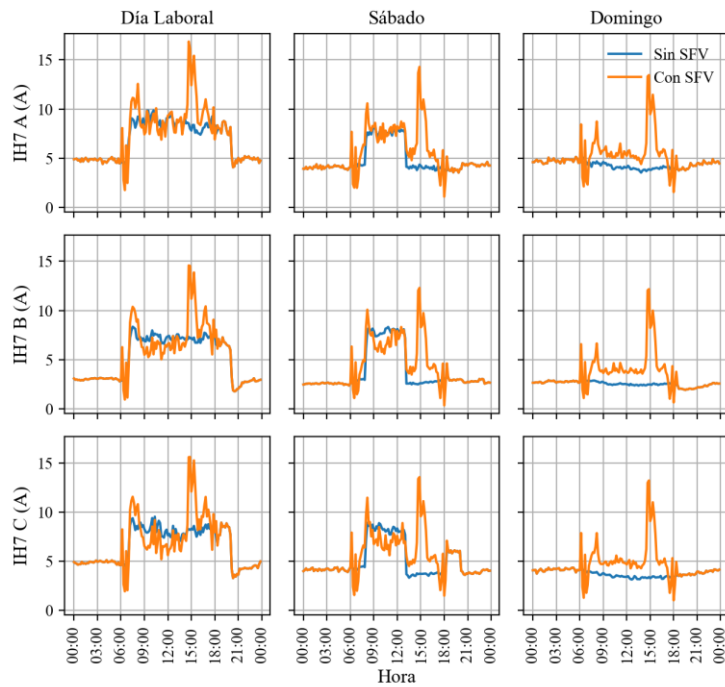


Figura 131. Séptimo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

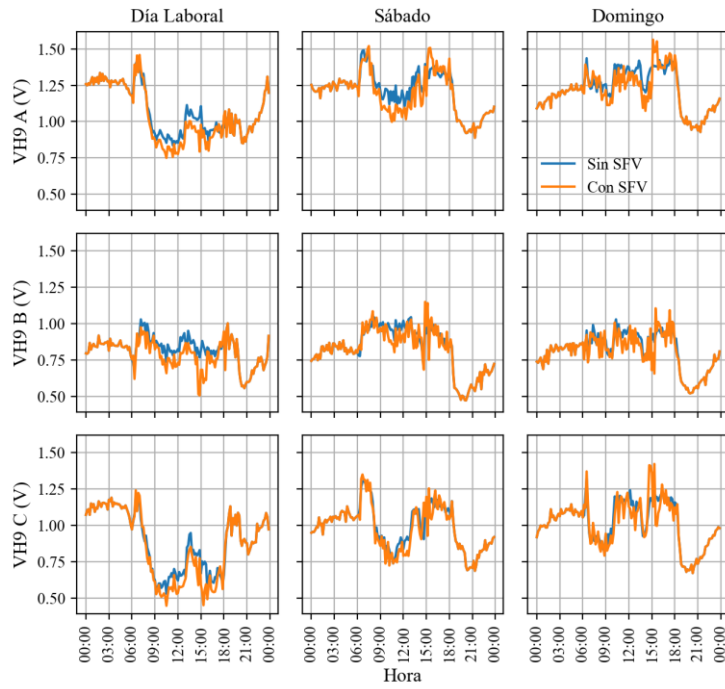


Figura 132. Noveno armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

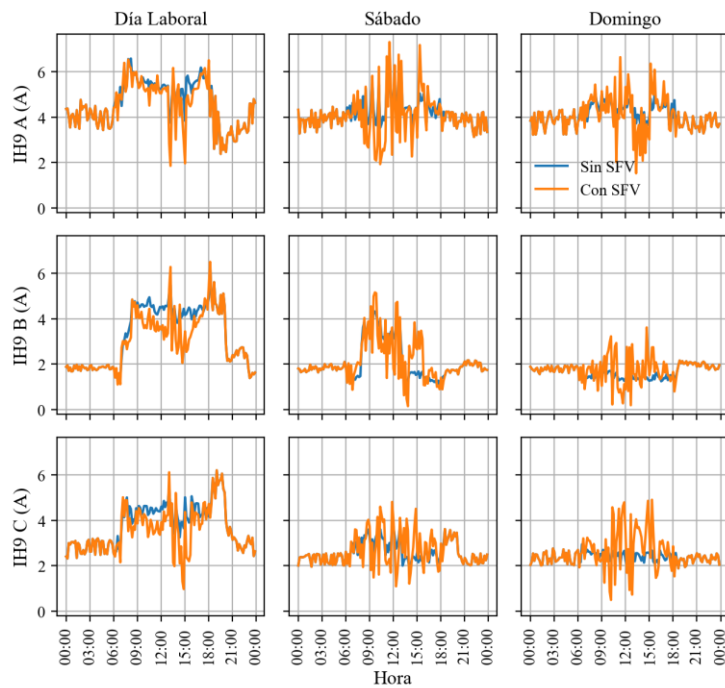


Figura 133. Noveno armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

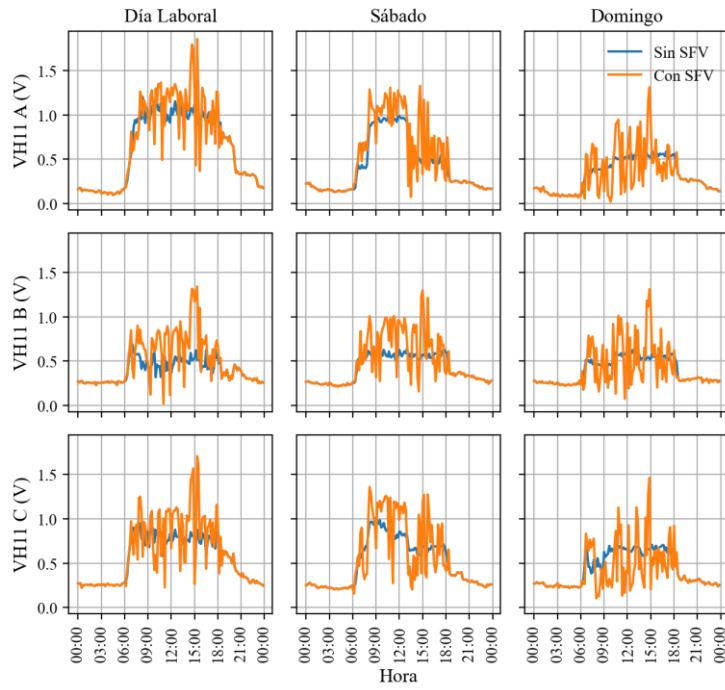


Figura 134. Onceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

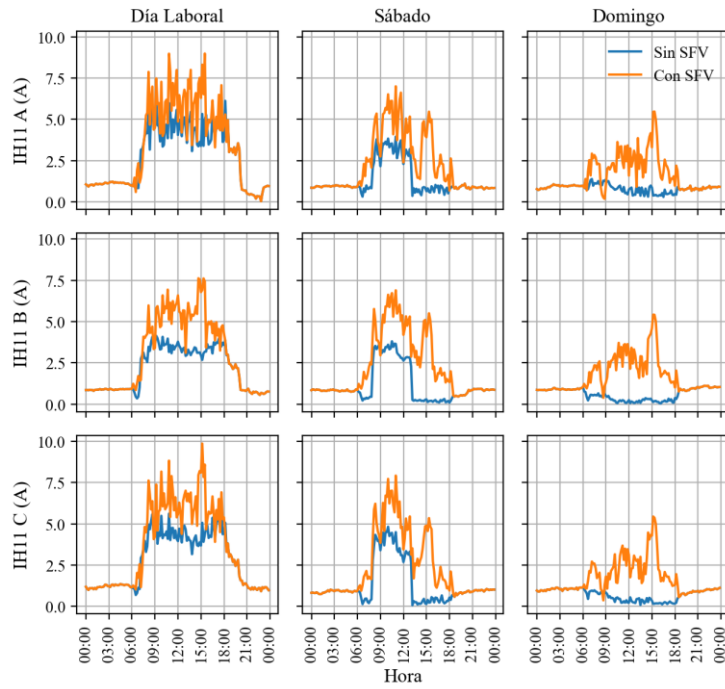


Figura 135. Onceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

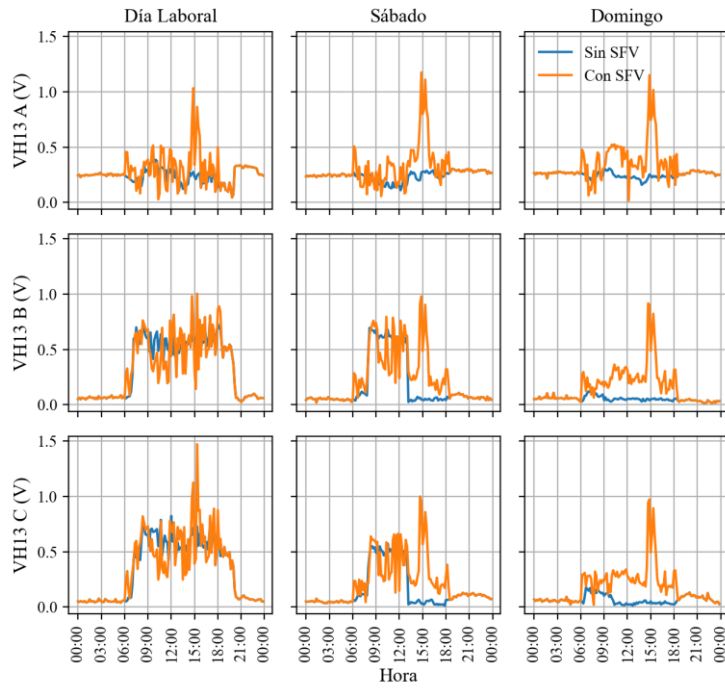


Figura 136. Treceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

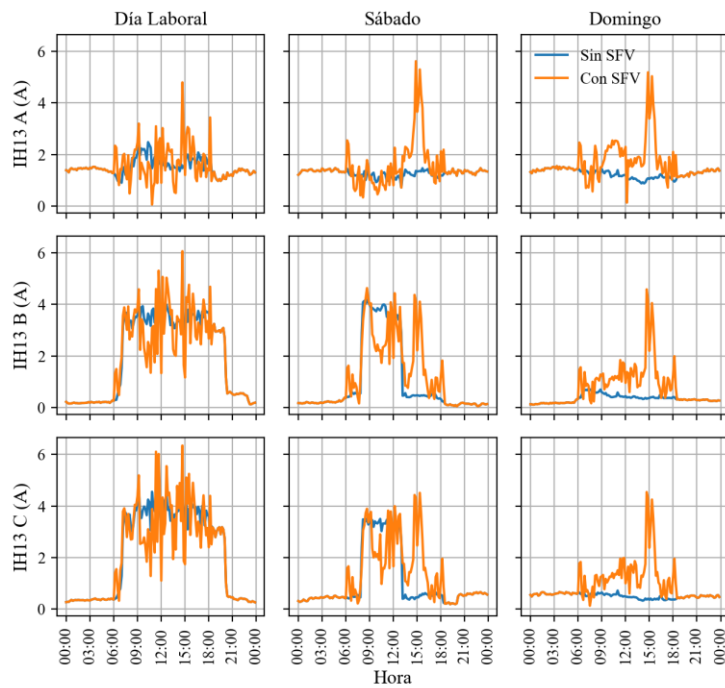


Figura 137. Treceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

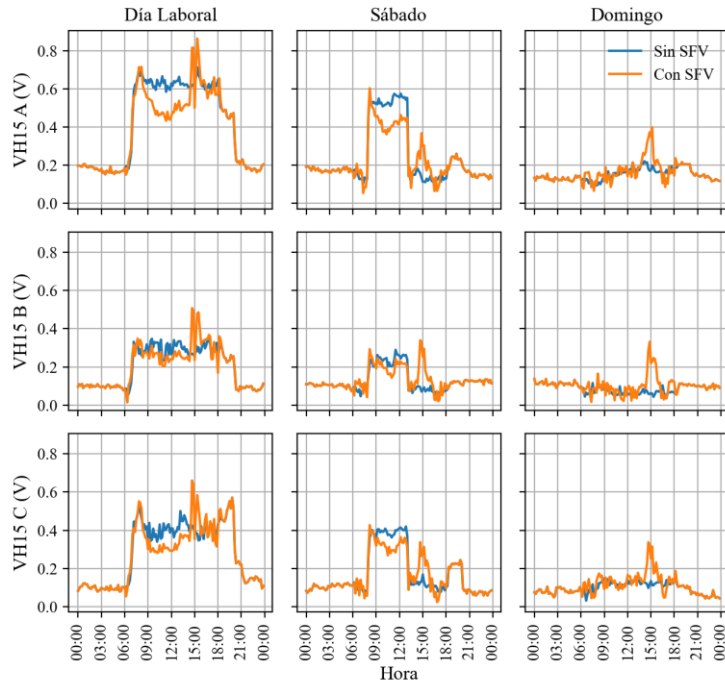


Figura 138. Quinceavo armónico de voltaje en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

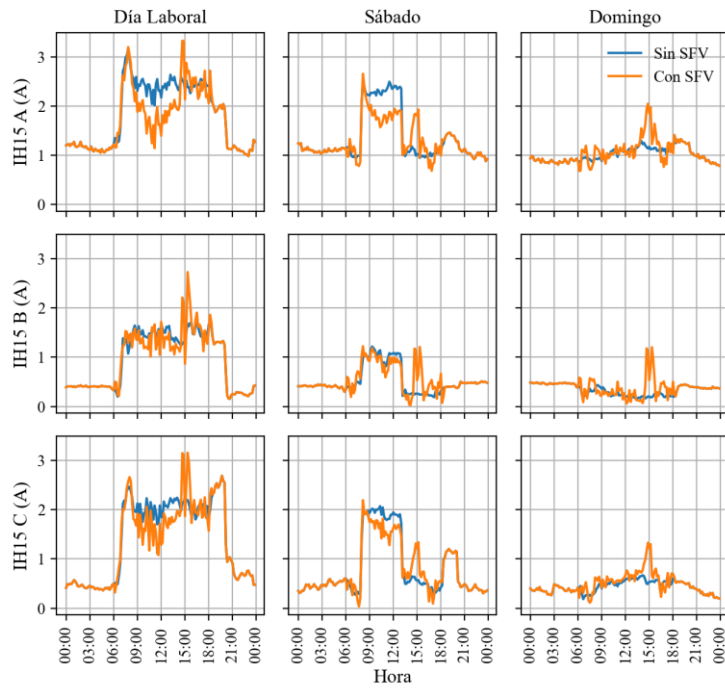


Figura 139. Quinceavo armónico de corriente en el PCC con la conexión del SFV - modelo calibrado con algoritmo genético.

Anexo L: Armónicos de voltaje y corriente en el lado de medio voltaje.

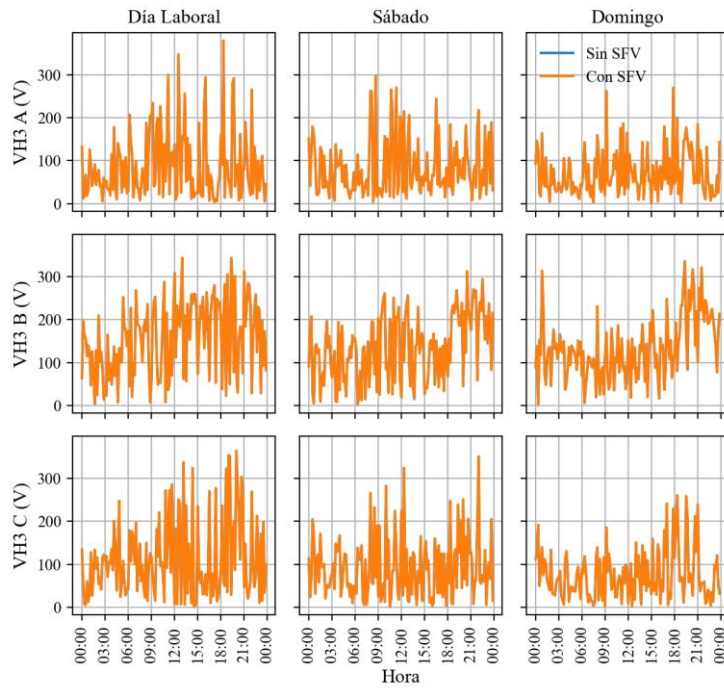


Figura 140. Tercer armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.

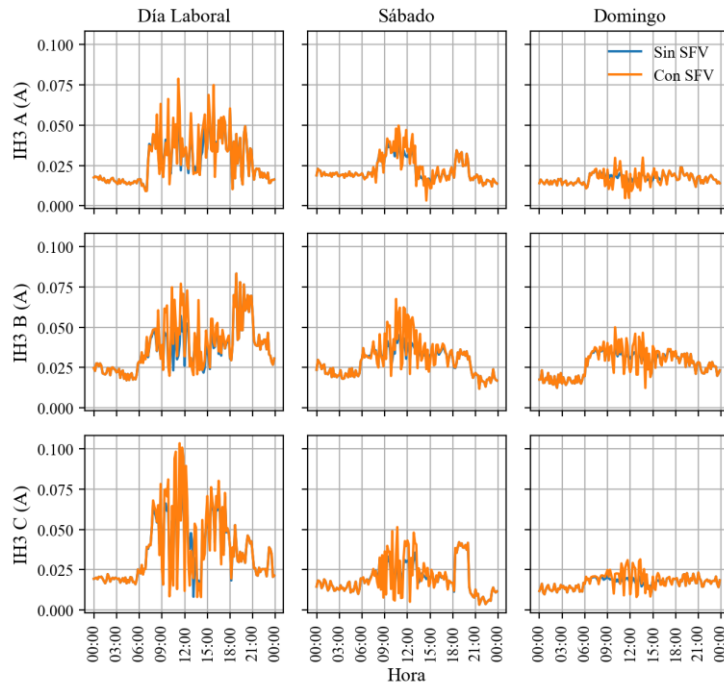


Figura 141. Tercer armónico de corriente en el lado de medio voltaje.

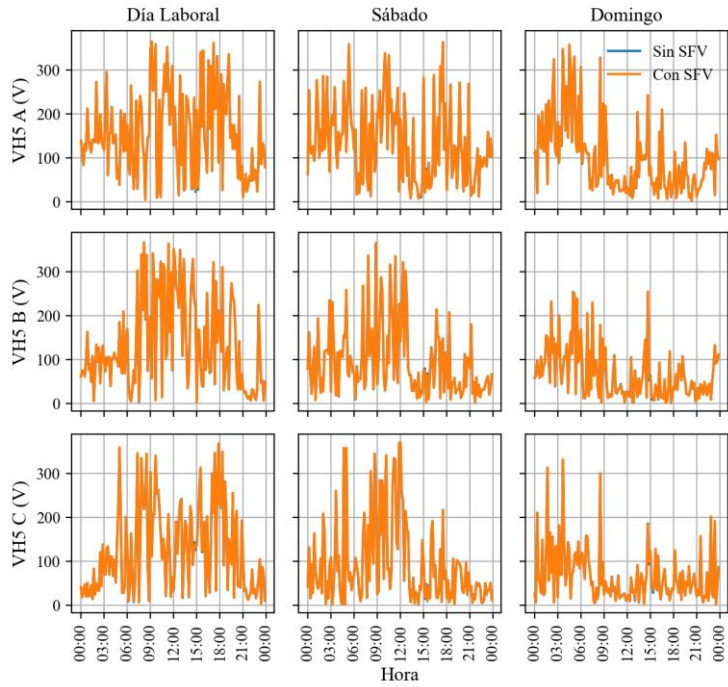


Figura 142. Quinto armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.

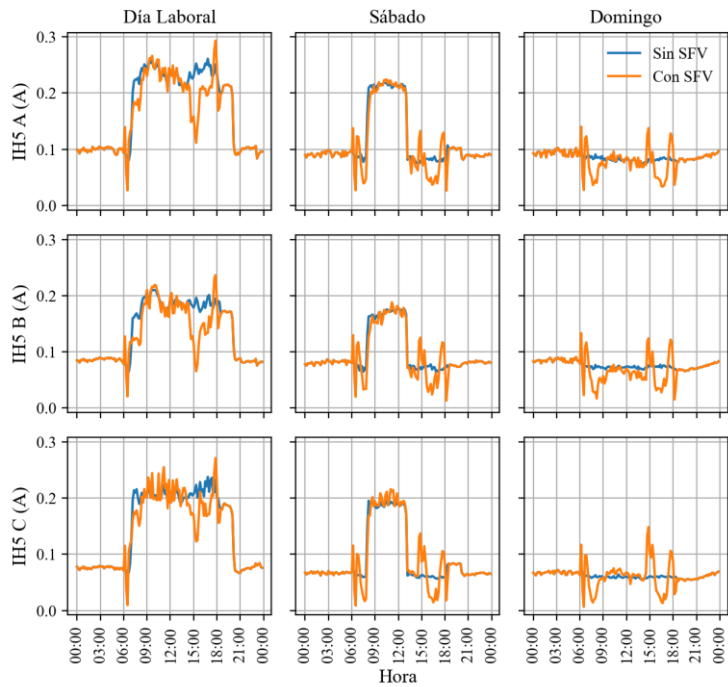


Figura 143. Quinto armónico de corriente en el lado de medio voltaje.

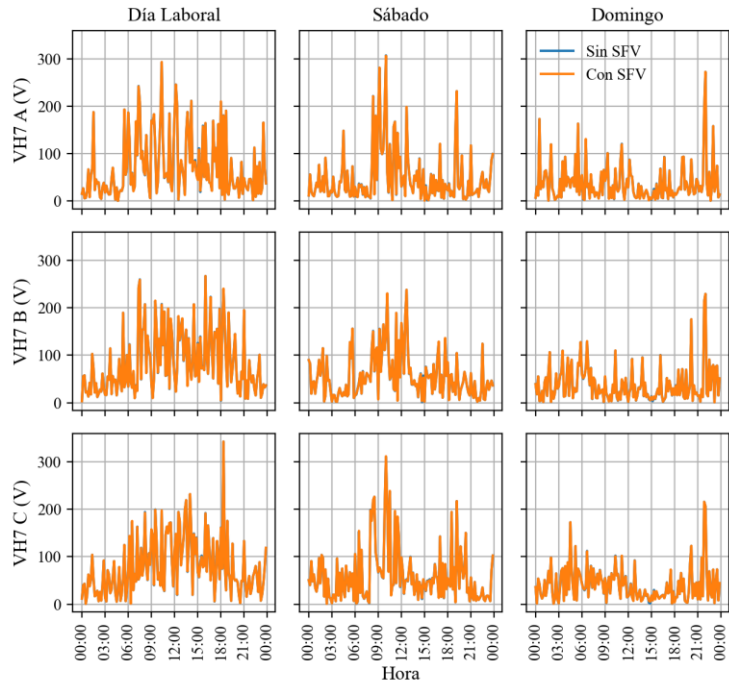


Figura 144. Séptimo armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.

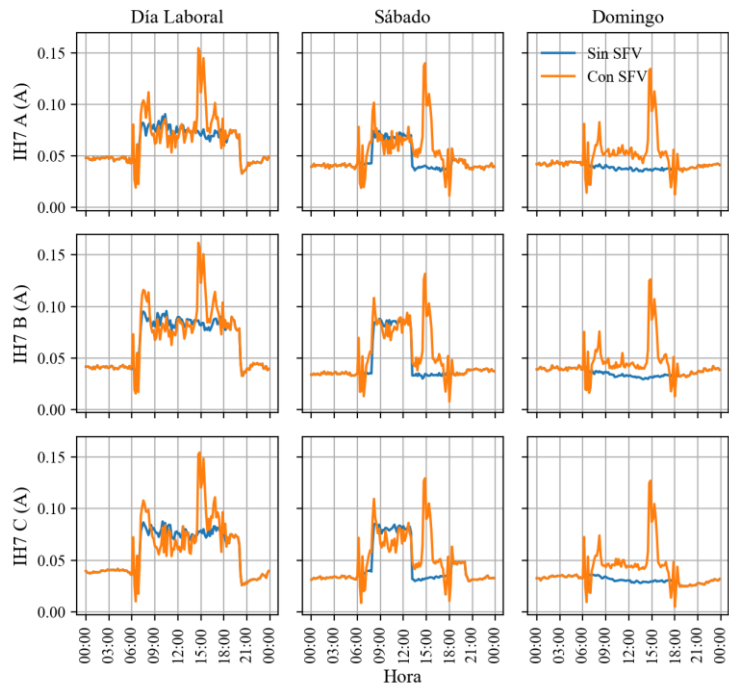


Figura 145. Séptimo armónico de corriente en el lado de medio voltaje.

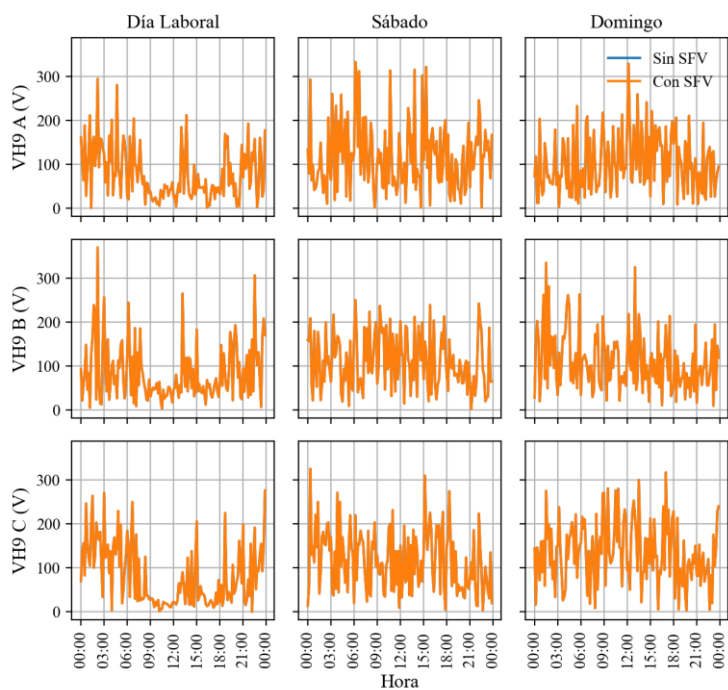


Figura 146. Noveno armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.

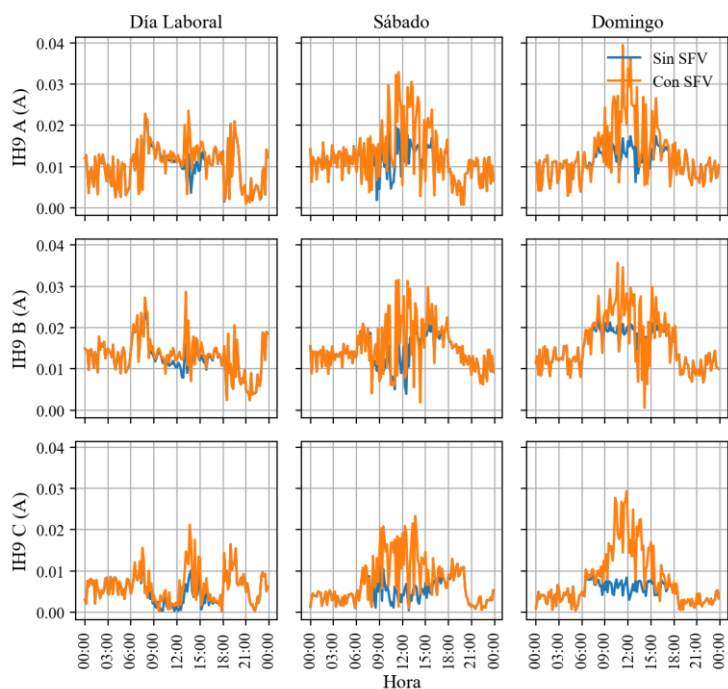


Figura 147. Noveno armónico de corriente en el lado de medio voltaje.

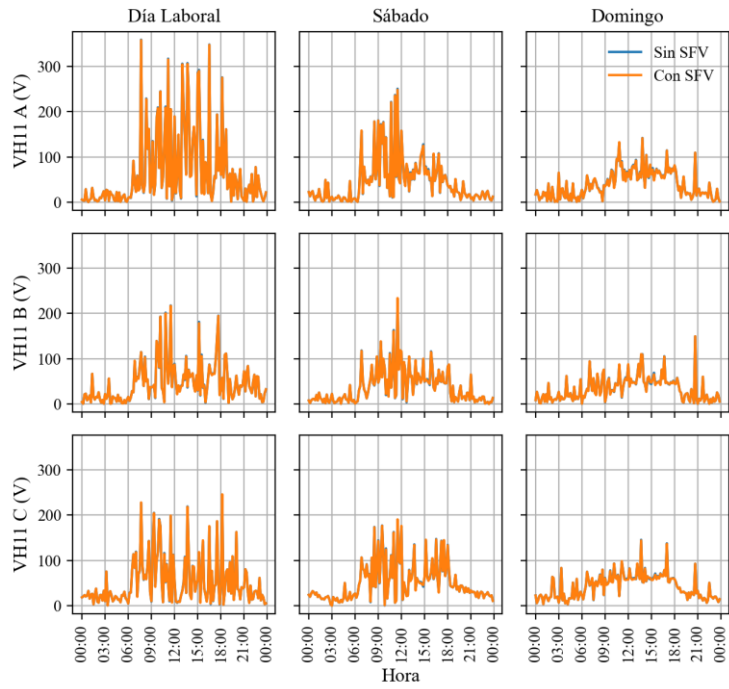


Figura 148. Onceavo armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.

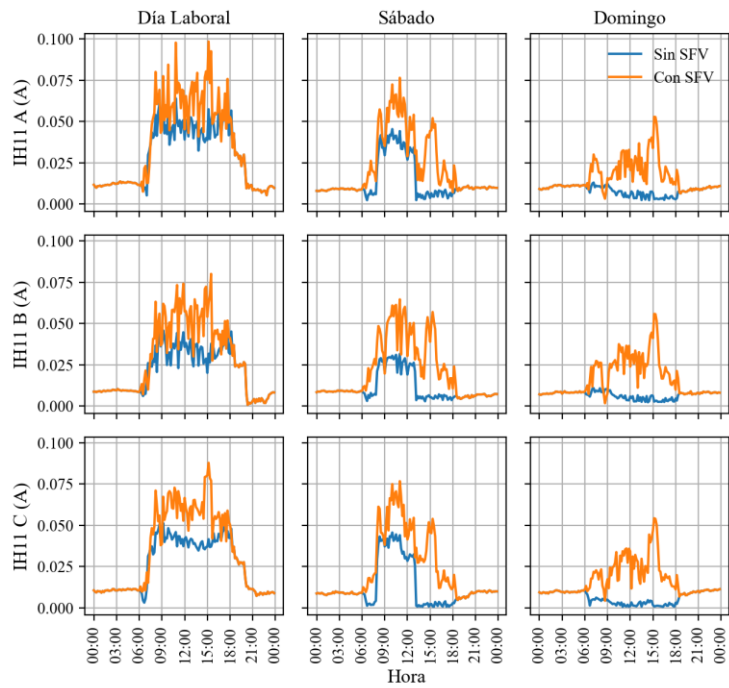


Figura 149. Onceavo armónico de corriente en el lado de medio voltaje.

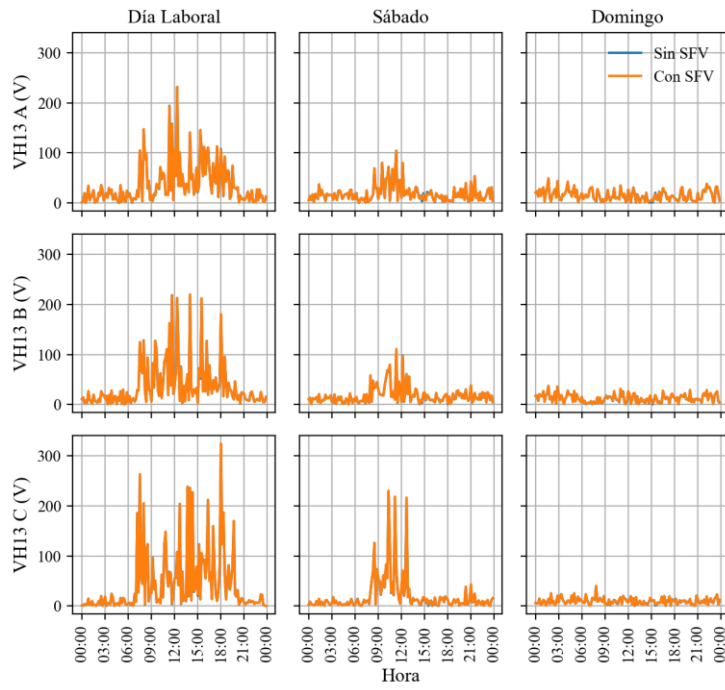


Figura 150. Treceavo armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.

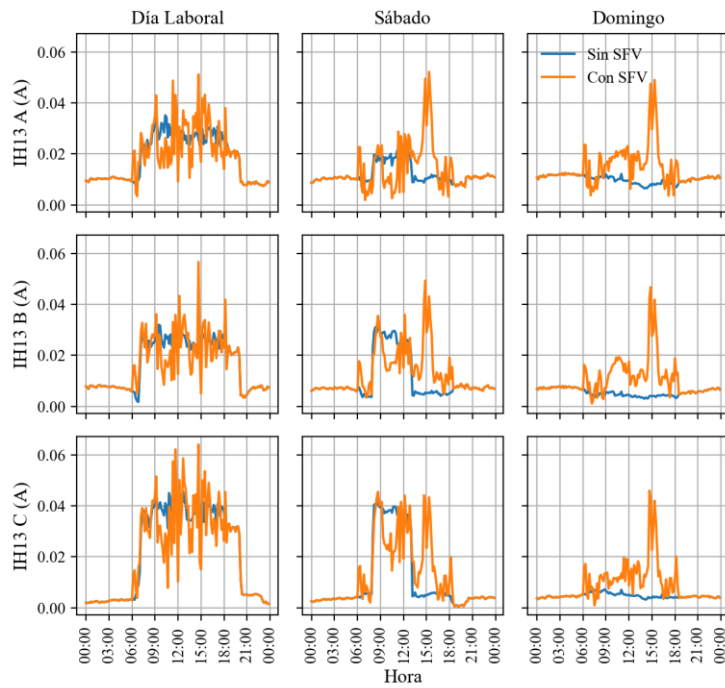


Figura 151. Treceavo armónico de corriente en el lado de medio voltaje.

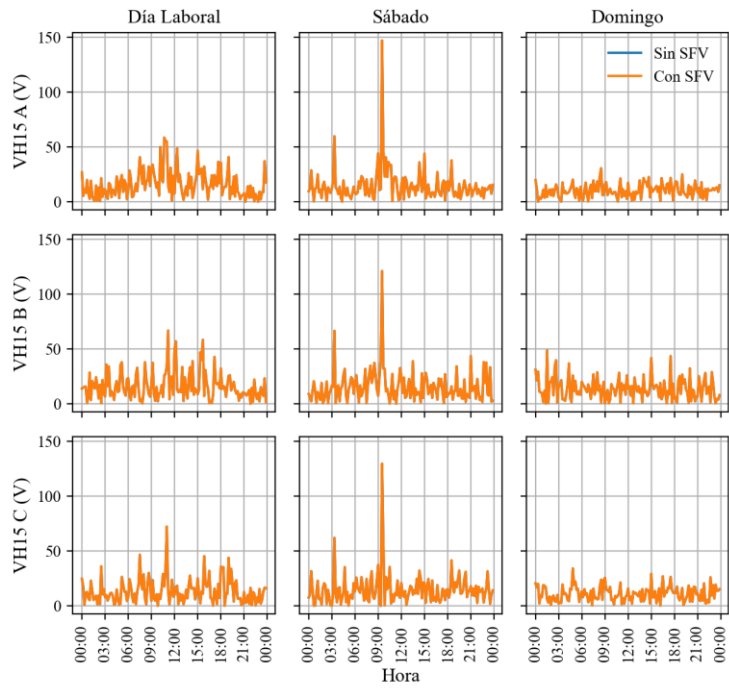


Figura 152. Quinceavo armónico de voltaje en el lado de medio voltaje.

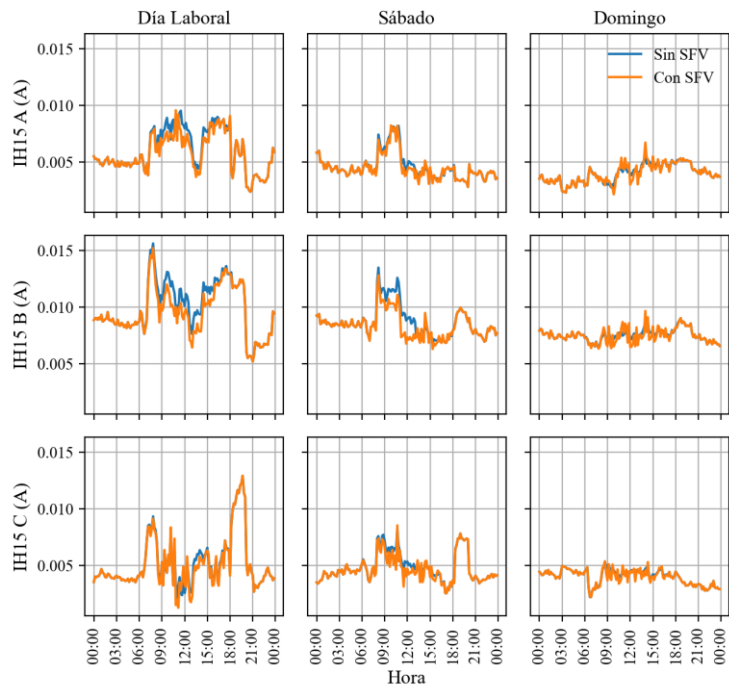


Figura 153. Quinceavo armónico de corriente en el lado de medio voltaje.